



Nelson Cristobal Arzola Pina
Onelio Fundora Herrera
Olimpía Nilda Rajadel Acosta

SUELOS, DEGRADACIÓN Y MEJORAS



AUTORES

NELSON C. ARZOLA PINA

Profesor e investigador titular, graduado de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba y Doctorado de la Universidad de Leipzig, Alemania. Tiene más de 40 años de experiencia en la docencia, la investigación y los servicios técnicos a la producción. Es autor de un libro de texto “Suelo, Planta y Abonado” y coautor de otro “Agroquímica”, ambos publicados por la editorial Pueblo y Educación. Recibió la orden “Carlos J. Finlay, máxima distinción que el Estado y el Gobierno cubano le otorgan a un investigador por su trayectoria científica.

ONELIO FUNDORA HERRERA

Profesor titular, graduado de Ingeniero Agrónomo en la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba y Doctorado de la Universidad de Leipzig, Alemania. Tiene más de 40 años de experiencia en la docencia y la investigación. Es autor de un libro de texto “Agroquímica”, y coautor de dos: “Suelo, Planta y Abonado” y “Edafología”, todos publicados por la editorial Pueblo y Educación.

OLIMPIA NILDA RAJADEL ACOSTA

Profesora Asistente, graduada de Ingeniera Agrónoma en la Universidad Central de Las Villas, Cuba y Máster en Ciencias. Tiene más de 30 años de experiencia en la docencia y la investigación, los servicios técnicos a la producción agrícola y a las actividades directivas técnico- administrativas de diferentes organizaciones productivas del sector agropecuario. Es autora de publicaciones científico- técnicas encaminadas a la solución de problemas en el manejo del recurso suelos.

PRESENTACIÓN

La humanidad crece vertiginosamente sobre una superficie de suelo limitada, de la cual debe obtener alimentos y materias primas; por ello necesita incrementar los rendimientos de los cultivos y utilizar adecuadamente todos los recursos naturales, en especial, aquellos no renovables, como el suelo. En correspondencia con ello, los conocimientos y experiencias contenidas en este libro resultan de gran utilidad para lograr una agricultura, donde elevados rendimientos de los cultivos, se conjuguen con buenos resultados económicos, protección de los recursos naturales y del medio ambiente, detener la desertificación, la erosión, la salinización, compactación, mal drenaje, infertilidad y en definitiva, la degradación de los suelos, proceso que cada día amenaza más con afectar el bienestar o incluso, la supervivencia del hombre. Estos son propósitos que requieren conocimientos como los que se brindan en este texto, haciendo mayor énfasis en el trópico, región más vulnerable y menos estudiada.

Este texto contiene actualizada información sobre los problemas que son necesarios resolver, para mejorar el manejo de los suelos y en particular, el uso de los fertilizantes y enmiendas. Se compone de 13 capítulos y un anexo redactados de forma clara y comprensible, a pesar de la complejidad de algunos temas, por lo que podría ser de utilidad, para investigadores, docentes, estudiantes y otras personas interesadas en este campo.

En los 12 primeros capítulos se tratan los aspectos generales enunciados en el título del libro y en el capítulo 13 se ejemplifica con un cultivo, la caña de azúcar.

Se enfocan novedosos resultados científico técnico, con la necesidad de preservar el medio ambiente y los recursos naturales, para lograr una agricultura sostenible, sin caer en extremos científico- técnicos en que el hombre domine la naturaleza, ni extremos ecologistas que pretendan regresar al surgimiento del hombre en el planeta.

Dedicatoria

A todos los que de una forma u otra han cooperado con la culminación exitosa de esta obra.

Los autores

INDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO	PÁG
CAPITULO 1. PRINCIPIOS PARA EL MANEJO DE LOS SUELOS Y EL USO DE FERTILIZANTES	1
1.1.ELCRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS	1
1.2. ELEMENTOS ESENCIALES PARA LAS PLANTAS	2
1.3.LAS LEYES GENERALES DE LA FERTILIZACIÓN	3
1.4. EL DESTINO DEL ABONADO	6
1.4.1. EXPORTACIÓN DE NUTRIMENTOS	6
1.4.2. RETENCIÓN POR EL SUELO	6
1.4.3.PÉRDIDAS DE NUTRIMENTOS POR ESCORRENTÍA Y LIXIVIACIÓN	7
1.4.4. PÉRDIDAS EN FORMA GASEOSA	9
1.4.5.MÉTODOS PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA DE LOS FERTILIZANTES	10
1.5. EL MANEJO AGRÍCOLA DE LOS AGROSISTEMAS	12
1.6. LA AGRICULTURA ACTUAL Y LOS CAMBIOS GLOBALES	14
1.7. LA VIDA EN EL SUELO	16
1.8.LA AGRICULTURA SOSTENIBLE	18
1.9.LA AGRICULTURA ORGÁNICA	20
1.10. LA AGRICULTURA BIODINÁMICA	21
1.11.LA AGRICULTURA ANTE LA CRISIS ENERGÉTICA MUNDIAL	21
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	23
CAPITULO 2.EL ESTUDIO DE LOS SUELOS, SU CARTOGRAFÍA FACTORES LIMITANTES. USO, MEJORAMIENTO Y CONSERVACIÓN	29
2.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS.	29
2.2. DIFERENTES TIPOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	33
2.3. ESTUDIO DETALLADO DE SUELOS	35
2.4. FACTORES LIMITANTES	41
2.5 EVALUACIÓN DE TIERRAS	42
2.6. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	64
CAPITULO 3. EL COMPLEJO DE CAMBIO DEL SUELO Y LA ABSORCIÓN DE NUTRIENTES POR LAS PLANTAS	85
3.1.GENERALIDADES	85
3.2. IMPORTANCIA DE LA CIC DEL SUELO	86
3.3.FORMACIÓN DE LAS ARCILLAS	87
3.4.FACTORES DE QUE DEPENDE LA CIC DEL SUELO	88
3.4.1.CANTIDAD Y TIPO DE ARCILLA	89
3.4.2. CANTIDAD Y TIPO DE MATERIA ORGÁNICA	93
3.4.3. REACCIÓN DEL SUELO	93
3.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS DE INTERCAMBIO CATIÓNICO	94
3.5.1. VALENCIA DEL IÓN Y VOLUMEN HIDRODINÁMICO	94
3.5.2. SELECTIVIDAD DE UN INTERCAMBIADOR	94
3.5.3. IÓN COMPLEMENTARIO	94
3.5.4. GRADO DE SATURATION	95

3.5.5. SUCESIÓN DE LOS CAMBIOS	95
3.5.6. CAMBIOS DE CONCENTRACIÓN EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO	95
3.6. LA CIC Y EL MEDIO AMBIENTE	95
3.7. MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA CIC DE LOS SUELOS	96
3.8.RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	97
3.9.LA ABSORCIÓN Y TRASLADO DE NUTRIENTES EN LAS PLANTAS	97
3.10. LA EXTRACCION DE NUTRIENTES POR LAS PLANTAS	101
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	104
CAPITULO 4. ELEMENTOS MAYORES PRIMARIOS	107
4.1.ESTUDIO DEL NITRÓGENO	107
4.1.1.GENERALIDADES	107
4.1.2. NITRÓGENO EN LA PLANTA	107
4.1.4. SUMINISTRO DE N DEL SUELO Y DEMANDA DEL CULTIVO	114
4.1.5. DIAGNÓSTICO DE LOS REQUERIMIENTOS DE FERTILIZANTES NITROGENADOS DE LOS CULTIVOS	116
4.1.6. CONSIDERACIONES PARA EL EMPLEO DE LOS FERTILIZANTES NITROGENADOS	119
4.2. ESTUDIO DEL FÓSFORO	119
4.2.1. GENERALIDADES	119
4.2.2. EL FÓSFORO EN LA PLANTA	120
4.2.3. FÓSFORO EN EL SUELO	123
4.2.4.DIAGNÓSTICO DE LA NECESIDAD DE FERTILIZANTES FOSFÓRICOS DE LOSCULTIVOS	125
4.2.5. CONSIDERACIONES PARA EL USO DE LOS FERTILIZANTES FOSFÓRICOS	127
4.3. ESTUDIO DEL POTASIO	128
4.3.1.GENERALIDADES	128
4.3.2. EL POTASIO EN LA PLANTA	129
4.3.3.EL POTASIO EN EL SUELO	133
4.3.4. DIAGNÓSTICO DE LA NECESIDAD DE FERTILIZANTES POTÁSICO	135
4.3.5.CONSIDERACIONES PARA EL USO DE LOS FERTILIZANTES POTÁSICOS	136
4.4.FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RECOMENDACIÓN DE FERTILIZACIÓN CON NPK	136
4.5.IMPLEMENTACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES DE FERTILIZANTES	140
4.5.1. GENERALIDADES	140
4.5.2. FORMULAS DE FERTILIZANTE	141
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	144
CAPITULO 5.ELEMENTOS MAYORES SECUNDARIOS	149
5.1. GENERALIDADES	149
5.2. EL CALCIO	149
5.2.1. CALCIO EN EL SUELO	149
5.2.2. EL CALCIO EN LA PLANTA	151
5.2.3.INSUFICIENCIAS	153
5.2.4. FERTILIZANTES CÁLCICOS	154
5.3.EL MAGNESIO	154
5.3.1.EL MAGNESIO EN EL SUELO	154
5.3.2.EL MAGNESIO EN LA PLANTA	155

5.3.3. INSUFICIENCIA	158
5.3.4. MAGNESIO Y CÁNCER	158
5.3.5. FERTILIZANTES MAGNÉSICOS	159
5.4.EL AZUFRE	159
5.4.1. EL AZUFRE EN EL SUELO	159
5.4.2 .EL AZUFRE EN LA PLANTA	160
5.4.3. INSUFICIENCIA Y EXCESO DE AZUFRE	162
5.4.4.FERTILIZANTES DE AZUFRE	162
BIBLIOGRAFÍACONSULTADA	163
CAPITULO6. MICROELEMENTOS Y METALES PESADOS	166
6.1.GENERALIDADES	166
6.2.FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ASIMILABILIDAD DE LOS MICROELEMENTOS	167
6.2.1. REACCIÓN DEL SUELO	168
6.2.2. POTENCIAL REDOX	168
6.2.3. MATERIA ORGÁNICA	169
6.2.4. MICROORGANISMOS	169
6.2.5 RIZOSFERA	169
6.3.HIERRO	170
6.3.1.EL HIERRO EN EL SUELO	170
6.3.2. EL HIERRO EN LA PLANTA	171
6.3.3.INSUFICIENCIA Y EXCESO	173
6.3.4.CORRECCIÓN DE LA INSUFICIENCIA	174
6.4.MANGANESO	175
6.4.1. GENERALIDADES	175
6.4.2. EL MN EN LA PLANTA	175
6.4.3.INSUFICIENCIA Y EXCESO	176
6.4.4.CORRECCIÓN DE LA INSUFICIENCIA Y EXCESO	177
6.5.CINC	177
6.5.1 EL CINC EN EL SUELO	177
6.5.2. EL CINC EN LA PLANTA	178
6.5.3. INSUFICIENCIA Y EXCESO	178
6.5.4. CORRECCIÓN DE LA INSUFICIENCIA	179
6.6.COBRE	179
6.6.1.COBRE EN EL SUELO	179
6.6.2.EL COBRE EN LA PLANTA	180
6.6.3. INSUFICIENCIA Y EXCESO	182
6.6.4. ELIMINACIÓN DE LA INSUFICIENCIA Y EXCESO	182
6.7.BORO	182
6.7.1.BORO EN EL SUELO	182
6.7.2.EL BORO EN LA PLANTA	183
6.7.3.INSUFICIENCIA Y EXCESO	184
6.7.4.CORRECCIÓN DE LA INSUFICIENCIA Y EXCESO	185
6.8. MOLIBDENO	187
6.8.1. MOLIBDENO EN EL SUELO	187
6.8.2.EL MOLIBDENO EN LA PLANTA	187
6.8.3. INSUFICIENCIA Y EXCESO	189
6.8.4. CORRECCIÓN DE LA INSUFICIENCIA Y EXCESO	190
6.9.METALES PESADOS	191
6.10.DIAGNÓSTICO DE LA INSUFICIENCIA Y EXCESO	193

CAPITULO7.LAREACCION DEL SUELO Y SU CORRECCION	196
7.1.EL RANGO DE PH DE LOS SUELOS	196
7.2.ENMIENDAS CALCÁREAS EN SUELOS ÁCIDOS DEL TRÓPICO	197
7.2.1. EFECTOS DEL ENCALADO	198
7.2.2. CAUSAS DE LA INFERTILIDAD DE LOS SUELOS ÁCIDOS	198
7.2.3.MATERIALES ENCALANTES	202
7.2.4. GARANTÍA QUÍMICA DE LOS MATERIALES ENCALANTES	203
7.2.5. MÉTODOS PARA CALCULAR LA DOSIS DE CAL A APLICAR	204
7.2.6.MÉTODOS DE APLICACIÓN DE CAL	207
7.2.7.SOBRENCALADO	208
7.3.FORMACIÓN Y RECUPERACION DE SUELOS HALOMÓRFICOS	208
7.3.1.EL PH EN EXTRACTOS DE PASTAS DE SUELOS SATURADOS	208
7.3.2. EL CONTENIDO DE SALES DEL AGUA DE RIEGO	209
7.3.3. CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	209
7.3.4. PRINCIPIOS GENERALES SOBRE LA FORMACIÓN Y DAÑOS A CULTIVOS EN SUELOS HALOMÓRFICOS	210
7.3.5. RECUPERACIÓN DE SUELOS HALOMORFICOS	212
7.3.6. TOLERANCIA RELATIVA DE ALGUNAS PLANTAS A LA SALINIDAD	212
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	213
CAPITULO8. EL POTENCIAL REDOX DEL SUELO	216
8.1.GENERALIDADES	216
8.2.MEDICIÓN DEL POTENCIAL REDOX DEL SUELO	216
8.3.VARIACIÓN DEL POTENCIAL REDOX DEL SUELO	218
8.4.RELACIÓN ENTRE EH Y PH	220
8.5.EH Y AIREACIÓN DEL SUELO	220
8.6.EH Y NUTRICIÓN VEGETAL	221
8.7.EH ÓPTIMO PARA EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS	224
8.8.RELACIÓN AIRE/AGUA DEL SUELO	225
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	225
CAPITULO 9.APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA AGRICULTURA	230
9.1.GENERALIDADES	230
9.2.EFECTOS DE LOS ABONOS ORGÁNICOS SOBRE PROPIEDADES DEL SUELO	231
9.2.1. EFECTOS SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	231
9.2.2. EFECTO SOBRE EL VALOR T DEL SUELO	231
9.2.3. APOORTE DE NUTRIMENTOS DE LOS ABONOS ORGÁNICOS	232
9.2.4. EFECTOS DE LOS ABONOS ORGÁNICOS SOBRE ORGANISMOS PATÓGENOS DE LAS PLANTAS	233
9.2.5. EFECTOS DE LOS ABONOS ORGÁNICOS SOBRE LA SALINIDAD DEL SUELO	234
9.3.EMPLEO DE RESIDUOS DE LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR COMO ENMENDANTESDESUELO	234
9.3.1. CACHAZA	236
9.3.2.CENIZA	237
9.3.3. COMPOST	237
9.3.4. RESIDUOS LÍQUIDOS	243
9.4.ESTIÉRCOLES DE LA CRÍA DE ANIMALES COMO ABONOS	250
9.4.1. ORIGEN Y COMPOSICIÓN	250

9.4.2. PÉRDIDAS DE NUTRIMENTOS DEL ESTIÉRCOL	251
9.4.3. MÉTODOS DE PREPARACIÓN DEL ESTIÉRCOL	251
9.4.4. EFECTOS DE LA APLICACIÓN DEL ESTIÉRCOL SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DE LAS PLANTAS	251
9.4.5.EFECTOS DEL ESTIÉRCOL VACUNO SOBRE LA COMPOSICIÓN BOTÁNICA DEL PASTO	253
9.4.6. PURÍN	253
9.4.7.USO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS PECUARIOS	253
9.5.LOS RESIDUOS URBANOS COMO ABONO Y AGUA DE REGADÍO	254
9.5.1. GENERALIDADES	254
9.5.2. RIEGO CON AGUAS ALBAÑALES	254
9.5.3. FANGO DE AGUAS ALBAÑALES	255
9.5.4. BASURAS URBANAS	255
9.5.5. SOLUCIONES POSIBLES CON LOS RESIDUOS URBANOS	257
9.6.PLANTAS ACUÁTICAS	258
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	258
CAPITULO 10.MÉTODOS Y MEDIOS PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE NUTRIMENTOS DE LOS CULTIVOS	263
10.1.INTRODUCCIÓN	263
10.2.MÉTODOS BIOLÓGICOS	264
10.2.1.SÍNTOMAS VISUALES	264
10.2.2.EXPERIMENTOS DE CAMPO	264
10.2.3. EXPERIMENTOS EN MACETAS	273
10.3. MÉTODOS QUÍMICOS	275
10.3.1. ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELO	275
10.3.2. ANÁLISIS FOLIAR	280
10.3.3.EL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELO Y TEJIDO VEGETAL	282
10.4. MÉTODOS MICROBIOLÓGICOS	289
10.5. APLICACIÓN MECANIZADA DE FERTILIZANTES Y ENMIENDAS	290
10.5.1. FUENTES SÓLIDAS	290
10.5.2. FUENTES LIQUIDAS Y GASEOSAS	290
10.6. AGRICULTURA DE PRECISIÓN	291
10.7. VISIÓN DEL DESARROLLO DE LOS MÉTODOS Y MEDIOS	294
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	295
CAPITULO11.CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL CARBONO Y EL NITRÓGENO	299
11.1.GENERALIDADES	299
11.2. CICLO DEL CARBONO	299
11.2.1. DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO EN LA BIOSFERA	301
11.2.2.BALANCE DEL CARBONO	306
11.2.3. TRANSFORMACIÓN DEL ANHÍDRIDO CARBÓNICO EN FORMAS MÁS AGRESIVAS	309
11.2.4. SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES POR OTRAS FUENTES DE ENERGÍA	310
11.2.5. DISMINUCIÓN DEL CONTENIDO DE CO ₂ DE LA ATMÓSFERA	313
11.3. CICLO DEL NITRÓGENO	315
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	318
CAPITULO 12.FUNDAMENTOS AGROECOLÓGICOS PARA EL MANEJO	321

DE AGROSISTEMAS AGRÍCOLAS	
12.1.GENERALIDADES	321
12.2. INFLUENCIA DEL CLIMA	322
12.3. INFLUENCIA DEL SUELO	323
12.4. MANEJO AGROECOLÓGICO	327
12.5. CALIDAD DEL PRODUCTO AGRÍCOLA	333
12.6. FINCA AGROPECUARIA INTEGRADA	335
12.7.SISTEMAS AGROFORESTALES	337
12.8. AGRICULTURA URBANA	338
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	338
CAPITULO 13. EMPLEO DE FERTILIZANTES Y ENMIENDAS EN CAÑA DE AZUCAR	342
13.1.INTRODUCCIÓN	342
13.2.FACTORES EDÁFICOS POTENCIALMENTE LIMITANTES DEL RENDIMIENTO	343
13.3.FUNDAMENTOS PARA EL EFICIENTE EMPLEO DE LOS FERTILIZANTES MINERALES EN LA CAÑA DE AZÚCAR	347
13.3.1.NITRÓGENO	347
13.3.2.FÓSFORO	351
13.3.3. POTASIO	353
13.4.ABSORCION DE NUTRIMENTOS EN PLANTACIONES ENMALEZADAS Y CON MAL DRENAJE	354
13.4.1.MALEZAS	356
13.4.2.MAL DRENAJE	357
13.5.CRITERIOS INTERNACIONALES PARA RECOMENDAR FERTILIZANTES CON NPK	357
13.6.IMPLEMENTACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES DE FERTILIZANTES	358
13.7.BIOFERTILIZANTES	359
13.8.ENCALADO	359
13.8.1. GENERALIDADES	359
13.8.2. EFECTOS DEL ENCALADO	360
13.9.ALTERNATIVA PARA UN MEJOR APROVECHAMIENTO DE LOS SUELOS,FERTILIZANTES Y ENMIENDAS	362
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	362
ANEXO.UNIDADES Y NOMENCLATURA EN LA CIENCIA DEL SUELO	367

"No nos dejemos llevar del entusiasmo ante nuestras victorias sobre la naturaleza: Después de cada una de estas victorias, la naturaleza toma su venganza. Bien es verdad que las primeras consecuencias de estas victorias son las previstas por nosotros, pero en segundo y tercer lugar aparecen unas consecuencias muy distintas, imprevistas y que, a menudo, anulan las primeras".

Federico Engels

CAPITULO 1. PRINCIPIOS PARA EL MANEJO DE LOS SUELOS Y EL USO DE LOS FERTILIZANTES

1.1. El crecimiento demográfico y la producción de alimentos

En opinión de varios especialistas, citados por Moescler (1985), la biosfera podría alimentar 140 000 millones de habitantes, de cultivarse el 55 por ciento de las tierras de cultivo, con un rendimiento igual, al de las mejores áreas agrícolas de Europa Occidental y América del Norte y si la humanidad adoptara un régimen vegetariano. De acuerdo con esto, "La Tierra" podría alimentar una población 35 veces superior a la actual. A pesar de esas inmensas potencialidades, las Naciones Unidas, calculan que 500 millones de personas, se acuestan diariamente con un grave déficit nutritivo, literalmente, muertos de hambre (Agarwal, 1982).

El decrecimiento en cantidad y calidad de los recursos naturales esenciales, tales como tierras y aguas, debido al desarrollo industrial y urbano, la degradación y la contaminación, complican la obtención del necesario incremento en la producción de alimentos, máxime porque este deberá provenir principalmente de elevar los rendimientos de las tierras actualmente cultivadas, y no de incorporar más superficie agrícola fértil a la agricultura (Cassman, 1990; FAO, 1996; Borlaug y Dowsell, 1994). Las causas del hambre radican, no sólo en el desaprovechamiento de las potencialidades existentes en el planeta para la producción de alimentos, sino también en la desigual distribución de las riquezas, ya que mientras parte de la humanidad dilapida recursos, otra parte vive en extrema pobreza.

A pesar de que el uso de tecnologías de altos insumos ha sido visto como una manera de solucionar este problema, es evidente que los costos económicos y ambientales son demasiado altos por la baja eficiencia de uso de los recursos disponibles en este tipo de sistemas agrícolas. La alternativa emergente para el manejo sostenible del suelo implica sistemas agrícolas con una alta eficiencia de uso de recursos disponibles donde el reciclaje de nutrientes desempeñe un papel fundamental (Barrios, 2001).

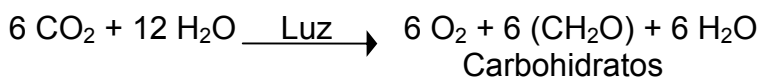
El uso de variedades de alto rendimiento, fertilizantes químicos, modernas técnicas de riego y de conservación de la humedad del suelo, el control efectivo de las malas hierbas, enfermedades e insectos, han mantenido durante las tres décadas pasadas la producción mundial de alimentos, a un ritmo más rápido de crecimiento que el de la población mundial.

Entre el año 1990 y el 2025, el reto de la humanidad es mayor, pues es necesario duplicar la producción de alimentos y ello deberá provenir principalmente de las naciones en vías de desarrollo y a través del cultivo de cereales de altos rendimientos en las áreas cultivables existentes (Borlaug y Dowsell, 1994).

Dentro de los factores que deben contribuir a superar las dificultades con el propósito de obtener suficientes alimentos para la población, se encuentran los fertilizantes. La fertilización, expresan Kemmler et al. (1990) es una de las vías más efectivas para incrementar la producción de alimentos en África, Asia y América Latina; esta afirmación la basaron en un programa realizado por la FAO durante 25 años en que por cada Kg. de $N+P_2O_5+K_2O$, se alcanzó en los cereales un incremento en Kg. de granos de: 4-8 para el trigo y el mijo, 8-12 para el arroz y maíz y de 8 para el sorgo.

1.2. Elementos esenciales para las plantas

INPOFOS (1993) reporta 16 elementos esenciales para la nutrición vegetal. De ellos, tres: Carbono (C), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O) constituyen entre el 90 y el 95% de peso seco de las plantas (99% del peso fresco) y provienen del agua y del aire. Estos tres elementos participan en la fotosíntesis y son los principales constituyentes del cuerpo vegetal.



Los 13 elementos restantes se clasifican en mayores primarios, mayores secundarios y microelementos, son los que la planta absorbe del suelo o de los fertilizantes y enmiendas que se aplican (Cuadro 1.1). El hecho de que un elemento se encuentre formando parte de los tejidos de la planta, no es prueba de que resulte esencial, pues para ello deben cumplirse determinados requisitos como son: 1- el elemento debe estar directamente implicado en el metabolismo de la planta; 2- en caso de insuficiencia, aparecerán anomalías o síntomas definidos y 3- de faltar, la planta no completará su ciclo vegetativo o reproductivo.

Cuadro1.1. Elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (INPOFOS, 1993).

Elementos	Símbolo o fórmula	Kg. ha ⁻¹
Suministrado por el aire y el agua		
Hidrógeno (agua)	H ₂ O	2 - 6 millones
Oxígeno (aire)	O ₂	5000 - 8000
Carbono (dióxido de carbono)	CO ₂	15000 - 25000
Elementos primarios suministrados por el suelo y los fertilizantes		
Nitrógeno	N	20 - 300
Fósforo	P	20 - 100
Potasio	K	20 - 400
Elementos secundarios suministrados por el suelo, fertilizantes o enmiendas.		
Calcio	Ca	20 - 400
Magnesio	Mg	20 - 100
Azufre	S	10 - 100
Microelementos necesarios en cantidades muy pequeñas		
Cloro	Cl	5 - 20
Hierro	Fe	1 - 5
Manganeso	Mn	0.5 - 5
Boro	B	0.2 - 2
Zinc	Zn	0.3 - 3
Cobre	Cu	0.2 - 2
Molibdeno	Mo	0.01 - 0.1

A estos 16 elementos esenciales para todas las plantas superiores, podrían añadirse algunos otros, tales como el Sodio (Na), el Silicio (Si), el Cobalto (Co) y Selenio (Se), que sólo parecen ser esenciales para algunas especies.

Últimamente se le presta mucha atención al silicio, cuya insuficiencia es frecuente en suelos muy meteorizados o con elevados contenidos de materia orgánica. En estos casos, estabiliza la materia orgánica del suelo, mejora la formación de ácidos húmicos y fulbitos, garantiza la reducción de la fertilización mineral en un 25%, pesticidas en un 50% y aumenta los rendimientos entre un 10-15%. Estos resultados encontrados en arroz, caña de azúcar y plátanos, también son extensivos a la palma de aceite (Sydney et al., 2006; Matichenkov, 2008; Matichenkov y Bocharnikova, 2009).

El hombre ha construido muchas de sus grandes ciudades donde se presentan fallas geológicas de la Tierra, lo que le ha beneficiado por ser esos lugares mas ricos en minerales, pero mas peligrosos ya que allí son mas frecuentes las erupciones volcánicas, temblores de tierra y maremotos. Es de esperar también que, los riesgos de toxicidad por excesos de determinados elementos, como varios metales pesados a los que no se les conoce función alguna en el metabolismo vegetal sean mayores en esa región, sin embargo, en las islas de Hawaii se han alcanzado rendimientos en cultivos como la caña de azúcar y la piña tan elevados que son ejemplos a nivel mundial, otro ejemplo, es la falla de San Andres en California que se destaca por su producción agrícola y la vinicultura (además de sus grandes reservas de petróleo). Esto hace pensar, que otras ventajas han superado esa posible desventaja que podría resultar de la toxicidad de determinados elementos, como son: la excelente fertilidad

de los suelos de origen volcánico, la existencia de microclimas intramontanos favorables para cultivos como la vid, y que quizás aún no conocemos en toda su magnitud el listado completo de elementos esenciales y sus rangos de abastecimiento para las plantas.

1.3. Las Leyes Generales de la Fertilización

Los fertilizantes minerales se utilizan con la finalidad de abastecer los elementos esenciales que requiere cada localidad o condición en particular. Su uso se rige por varias leyes de las cuales se comentaran algunas por su importancia.

☐ Ley de la restitución

“Restituírle al suelo los elementos esenciales que se han perdido por diversas vías, para evitar su agotamiento nutricional”.

Esta ley debe interpretarse en la actualidad considerando el nivel de abastecimiento del suelo. En suelos pobres se debe aportar más de lo que se ha perdido para que el suelo alcance un contenido adecuado; en suelos adecuadamente abastecidos, se debe aplicar esa ley para que se mantengan en ese nivel de abastecimiento; en suelos ricos o con exceso del nutriente, no se debe aplicar nada para que el nivel sea el adecuado.

☐ Ley del mínimo

Liebig la expresó: “Los rendimientos de las cosechas son proporcionales a la cantidad del elemento fertilizante que se encuentra al mínimo en el suelo con relación a las necesidades de las plantas.”

Voisin (1966), añade a esa ley la dependencia entre los nutrientes, la que expresa como sigue: “La insuficiencia de un elemento asimilable en el suelo reduce la eficacia de otros elementos y, por consiguiente, disminuye el rendimiento de las cosechas”.

“Del conjunto de nutrientes esenciales, el que se encuentre al mínimo con respecto a las necesidades de la planta (P, en el ejemplo) es el que determina el rendimiento que se alcanzará (nivel de agua del barril en la ilustración)”. De ahí que sólo aplicando fósforo sería posible, en este ejemplo, aumentar el rendimiento (Figura 1.1).

LEY DEL MÍNIMO

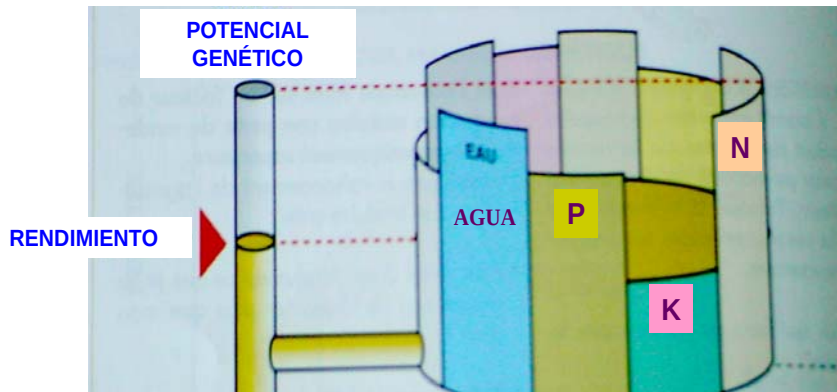


Figura1.1: Esquema que representa la ley del mínimo (Buckman y Brady, 1967).

El vaso comunicante en el barril, representa el potencial genético de rendimiento de la variedad (genotipo), el cual se alcanzará en mayor o menor medida, dependiendo de los factores nutricionales que limiten los rendimientos (ambiente). Desde otro punto de vista, serán mejor aprovechadas las potencialidades de rendimiento en un ambiente determinado, mientras mayor potencial de rendimiento posea la variedad plantada. Esto ilustra la relación entre el genotipo y el ambiente.

El esquema del barril fue creado por Buckman y Brady (1967), representa una excelente síntesis para comprender esta ley, posteriormente este fue ampliado y completado por otros autores que integran el genotipo, los factores ambientales y resaltan la influencia de determinadas propiedades del suelo, sosteniéndose el barril por tres patas, representadas por aquellas propiedades que se consideran mas influyentes sobre el rendimiento del cultivo. Estas son:

- El estado estructural del suelo dado que el deterioro de la estructura; define la degradación física del suelo manifestada, principalmente, a través de problemas de compactación, impermeabilidad, costras, mal drenaje, pobre aireación y erosión eólica e hídrica.
- La materia orgánica, la cual favorece diferentes propiedades del suelo. Este efecto beneficioso es mayor mientras más humificada se encuentre, por ejemplo, en un estudio realizado en tres suelos venezolanos se encontró que, la fracción de ácido húmico predominaba sobre la de ácido fúlvico, lo que dice bien, sobre la calidad de ella para mejorar las propiedades físicas y la CIC de estos suelos (Rivero y Paolini, 1994).
- La tercera pata es la reacción del suelo o pH, el cual influye sobre sus propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas.

Ley de los aumentos decrecientes o de Mitscherlich

“Cuando se aportan aumentos constantes del elemento esencial que limita el rendimiento del cultivo (factor limitante), corresponden aumentos cada vez menores del rendimiento, a medida que la cosecha se acerca a su máximo”. Esto explica por qué el óptimo económico de la dosis de aplicación de un nutriente es algo inferior al máximo rendimiento que se puede alcanzar con su aplicación. Aplicaciones por encima de las necesarias para alcanzar un máximo rendimiento sólo ocasionan mayores gastos y deterioro ambiental (consumo de lujo) y puede llegarse a un exceso nutricional, con disminución de los rendimientos (Ley del máximo y de desequilibrio nutricional). (Figura 1.2).

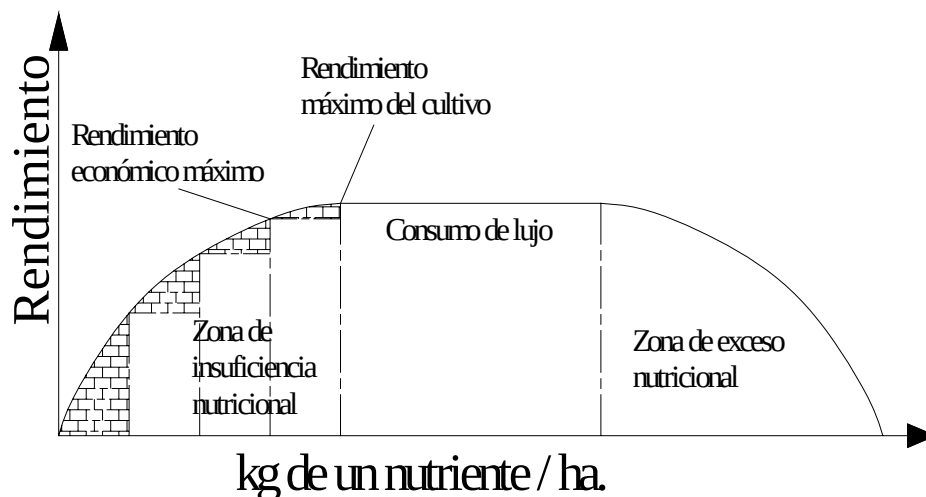


Figura 1.2. El incremento en rendimiento a dosis crecientes de fertilizantes.

La ley del máximo la enuncia Voisin (1966) de la forma siguiente:” El exceso de un elemento asimilable en el suelo reduce la eficacia de otros elementos y, por consiguiente, disminuye el rendimiento de las cosechas”.

Un exceso nutricional es perjudicial: económicamente, por originar mayores gastos sin ningún retorno monetario, pues no se obtienen mayores rendimientos; a los recursos naturales, por emplearse estos sin obtener provecho alguno; al medio ambiente, por contaminarse con mayores cantidades de desechos de los abonos, a la calidad de los alimentos, por ser menos conservables (por ejemplo el exceso de nitrógeno) y de menor valor biológico.

1.4. El destino del abonado

La porción del abonado que no es extraída por la planta queda como “residuo” en el suelo, donde o bien permanece incrementando las reservas nutricionales de él, o se pierde por diferentes vías contaminando el entorno.

1.4.1. Exportación de nutrimentos

El abono se aplica al suelo con el propósito de cubrir los requerimientos nutricionales de los cultivos, los cuales difieren ampliamente en sus necesidades. Una cosecha de 25 t de racimos de fruta de la palma aceitera exporta del campo en Kg. /ha /año, 73.2

de N, 11.6 de P, 93.4 de K, 20.8 de Mg y 17.5 de Ca, lo que significa, 2.93 Kg. de N, 0.46 Kg. de P, 3.74 Kg. de K, 0.83kg de Mg y 0.7kg de Ca por t de racimos (Ng., 1972). Por otra parte, una cosecha de papas exporta por cada tonelada de producto, 4 Kg. de N, 0.65 Kg. de P, 5 Kg. de K, 0.14 Kg. de Ca y 0.18 Kg. de Mg (Berna y Monzó, 1999). Las necesidades nutricionales de los cultivos varían, con el rendimiento alcanzado, por ejemplo de acuerdo con el dato anterior, una cosecha de 10 t de papas exportaría 40, 6.5 y 50 Kg. de N, P y K respectivamente, mientras que una de 20 t de papas, duplicaría esa cifra, lo que indica que a mayor rendimiento deberá aplicarse mayor dosis de fertilizante para reponer lo exportado por la cosecha.

1.4.2. Retención por el suelo

Las características y consecuencias de este fenómeno varían atendiendo al nutrimento en cuestión, razón por la cual esto deberá considerarse para cada elemento por separado. El nitrógeno puede aplicarse en forma de compuestos orgánicos o en forma inorgánica. En este último caso, la retención por el suelo es muy escasa, siendo el efecto de la fertilización nitrogenada poco duradero, por lo que suele ser necesario fraccionar la dosis total en varias aplicaciones. Este elemento presenta mayor estabilidad en el suelo cuando se encuentra formando compuestos orgánicos, pues en ese caso se requiere de la transformación por los microorganismos para que pase a la forma mineral, soluble y asimilable por las plantas; por ello el efecto de los abonos orgánicos es mucho más sostenido que el de los fertilizantes minerales nitrogenados. Incluso con el propósito de mejorar la eficiencia de estos fertilizantes, actualmente se han fabricado tratando de imitar el mecanismo gradual de liberación de nutrimentos, de los abonos orgánicos.

Los aniones del ácido ortofósforico derivados del empleo de los fertilizantes fosfóricos, suelen unirse fuertemente al hierro, al aluminio y a las cargas positivas de las arcillas en medio ácido y al calcio, en suelos calcáreos. En los suelos donde este proceso de retención es intenso, este nutrimento se une con tanta fuerza, que no puede ser utilizado por las plantas (proceso de fijación) y esa parte del fertilizante fosfórico aplicado queda como residuo en el suelo. En estos casos, puede existir un elevado contenido de fósforo total en el suelo, pero no ser suficiente el fósforo asimilable, para cubrir los requerimientos del cultivo.

Los fertilizantes potásicos son muy solubles en agua, por ello este elemento pasa con facilidad a la solución del suelo, de donde, puede perderse con esta por escorrentía o lavado, ser extraído por el cultivo, o quedar retenido en la fase sólida del suelo. Gracias a ese proceso de retención, se crean reservas en el suelo, de manera que cuando disminuye la concentración de este elemento en la solución del suelo, pasan a ser utilizables por el cultivo. Macroelementos secundarios, como el calcio y el magnesio compiten en el complejo de cambio por las mismas posiciones de intercambio que el potasio y pueden reemplazarlo de las cargas negativas de las arcillas o del humus y dejarlo expuesto a perderse de la solución del suelo por diversas vías; por ello el encalado, puede provocar insuficiencia de potasio. El azufre en forma inorgánica en el suelo se presenta principalmente, como sulfuro en los suelos reducidos, como es el caso del cultivo del arroz bajo aniego o como sulfatos en los suelos con buena aireación (oxidados); la primera forma, puede perderse en forma gaseosa si no precipita con metales como hierro o manganeso; en tanto que la

segunda es muy móvil y como apenas se retiene en el suelo (al igual que sucede con el anión nitrato), se lava con facilidad.

Los microelementos y metales pesados no esenciales, generalmente se retienen con mucha fuerza en el complejo de cambio del suelo, y las plantas los absorben en tan pequeña proporción, que si un suelo alcanza niveles tóxicos de alguno de ellos, pudiese ser necesario cientos de años, para que retorne a un nivel normal. Estos lugares no pueden dedicarse a la siembra de cultivos económicos, pues a través de la cadena alimenticia envenenarían a los animales y al hombre, por ello, deben ser dedicados a bosques.

La retención del suelo, suele ser un proceso negativo, cuando se crean niveles tóxicos de determinados elementos, pero la retención resulta beneficiosa, siempre que se alcance un contenido óptimo de cada nutrimento en el suelo y el manejo agrícola utilizado contribuya a que dicho estatus se mantenga prolongadamente. Si no existiera la retención, o la misma fuera débil (como sucede con el ión nitrato), sería necesario realizar mayores gastos en fertilizantes y estos al perderse por diversas vías, contaminarían en esa misma medida al medio ambiente.

1.4.3. Pérdidas de nutrimentos por escorrentía y lixiviación

Un proceso conocido por eutrofización ocurre, cuando por escorrentía los nutrimentos y partículas de suelo llegan a las aguas superficiales, y se acumula en lugares donde estas se mueven lentamente (presas, lagos, etc.).

Esta abundancia de nutrimentos en lugares donde son limitantes ocasiona con frecuencia un crecimiento rápido de las algas fotosintéticas, que por encontrarse superficialmente, absorben la luz solar e impiden que penetre a profundidad. Esto, ocasiona por una parte, la muerte de plantas que viven a mayor profundidad y por la otra, un incremento de la cantidad de microorganismos que se alimentan de las algas y que a diferencia de ellas, que desprenden oxígeno en la fotosíntesis, consumen oxígeno del agua. La falta de oxígeno ocasiona la muerte de peces e inhibe la descomposición (oxidación) de la materia orgánica, la que se acumula en el fondo.

De los diferentes nutrimentos, el nitrógeno, en forma de nitrato, es una de las formas que con mayor facilidad es arrastrada por el agua de escorrentía y de lavado a través del suelo. Esto ocasiona, que el contenido de $(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-) - \text{N}$, supere ocasionalmente en el agua potable (bien sea de río o de pozo) las 10 p.p.m., lo cual, origina en niños menores de 4 meses de edad, la enfermedad denominada metahemoglobinemia de la sangre. Los nitritos oxidan el hierro en la molécula de hemoglobina. El hierro pasa del estado ferroso (Fe^{2+}) al férrico (Fe^{3+}) y la hemoglobina sanguínea pasa a metahemoglobina, pigmento marrón que es incapaz de combinarse con el oxígeno y de transportarlo a los tejidos corporales, evitando así la correcta oxigenación del organismo. Esta toxicidad recibe el nombre de metahemoglobinemia.

Ese efecto perjudicial sobre la salud, se explica, porque en el tracto intestinal se reduce el nitrato a nitrito siendo entonces absorbido el nitrito en el torrente sanguíneo, de donde, no puede ser eliminado por los niños menores de cierta edad por mecanismos de desintoxicación sino, que se combina con la hemoglobina, forma metahemoglobina y se reduce la capacidad de la sangre para transportar el oxígeno.

Los niños menores de 2 años, que están afectados con este problema, se muestran agitados, con taquicardia y disnea, presentan coloración parda oscura de la sangre y cianosis. El síntoma clínico de la metahemoglobinemia (bebe azul) puede detectarse

cuando el 10 % de la hemoglobina pasa a metahemoglobina y la muerte ocurre cuando la sangre contiene 50 - 79 % de metahemoglobina (Fernández, 1996).

Otra vía de intoxicación por los nitritos está relacionada con su capacidad de reaccionar con las amidas y aminas, sustancias del organismo humano, dando lugar a la formación de nitrosamidas y nitrosaminas, compuestos que en el 75 % son capaces de producir cánceres hepáticos según experiencias de laboratorio. Se ha comprobado mediante estudios epidemiológicos que existe una correlación positiva entre el consumo de alimentos y aguas con exceso de nitratos y los cánceres gástricos.

La propuesta de regulación sanitaria para Cuba sobre los límites de residuos permisibles de nitratos en los productos de origen vegetal se muestra en el cuadro 1.2.

Cuadro 1.2. Límites de residuos permisibles de nitratos en los productos de origen vegetal (García Roché y Grillo, 1991).

Cultivo	(mg NO ₃ /kg)	Cultivo	(mg NO ₃ /kg)	Cultivo	(mg NO ₃ /kg)
Plátano	500	Remolacha	3000	Pepino	100
Yuca	450	Berro	3000	Boniato	100
Malanga	450	Rábano	2800	Cebolla	90
Calabaza	400	Lechuga	2500	Legumbres	80
Papa	250	Acelga	2500	Arroz	40
Berenjena	200	Col	850	Pimiento	100
Tomate	150	Nabo	600	Zanahoria	600

Las pérdidas por lavado de los nitratos, varían con muchos factores, los valores encontrados en el área del Valle del Colorado en los EE.UU. se encuentran entre 28 y 33 Kg de N/ha/año (Stewart et al., 1967). En California, en áreas de cítrico irrigadas, Bingham et al. (1971) encontraron al evaluar los nitratos perdidos en el agua de drenaje, (en un período de 3 años) que este tipo de pérdida representaba un 45% del nitrógeno aplicado al cultivo.

La disminución de la contaminación de las aguas potables, con nitratos y nitritos, en los lugares donde esto constituye un problema, podría lograrse con medidas como las siguientes:

- Aportar el nitrógeno a los cultivos de una forma gradual, mediante el empleo de fertilizantes nitrogenados de liberación lenta, abonos orgánicos o biofertilizantes.
- No aplicar en exceso nitrógeno, ni agua de riego a los cultivos y evitar derrames Innecesarios de fertilizantes nitrogenados en almacenes, caminos, etc.
- Emplear sustancias que inhiban la nitrificación.

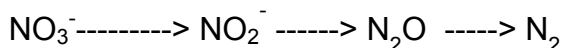
A pesar de la poca movilidad del fósforo en el suelo, el contenido de este elemento en las aguas superficiales, está relacionado directamente con el contenido de este en el suelo y en la roca madre (Mc Hargue y Peter, 1921; Thomas, 1970).

Las variadas condiciones del medio, tipos y dosis de productos que suministran nutrimentos a los cultivos, hacen infinita las combinaciones de composiciones del agua de escorrentía y lavado que pueden existir, así como también las de las aguas donde estas se depositan, por ello no resulta fácil demostrar y cuantificar la influencia de los abonos sobre la composición de las aguas potables; pero es evidente que su influencia está presente y que deben tomarse medidas para evitar que se contaminen y con ello se afecte la salud y el bienestar del hombre.

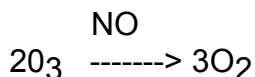
1.4.4. Pérdidas en forma gaseosa

El nitrógeno, es un nutrimento expuesto a perderse del suelo, en forma gaseosa, por diferentes vías, como son; la volatilización del amoníaco y la desnitrificación de los nitratos. Las investigaciones con N^{15} han permitido establecer que entre un 10 y un 20% del fertilizante nitrogenado aplicado, se pierde en forma gaseosa (Jung, 1972). La pérdida por volatilización como amoníaco requiere de la presencia de nitrógeno en forma amoniacal, por ello, bajo condiciones donde este tipo de pérdida es de importancia (aplicación superficial en suelos calcáreos y secos) se prefiere no emplear una fuente con esas características y en caso de hacerse, enterrar el fertilizante.

Las pérdidas de los nitratos, por desnitrificación, ocurren en los suelos, con diferente intensidad y constituyen una de las causas, por la cual, incrementa el contenido de N_2O en la atmósfera. En el suelo ocurre la siguiente transformación:



El NO se forma a partir del N_2O y destruye el ozono. Puerto y García (1987) representan la reducción del ozono con la siguiente reacción:



Con la destrucción de la capa de ozono en la estratósfera; se facilita la penetración de los rayos ultravioletas y por esa causa puede incrementar el cáncer de la piel y otras enfermedades en el hombre.

La desnitrificación, es un proceso, con características ambiguas, desde el punto de vista ecológico, ya que si bien, es desfavorable, por la destrucción que puede originar en la capa de ozono, es favorable, desde otro punto de vista, ya que evita la contaminación de las aguas potables con nitratos.

La nitrificación, es en sí un proceso ecológicamente negativo, pues los nitratos son el punto de partida para que se contaminen las aguas potables o se destruya la capa de ozono con los óxidos formados en la desnitrificación, por otra parte, desde el punto de vista agrícola, el nitrato por estar muy expuesto a pérdidas por lavado y desnitrificación, es menos eficiente como fuente de nitrógeno para los cultivos en condiciones en que esas pérdidas son de importancia. Por ello se considera provechoso para impedir las pérdidas de los fertilizantes nitrogenados, el empleo de sustancias que inhiban la nitrificación, estas debe eliminar solo las bacterias que llevan a cabo ese proceso y no tener efectos secundarios perjudiciales para el medio ambiente.

Es difícil determinar el grado de participación, que los fertilizantes nitrogenados han tenido sobre la contaminación de las aguas y la atmósfera del planeta, pues varias son las fuentes, de donde pueden provenir estos compuestos; no obstante, es

razonable pensar que su participación haya sido apreciable y que podrá incrementar en un futuro, si no se toman medidas adecuadas, ya que hasta el presente, el hombre ha pretendido aumentar los rendimientos y la producción de alimentos ricos en proteína con los fertilizantes nitrogenados, sin percatarse del daño que de su uso indiscriminado se puede derivar. Lo anterior no significa en modo alguno, suprimir la fertilización con un nutrimento, al cual, se le atribuye un 30 porciento de toda la producción agrícola en los países desarrollados del mundo (Olson, 1972) sino, conjugar el aspecto económico con el ecológico.

1.4.5. Métodos para aumentar la eficiencia de los fertilizantes

Con el propósito de incrementar la eficiencia en el uso de los fertilizantes y reducir la contaminación, Haifa (1990) considera dos vías:

1-Lograr sinergismo entre los nutrimentos que se aplican. Esto ocurre cuando se aplican las combinaciones siguientes: amonio con nitrato; potasio con amonio o nitrato y fósforo o hierro con amonio o potasio.

2-Sincronizar el suministro de nutrimentos, en términos de cantidad y composición, con la demanda de las plantas. Para esto se pueden emplear los inhibidores de la nitrificación con fertilizantes amoniacales y fertilizantes de liberación lenta.

Con el propósito de obtener un fertilizante que libere los nutrimentos lentamente (de acuerdo a los requerimientos de la cosecha) y baste una simple aplicación basal, se han creado diferentes fertilizantes (ureaform, IBDU, CDU), pero aún no se ha logrado ese propósito debido a que diferentes factores del suelo (pH, humedad y actividad microbiana) influyen significativamente en el proceso de liberación. En Japón se ha trabajado en la creación de una cubierta (formada por resinas termoplásticas y tensoactivas que pueda controlar la liberación de los nutrimentos por periodos desde una semana a un año o más (Fujita y Yasuhara, 1990).

La producción que se alcance con la aplicación de cada kg de nutrimento activo que se aplique con los fertilizantes dependerá del cultivo de que se trate, de las condiciones ambientales en que el mismo se desarrolle y de lo eficiente que resulten las prácticas agrícolas que se empleen con la finalidad de eliminar otros factores que influyen en la efectividad de la fertilización. Por ejemplo, la yuca (*Manihot esculenta* Cratz) es un arbusto, que se cultiva en condiciones difíciles para otros cultivos, como son: suelos ácidos, infértiles y con periodos prolongados de sequía, a pesar de su resistencia a la escasez de humedad del suelo, el efecto de la fertilización es mayor cuando la plantación no se desarrolla bajo estrés de humedad (Cuadro1.3).

Cuadro1.3. Efecto del estrés hídrico y la fertilización en el rendimiento de raíces frescas de una variedad de yuca (Mejía et al., 1994)

Fertilización	Régimen hídrico		Diferencia
	Con estrés	Sin estrés	
Con fertilizante	9.21	8.86	0.35
Sin fertilizante	6.50	5.48	1.02
Diferencia	2.71	3.38	

La propiedad del suelo de retener en forma cambiante los cationes propicia que estos permanezcan asimilables y puedan ser absorbidos por las plantas. Si esa propiedad no existiera, el suelo no dispondría de ninguna reserva nutricional y los nutrientes aplicados con los fertilizantes se perderían con rapidez por escorrentía y lavado.

Se conoce que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) o valor T depende de la cantidad y tipo de arcilla, de la cantidad de materia orgánica y sus características y de la reacción del suelo (en los casos en que los coloides presentes poseen cargas inducidas). La materia orgánica puede aumentar su contenido en el suelo mediante la aplicación de abonos orgánicos y para conservar la existente en el suelo se deben emplear adecuadas medidas de manejo agronómico; el pH puede aumentar mediante el encalado, ahora bien, no es común aplicar arcillas a los suelos aunque últimamente se ha difundido un mineral que se destaca por su elevada CIC, denominado zeolita.

Las zeolitas naturales constituyen un grupo de minerales que aparecen en rocas preferentemente de origen volcánico que comprende un grupo de cerca de 50 especies, son la clinoptilolita y la mordenita las de mayor dimensión de sus depósitos, consecutividad de aparición y diversidad de aplicaciones a nivel mundial. La zeolita se destaca por:

☞ Su elevada retención de humedad, lo que le permite mantener un adecuado régimen hídrico en suelos en que la escasez de humedad limita los rendimientos, como los arenosos o en los que predominan tipos de arcilla de baja retención de humedad (caolinita y de hidróxidos).

☞ Su elevada capacidad de intercambio catiónico, lo que disminuye las pérdidas de nutrientes tanto nativos del suelo como aplicados con los fertilizantes (amonio, potasio) y permite una liberación lenta o más gradual de estos nutrientes, lo que resulta de particular interés en suelos como los mencionados en el párrafo anterior en que las reservas nutricionales son escasas y las pérdidas intensas.

La aplicación de zeolita disminuye las pérdidas del nitrógeno mineral del suelo asimilable para las plantas, lo que puede resultar de gran importancia para incrementar el aprovechamiento por las plantas, de un nutriente tan costoso, susceptible a pérdidas y de empleo tan generalizado por su efecto positivo sobre los rendimientos de los cultivos como el nitrógeno (Sobrepera et al., 1991).

La zeolita puede mezclarse con los fertilizantes minerales (como los nitrogenados y potásicos) con el propósito de mejorar sus propiedades físicas, disminuir las pérdidas de los nutrientes en el suelo, lograr un mejor aprovechamiento de estos por el cultivo y alcanzar gracias a ello un mayor rendimiento o menor necesidad de fertilizantes minerales, aspectos estos de importancia no solo económica, sino también ecológica (Arzola et al., 1991a; Arzola et al., 1991b).

Las dosis de aplicación varían con las características de los suelos y otros factores, puede aplicarse al suelo localizado o a voleo, también la mezcla de la zeolita con fertilizantes minerales ha mostrado ser una buena opción para incrementar la efectividad de los fertilizantes nitrogenados o potásicos.

La eficiencia de los fertilizantes continúa siendo en la actualidad baja y es necesario mejorarla por razones económicas y ecológicas; basta decir que del total de nutrimentos que se aplican a los cultivos con los fertilizantes minerales, la mitad o

menos es asimilada por la planta; por ejemplo, solo se aprovecha alrededor de un 50% del nitrógeno aplicado (Allison, 1966).

1.5. El manejo agrícola de los agrosistemas

El rendimiento de un cultivo depende de su potencial genético y de los factores ambientales que hacen posible que este potencial se alcance en mayor o menor medida; estos factores pueden ser bióticos (plagas, malezas) o abióticos (edáficos, climáticos); no obstante, el manejo agrícola puede modificar favorable o desfavorablemente la influencia de estos sobre el rendimiento del cultivo y el entorno. Según Woomer (1994) el manejo inadecuado de los agrosistemas ha resultado en degradación de la tierra, pérdida de biodiversidad e incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera.

Sánchez (1994) expresa que durante años el incremento de la producción agrícola se ha basado en un sistema intensivo brindándosele poca atención al medio ambiente. Ello lo resume en lo que denominó primer paradigma, según el cual, es necesario: "Eliminar con urgencia los problemas del suelo, a través de la aplicación de fertilizantes y enmiendas en cantidades suficientes como para cubrir los requerimientos de las plantas". A su vez un manejo agrícola sostenible, requiere prevenir el daño de los suelos que pueden ser degradados y reparar el daño de los que ya lo están. Así establece un segundo paradigma, que dice: "Confiar más en los procesos biológicos por adaptación del germoplasma a las condiciones adversas del suelo, mejorar la actividad biológica y optimizar el ciclo de los nutrientes".

Lo que ha ocurrido, en los agrosistemas ha dependido grandemente del manejo agrícola utilizado, un ejemplo de ello es expuesto por Borlaug (1994) quien recopiló información sobre el progreso en la producción de cereales en los cuatro países más poblados del mundo: China, India, E.E.U.U. y la entonces U.R.S.S.; países estos que desde luego presentan pronunciadas diferencias en suelos y clima. Es interesante que a pesar de ello los rendimientos entre China y los E.E.U.U. muestren desde el año 1961 una estrecha relación. China es el mayor productor de cereales del mundo, ese desarrollo se debe a varios factores, como son: la obtención de variedades más productivas, mejoras en los sistemas de irrigación y en particular a los esfuerzos por mejorar y mantener la fertilidad del suelo. China, durante siglos, ha hecho el mejor uso del reciclaje de los materiales orgánicos y ha elaborado compost, mientras que los agricultores de la India con bajos rendimientos, se han caracterizado por quemar los residuos orgánicos y utilizar el estiércol como combustible.

El laboreo y el no utilizar prácticas de reciclar los residuos de las cosechas, han contribuido, a la disminución del contenido orgánico de los suelos; lo que conjuntamente con la mecanización, ha propiciado el deterioro de la estructura y la compactación de los suelos. Por esta causa, disminuye la infiltración del agua, la que se acumula en las zonas bajas, mientras que se erosionan los suelos en las zonas onduladas.

Bragagnolo (1995) expresa que los espacios vacíos del suelo (dentro y entre los agregados estructurales) son más importantes que las partículas sólidas, por ser esenciales para la aireación y el intercambio de gases en la zona de las raíces, por su capacidad de retención de agua, que queda así disponible para las plantas, por facilitar el drenaje del exceso de agua y el crecimiento y funcionamiento de las raíces. Estos poros, de tamaños y disposiciones espaciales apropiadas, pueden perderse,

cuando desaparecen los pegamentos orgánicos y se debilita la estructura, cuando hay compactación por maquinaria agrícola u otros implementos pesados, la infiltración se bloquea por partículas más finas o cuando el suelo se pulveriza por la labranza.

Las sustancias orgánicas solubles bajan la tensión superficial de la solución del suelo de manera que pueden incorporarse al interior de los agregados a través de los poros finos, mientras que, la presencia de sustancias apolares como componentes aromáticos originan una deficiente humectación de los suelos (Ellies et al., 1996).

Bragagnolo(1995) afirma que cualquier estrategia destinada a reducir la degradación del suelo en áreas agrícolas, debe contemplar y combinar los siguientes cuatro tipos de medidas:

1. Estructuras físicas: su objetivo consiste en reducir los daños de la erosión por transporte, controlar el escurrimiento superficial, regular el régimen hídrico en la cuenca hidrográfica y evitar la sedimentación de los manantiales. Ejemplos de esto son: la construcción de barreras, establecimiento de terrazas y cordones de vegetación permanente.
2. Prácticas de preparación de suelo: consisten en el mejoramiento de las labores de preparación de suelos con el propósito de aumentar la infiltración de agua en el suelo y reducir el escurrimiento superficial.
3. Prácticas agronómicas: consisten en mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo, mediante una cobertura de suelo que permita reducir la energía de impacto de las gotas de lluvia, evitar la degradación de la estructura del suelo y disminuir el escurrimiento superficial.
4. Prácticas de siembra directa: consisten en disminuir la intensidad del movimiento del suelo y reducir la frecuencia del paso de la maquinaria, lo que conserva el suelo y permite mayores beneficios económicos.

1.6. La agricultura actual y los cambios globales

La pureza de la atmósfera, no es ajena a la actividad agrícola, basta decir, por solo citar un ejemplo, que la quema de biomasa origina una emisión de CO₂, entre 2,700 y 6,800 millones de t de CO₂, expresadas como C, lo que contribuye al efecto invernadero (Krutzen y Andrade,1990).

Las consecuencias que el enriquecimiento de la atmósfera con gases con efecto invernadero podría traer a la humanidad, son alarmantes, pues serían catastróficas en las zonas actualmente pobladas, que se encuentran próximas al nivel del mar.

El CO₂ tiene inmensas líneas de absorción de la luz del sol, por lo cual, su comportamiento en la atmósfera, se parece a la del vidrio en un invernadero, que deja penetrar la radiación solar, sin permitir que la radiación infrarroja (térmica) se escape en dirección contraria, por ello la atmósfera inferior se mantiene más caliente que lo que debería estar(Vinogradov,1981).Debido a este cambio climático, pueden derretirse parte de los hielos en los casquetes polares e incrementar el nivel del mar, hasta inundar zonas actualmente pobladas.

La preocupación sobre el calentamiento global se discutió en diferentes conferencias internacionales, la tercera conferencia mundial celebrada en Kioto aprobó medidas

específicas, lamentablemente las proyecciones no muestran reducción en la contaminación (Cuadro 1.4) (Energy Information Administration, 1998).

Cuadro 1.4. Emisiones Totales de Carbono por Región, 1995 y 2020 en millones de toneladas métricas (Energy Information Administration, 1998).

Regiones	Real 1995	Proyectado 2020	Cambio % Anual 1995-2020
Norteamérica	1.629	3.313	1,4%
Europa Occidental	925	1.239	1,2%
Asia Industrializada	379	415	1,2%
Europa Oriental y antigua Unión Soviética	866	1.223	1,4%
Asia en desarrollo	1.427	3.835	4,0%
Medio Oriente	229	409	2,3%
África	192	341	2,3%
Centro y Suramérica	194	574	4,4%
Total Mundial	5.841	10.447	2,4%

Con el aumento de la temperatura cerca de la superficie de los océanos incrementará la evaporación y con ello la cantidad de lluvias y nevadas. Se calcula que 10°C de incremento de temperatura producirá un incremento a nivel global de $(10)^9 \text{ m}^3$ de agua lo que significa un aumento aproximado de 20% sobre la producción actual de agua dulce $(44) (10)^9 \text{ m}^3$ (Sombroek, 1990). Conforme el clima se haga más cálido la evaporación se incrementará. Esto causará un aumento de las precipitaciones y más erosión; se pronostica un aumento de las precipitaciones en las regiones frías (latitudes altas) y en ciertas regiones tropicales lluviosas, a la vez que una reducción en las zonas secas de latitudes medias y tropicales, como la cuenca mediterránea o el nordeste brasileño. Es decir, un clima más extremo con la precipitación repartida de forma más desigual (IPCC, 2007).

El cuerpo de la ONU encargado del análisis de los datos científicos relevantes —el IPCC (Inter-Governmental Panel on Climate Change o Panel Intergubernamental del Cambio Climático)— sostiene que «la mayoría de los aumentos observados en las temperaturas medias del globo desde la mitad del siglo XX son muy probablemente debidos al aumento observado en las concentraciones de gases de efecto invernadero» (IPCC, 2007). Esto es conocido como la teoría antropogénica y predice que el calentamiento global continuará si lo hacen las emisiones de estos gases.

Determinadas prácticas agrícolas contribuyen al desprendimiento de CO_2 a la atmósfera; por ejemplo, mediante la combustión de biomasa no solo se aporta anhídrido carbónico, sino también óxidos de nitrógeno y de azufre; la fertilización nitrogenada se asocia con la formación de óxidos de nitrógeno; en tanto que en las regiones donde se cultiva el arroz bajo riego, se desprende metano en grandes cantidades. Estos gases, que tienen efecto invernadero, han incrementado su concentración en la atmósfera debido a la actividad antropogénica.

Además del ya mencionado efecto invernadero de estos gases, Puerto y García (1987) señalan que los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x) presentes en la atmósfera, forman ácido nítrico y sulfúrico, los que se precipitan a la superficie

terrestre con la lluvia (lluvia ácida) y ocasionan la muerte de los bosques y la acidificación de los lagos.

A nivel global las mayores alteraciones debidas a la actividad antropogénica están ocurriendo en los ciclos biogeoquímicos del H, C, N, O, P y S. Los problemas creados se derivan entre otros de deposición ácida, incremento en la atmósfera de CO₂, N₂O, CH₄; decrecimiento del O₃ estratosférico e incremento del O₃ troposférico (Turner y Walker, 1990).

A la hora de modelizar el clima planetario, se tiene el problema de que todos los fenómenos atmosféricos afectan en mayor o menor medida al clima del planeta, así como factores externos como la radiación solar, luego para desarrollar un buen modelo predictivo, este ha de tener escala planetaria. Otro gran problema es que solo conocemos un mundo como el nuestro, así que para validar esos modelos solo podemos tener en cuenta cambios climáticos pasados y combinar conocimientos de muy diversas áreas, como la meteorología, la astronomía, la geología, la paleontología o la biología (The Economist, 1994).

El uso de modelos es muy criticado desde fuera del ámbito científico (Le Treut, 1997) bajo la acusación de ser una mera abstracción de la realidad con mucha incertidumbre. Es cierto que la naturaleza caótica de estos modelos hace que en sí tengan una alta proporción de incertidumbre (Roe y Baker, 2007), pero no es óbice para que sean capaces de prever exitosamente fenómenos complejos (Shukla, 1998), ni para que sean la herramienta principal de cara a predecir cambios significativos futuros (Schnellhuber, 2008) que tengan consecuencias tanto económicas (Stern, 2008) como las ya observables a nivel biológico (Walther et al., 2002) (Hughes, 2001). De hecho, su principal limitante ha sido siempre la potencia de cálculo de las computadoras disponibles, mientras que el aparato físico-matemático en el que se basan no ha sufrido grandes alteraciones a lo largo de los años (Shukla, 1998).

1.7. La vida en el suelo

Las formas de la vida en el suelo que con más frecuencia apreciamos, son las plantas superiores, dentro de ellas gran interés pone el hombre en aquellas especies vegetales que se cultivan para obtener alimentos o fibras; sin embargo la biodiversidad del suelo es enorme y el crecimiento y desarrollo de las plantas está indisolublemente ligado a los organismos del suelo, por ello este conocimiento es necesario para lograr un adecuado manejo agrícola de los agrosistemas.

La biomasa en los suelos fértiles puede exceder 20 t.ha⁻¹ y el número de especies de algunos grupos incluye 30 000 bacterias, 1 500 000 hongos, 60 000 algas, 100 000 protozoos, 500 000 nemátodos, 3 000 lombrices de tierra. Los organismos del suelo varían en tamaño desde < 1 mm de diámetro, con un peso de < 10⁻¹² g para las pequeñas bacterias, hasta > 1 m de longitud y > 20 mm de diámetro, con un peso de 0,5 Kg para las mayores lombrices de tierra (Lee, 1994).

Con frecuencia es útil distinguir los efectos de los diferentes invertebrados basados en su tamaño, pudiendo diferenciarse en: 1-macroinvertebrados (> 5 mm); 2-meso invertebrados (0.5 - 5 mm), como ácaros y nemátodos; 3- micro invertebrados (< 0.5 mm), principalmente protozoos y nemátodos (Moldenke et al., 1994).

Entre los organismos del suelo, se establece una cadena alimentaria. Las bacterias sirven de alimento a muchos protozoos y nemátodos, mientras los hongos, son el mayor componente de la dieta de muchos artrópodos superiores que se incluyen en la

mesofauna, así como de las lombrices de tierra que son parte de la macrofauna (Lee, 1994)

Dentro de la macrofauna del suelo, las lombrices de tierra y las hormigas frecuentemente constituyen los organismos predominantes en varios ecosistemas.

Senapati et al. (1994) encontraron que el cociente termita/lombriz de tierra actúa como un buen indicador de la alteración del habitat en los sistemas agrícolas. Ese cociente muestra una relación negativa con el rendimiento del te ($r = -0.84^{**}$).

Relaciones como las anteriores deben ser cuidadosamente manejadas por el hombre, de forma tal que se creen condiciones de habitat en el suelo que favorezcan al organismo beneficioso y sean perjudiciales para el perjudicial.

La fauna del suelo es importante en los fenómenos de mineralización e inmovilización de nutrientes primarios tales como nitrógeno y fósforo y en la distribución y transformación de la materia orgánica en el suelo (Coleman, 1994).

Los hongos micorrizas incrementan el volumen del suelo que es explorado por el sistema radical de la planta de esta manera se favorece la absorción de agua y nutrientes. Dentro de los nutrientes es de destacar que el fósforo se presenta en concentraciones muy bajas en los suelos tropicales, por ello rápidamente se agota su contenido alrededor de la raíz en crecimiento y dado el extremadamente bajo grado de difusión de los iones del fósforo en el suelo, su reemplazamiento es lento, por ello el micelio del hongo micorriza que queda externo a la raíz colonizada, contribuye marcadamente a la nutrición fosfórica de las plantas.

La fijación biológica del nitrógeno (FBN) por la simbiosis entre las leguminosas y el *Rhizobium* ha sido considerada como el proceso fundamental por el cual el N_2 atmosférico es incorporado a los agroecosistemas, pero en el caso de las gramíneas estudios realizados desde hace ya varios años han demostrado que la FBN por microorganismos asociados a estas plantas puede alcanzar niveles similares e incluso superiores al de muchas asociaciones simbióticas entre el *Rhizobium* y las leguminosas. Desde hace muchos años se ha verificado en diversos cultivos y regiones en el mundo, que diferentes gramíneas mantienen rendimientos aceptables, sin necesidad de aplicación de fertilizantes nitrogenados, lo que se podría explicar a través de la FBN.

La gran importancia de los microorganismos de vida libre en la fijación del nitrógeno atmosférico, es tal que Lee (1994) afirma que ellos son responsables de la mayor parte del N_2 atmosférico fijado, ya que sólo unos pocos microorganismos viven en simbiosis con las plantas superiores.

El hombre para modificar favorablemente la población microbiana del suelo elabora los biofertilizantes, que se preparan en biofermentadores con bacterias fijadoras de nitrógeno y con microorganismos solubilizadores del fósforo del suelo, todos los cuales sintetizan también aminoácidos, vitaminas, citoquininas, auxinas, giberelinas y otras sustancias que actúan como estimuladoras del crecimiento vegetal. Estos productos se aplican a los cultivos no solo con el propósito de sustituir fertilizantes minerales, sino también de obtener otros efectos favorables para el rendimiento del cultivo y proteger el medio ambiente.

Grupos bacterianos presentes en la Rizosfera son capaces de solubilizar las formas insolubles de los compuestos fosfatados, mediante la producción de ácidos orgánicos, esto ha sido el fundamento para preparar biopreparados de bacterias fosfato-solubilizadoras que mejoran la disponibilidad del fósforo del suelo, y disminuye el uso

de fertilizantes fosfatados, los costos de producción del cultivo y favorecen el medio ambiente (Martínez y Martínez, 2001).

En resumen los organismos del suelo desempeñan cinco papeles importantes en la función de los ecosistemas: 1- simbióticos tales como rizobia y micorriza que incrementan la eficiencia en la asimilación de nutrimentos por las plantas; 2- en el ciclo de los nutrimentos, participan en los procesos de mineralización e inmovilización una gran variedad de bacterias, hongos y animales que viven en el suelo; 3- microorganismos que sintetizan y descomponen la materia orgánica; 4- el transporte y penetración de las partículas por la fauna del suelo y la agregación de partículas por hongos y bacterias, todo lo cual influye en la estructura y el régimen hídrico del suelo; 5- existe un gran número de plagas y organismos causantes de enfermedades que se mantienen en el suelo.

En 1930 el mundo submicroscópico se amplió con la aparición del *microscopio electrónico* cuya ventaja principal con respecto al *microscopio óptico* es un aumento de 1000 veces en la magnificación del material observado acompañado de una mayor capacidad de resolución generando una mejor definición y una ampliación del mundo microscópico. ADN, virus y pequeñas organelas fueron observadas por primera vez con este microscopio.

El conocimiento acumulado sobre los microorganismos ha sido posible por haber ampliado el hombre su campo visual gracias al descubrimiento del microscopio. Distintos tipos de células y componentes pueden ser vistos solo con el microscopio electrónico y no con el microscopio óptico (como las moléculas pequeñas y los virus), otras estructuras pueden ser vistas con los dos tipos de microscopios (célula animal, célula vegetal y bacterias) (Lanfranconi, s/a).

La utilización de los microorganismos por el hombre, abarca actualmente diferentes esferas de su actividad, cuantas especies aún desconocidas podrían ser de utilidad en un futuro si sobreviven a la amenaza humana, es aún una pregunta sin respuesta, pero la importancia de conservar la biodiversidad se puede ilustrar con algunas de las aplicaciones actuales de los microorganismos como son: controlar plagas y enfermedades, mejorar la nutrición de plantas y animales, producir bebidas alcohólicas y sanar suelos y agua contaminados con diferentes compuestos químicos, tales como hidrocarburos (petróleo) y pesticidas.

1.8. La agricultura sostenible

La biosfera es una fina envoltura de nuestro planeta, que engloba las zonas limítrofes de la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera; está ocupada por la sustancia viva, es decir por el conjunto de organismos que pueblan la Tierra (Vinogradov, 1981).

La biosfera representa para el hombre la fuente de recursos alimentarios, energéticos y de materias primas, pero en la actualidad la relación entre el hombre y el medio ambiente ha puesto de manifiesto alteraciones del equilibrio "Producción- Naturaleza", lo cual ha conducido a la contaminación del suelo, de la atmósfera y sobre todo de la hidrosfera del planeta.

A partir de la década del sesenta de nuestro siglo comenzaron a llegar noticias alarmantes de todas partes del planeta relativas a que importantes bienes de la naturaleza, entre ellos, el oxígeno del aire, la limpieza de las aguas dulces y del océano mundial, el régimen térmico de la tierra y la riqueza de la fauna se veían amenazadas y que la producción moderna se acercaba de manera total a la línea tras

la cual comienza la destrucción de las condiciones iniciales de la vida del hombre en "La Tierra" y que en algunas partes ya se atravesó esta línea(Novik,1982).

El comienzo de una crisis ecológica que es consecuencia de la actividad productiva del hombre y que puede poner en peligro su propia existencia precisamente a partir de la década del sesenta en que el avance de la ciencia y la técnica se evidenció por los vuelos al cosmos, obliga a recordar aquella afirmación de Engels: "No nos dejemos llevar del entusiasmo ante nuestras victorias sobre la naturaleza: Después de cada una de estas victorias, la naturaleza toma su venganza. Bien es verdad que las primeras consecuencias de estas victorias son las previstas por nosotros, pero en segundo y tercer lugar aparecen unas consecuencias muy distintas, imprevistas y que, a menudo, anulan las primeras".

Una victoria alcanzada por el hombre fue, el descubrimiento de insecticidas como el DDT que le permitieron controlar los insectos e incrementar la producción de las cosechas resistentes a los insecticidas, y estos productos no distinguen entre los insectos beneficiosos y los dañinos.

Por un proceso de selección genética, los insectos desarrollan familias resistentes a los productos químicos. Pero el problema más amplio, es el hecho de que nuestro ataque químico está debilitando las defensas inherentes al propio medio ambiente, defensas encargadas de mantener limitadas a varias especies. Cada vez que abrimos brecha en tales defensas, se cuele un chorro de insectos por ella (Carson, 1946).

Existen posibilidades de combatir plagas y enfermedades de forma menos agresiva sobre el medio ambiente, por ejemplo: El árbol del Nim no afecta a las arañas, mariposas e insectos tales como abejas (polinizan o fecundan cosechas o árboles), mariquitas (consumen pulgones) o avispa (actúan como parásitos sobre varias plagas de cultivos). Ello se debe, principalmente, a que los productos del Nim deben ser digeridos para ser efectivos. Así, perecen los insectos que se alimentan de los tejidos de las plantas, mientras que los que se alimentan del néctar o de otros insectos, raramente entran en contacto con concentraciones de productos del Nim. Según los datos toxicológicos que se reportan internacionalmente, la aplicación de los productos a base de Nim y la sustancia activa Azadirachtina, no conllevan riesgos mortales ni de salud al humano. No hay acumulación de los principios activos en la cadena alimenticia, ni de residuos en el suelo ni en los productos vegetales debido a su fácil degradación. Se ha comprobado que no afecta a la fauna benéfica. De emprender la entomología una lucha química contra los insectos mediante el empleo de productos químicos cada vez más tóxicos, el propio hombre sufriría las consecuencias, basta decir que en la actualidad la máxima contaminación del medio es causada por el vertimiento de numerosas combinaciones orgánicas que se usan para combatir insectos dañinos (Vinogradov,1981) y que en los últimos años, debido al creciente empleo de productos químicos, la agricultura se ha convertido en una gran elemento contaminante de la biosfera, pues los pesticidas y fertilizantes químicos van a parar al desagadero.

La agricultura convencional con la intensiva aplicación de insecticidas, fungicidas, nematicidas, herbicidas y fertilizantes químicos posee, como se ha mencionado anteriormente, consecuencias desfavorables para el medio ambiente, sin embargo, ella no representa la única posibilidad para la producción agrícola moderna pues otra opción es incrementar el empleo de la rotación de cultivo, abonos verdes, abonos orgánicos, cultivo mecánico, controles biológicos, biofertilizantes, etc.

Con el propósito de detener la acelerada degradación que ocasiona el hombre sobre el medio ambiente, han tomado fuerza en las últimas décadas diferentes enfoques o escuelas que proponen un manejo de los agrosistemas que no sea tan agresivo sobre el medio ambiente, los recursos naturales y la biodiversidad, tales son: la agricultura orgánica, la natural, la ecológica, la biodinámica y la sostenible.

La agricultura natural intenta imitar a la naturaleza en su forma espontánea, la biodinámica se fundamenta en que las plantas, al igual que otros seres vivos se ven marcados en su permanencia en la tierra por las influencias astrológicas, la orgánica y la ecológica consideran el empleo de abonos orgánicos, abonos verdes, operaciones de laboreo manuales y mecánicos, cubiertas vegetales, rotación y asociación de cultivos, controles biológicos y aplicación de preparados naturales contra plagas y enfermedades.

La agricultura sostenible, expresa Daly (1995), abarca tres aspectos que son:

- ◆ Sostenibilidad ecológica: cuando el ecosistema mantiene sus principales características que le son esenciales para su supervivencia a largo plazo
- ◆ Sostenibilidad económica: cuando la gestión adecuada de los recursos naturales permite que sea atractivo el continuar con el sistema económico vigente
- ◆ Sostenibilidad social: cuando los costos y beneficios son distribuidos tanto entre el total de la población actual (equidad intrageneracional) como entre la generación presente y las futuras (equidad intergeneracional)

La Declaración de Río de Medio Ambiente y Desarrollo, establece como primer principio que los seres humanos son el centro de interés para el desarrollo sostenible, para lo cual la protección ambiental debe constituir una parte integral del proceso de desarrollo y no una parte aislada de este.

La agricultura, para ajustarse a los principios de la Cumbre de Río debe mejorar o al menos conservar la fertilidad de los suelos, evitar la contaminación de la biosfera y minimizar el desgaste de los recursos naturales del planeta, pues hasta el presente la influencia de la agricultura sobre el medio ambiente ha sido negativa, lo cual se resume esquemáticamente en la Figura 1.3.



Figura 1.3. La agricultura intensiva y sus consecuencias sobre el entorno.

EL acelerado proceso de deforestación, de erosión, de pérdida de la fertilidad natural del suelo, la dependencia del agricultor hacia los insumos externos, especialmente sintéticos, la pérdida de la diversidad biológica etc. han aumentado la vulnerabilidad agrícola y han reducido la seguridad alimentaria.

Hace casi tres décadas Parr et al., (1983) señalaba que un gran número de científicos, ambientalistas, agricultores y gobernantes muestran una creciente alarma por el intensivo consumo energético requerido para la producción de alimentos y fibras que caracteriza la agricultura en los EE.UU., pues en los últimos 40 años la agricultura convencional se ha hecho cada vez más dependiente del petróleo que es la base para la síntesis química de fertilizantes y pesticidas.

1.9. La agricultura orgánica

En la agricultura orgánica se emplean abonos orgánicos, abonos verdes, operaciones de laboreo manual y mecánico, cubiertas vegetales rotación de cultivos, controles biológicos y preparados naturales contra plagas y enfermedades. Con ella se procura organizar el proceso productivo causando el mínimo daño posible al medio ambiente.

La producción de alimentos orgánicos ha tomado auge en los últimos años, sobre todo en Europa, Estados Unidos y Japón; por tanto los hábitos de consumo de estos productos han aumentado en estas regiones del mundo, lo cual hace que exista un creciente conocimiento de la población sobre la necesidad de la protección del medio ambiente y los beneficios que se derivan de la utilización de recursos renovables en lugar de los no renovables.

El desarrollo de la agricultura orgánica mundial y la toma de conciencia en materia de medio ambiente por la humanidad, unido a la creciente desconfianza de los consumidores a los alimentos convencionales han originado el crecimiento del

consumo de alimentos orgánicos; estos son los que mueven actualmente, la mayor cantidad de dinero en el mundo, en una tasa de alrededor de los 25 billones de dólares.

La tasa de crecimiento del mercado en Estados Unidos ha sido la más alta (23 % anual) en la última década. El 33 % de los consumidores de este país compran productos orgánicos y el 42 % de los detallistas los comercializan (Soto, 2000).

Para que un producto sea acreditado como orgánico, por un inspector registrado tiene que haber sido producido según ciertas normas, las cuales son fijadas por organizaciones, cuyo papel es asegurar que la naturaleza del producto se mantiene.

1.10. La agricultura biodinámica

El método más antiguo de agricultura ecológica, orgánica o biológica es el sistema biodinámico, que comenzó a desarrollarse en Alemania. En 1924 Rudolf Steiner impartió en la finca Koberwitz una serie de conferencias sobre el tema. De las conferencias que Steiner impartió existe un libro que se llama: "Curso en agricultura biodinámica". El sistema biodinámico ve la tierra como un organismo vivo, en el cual influyen directamente los efectos de las fuerzas cósmicas, en particular la luna. La agricultura biodinámica se basa en la "Antroposofía", una filosofía holística desarrollada por el multita lento austriaco Rudolf Steiner y abarca la influencia del cosmos en plantas y animales, al igual orientaciones para la relación del ser humano con la naturaleza. Según la concepción biodinámica, una granja es un organismo vivo que refleja la gran complejidad de la naturaleza, se compone en su forma ideal, de praderas, campos de cultivo, huertos, árboles frutales, lagunas, ríos y bosques (Anliker,2010).

1.11.La agricultura ante la crisis energética mundial

El actual calentamiento del planeta es originado por la contaminación de fábricas, industrias y principalmente, por los gases de vehículos automotores que consumen combustibles fósiles (petróleo) lo que provocara un clima caótico con graves sequías, olas intensas de calor, lluvias, ciclones, huracanes y el crecimiento del nivel del mar en al menos un metro para el 2100 por el acelerado deshielo de la Antártica. Dada la importancia global de este problema fue firmado en Kyoto, Japón, en 1997, un protocolo que fue puesto en vigor el 16 de febrero de 2005, aunque se han negado a unirse a este compromiso, con el argumento de que le costaría miles de empleos y frenaría el desarrollo de los países que lo asumieran, Estados Unidos, el mayor contaminador a nivel global, con 25% del total de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), seguido de China, Japón, India, Corea del Sur y Australia.

Durante los años de 1890-1905 Mercedes Benz, Ford, Peugeot, Renault y otros muchos experimentaron con el etanol para su uso en motores de combustión interna. Cuando Henry Ford hizo el diseño de su automóvil Modelo T, en 1908, esperaba que el combustible fuera el etanol, fabricado a partir de fuentes renovables. De 1920 a 1924, la Standard Oil Company comercializó un 25% de etanol en la gasolina vendida en el área de Baltimore, pero los altos precios del maíz combinados con dificultades de almacenamiento y transporte hicieron concluir el proyecto. En los años 40 los bajos precios del petróleo llevaron al cierre de la planta de etanol, quebrando el negocio de

los maiceros americanos, pues el etanol a partir de maíz (gasohol) fue reemplazado por gasolina.

En Europa se ha estimado que el 80% de la contaminación atmosférica se debe a la combustión de carburantes fósiles y a que el 50% lo aportan vehículos motorizados y máquinas industriales. En Latinoamérica la contaminación ya ha alcanzado límites peligrosos para la salud y el ambiente, sin embargo el uso de combustibles más limpios ofrecen una solución atractiva para este problema ambiental, como es el caso del Etanol, Metanol, Biodiesel y otros.

Se calcula que las reservas mundiales de petróleo durarían aproximadamente 40 años. De allí que surge con vigor la alternativa a los combustibles derivados del petróleo; el **"Etanol"**, alcohol de origen vegetal que se puede mezclar con otro combustible como la gasolina y constituye una nueva fuente energética limpia y renovable, producida para proteger el medio ambiente de la contaminación generada por los combustibles fósiles.

El etanol, se puede producir de la caña de azúcar, melaza, sorgo dulce, maíz, trigo, cebada, yuca, camote, papa, malanga, madera, de algunos desechos urbanos y de residuos agrícolas. La caña de azúcar es una de las materias primas más atractivas de biomasa, dado que los azúcares que contiene se encuentran en una forma simple de carbohidratos fermentables, y se genera el bagazo que se usa como combustible en la producción de etanol. El etanol se mezcla con gasolina para formar una mezcla (10% de etanol y 90% de gasolina) pero puede ser usado en concentraciones mayores o en su forma pura. El carburador del vehículo requiere de un convertidor de gasolina a etanol.

En Brasil la crisis del petróleo del año 1975 propició el proyecto del etanol. Esta nueva industria ha permitido hasta el año 2000 la creación de un millón de puestos de trabajo, con la operación de más de 700 destilerías, instalaciones complementarias, estaciones de servicio, redes de transporte, diseño, fabricación de motores específicos para estos combustibles, etc., y en el año 2006 esperan producir 17.5 millones de m³ de etanol.

El Etanol Anhidro tiene un octanaje de 115 a 120 y es miscible en un 100% con la gasolina y usado en proporciones de hasta un 10%, los motores no necesitan modificación alguna y además no necesariamente se puede usar solo en vehículos nuevos, sino en aquellos que tengan 10 años funcionando por tener sus partes acopladas. El octanaje del Etanol es alto y constante y por su buena miscibilidad con la gasolina el Etanol ha sido usado como elevador de octanaje con grandes resultados. Como se mezclan frecuentemente con la gasolina NAFTAS de alto octano para mejorar el octanaje, la utilización de Alcohol Carburante (Alcohol Anhidro) en sustitución de estas es de importancia económica.

En Brasil existen los vehículos FLEX que son aquellos que pueden usar ambos tipos de combustibles, dejando la opción al consumidor de poder comprar de acuerdo al mejor precio que estén los combustibles.

El Biodiesel es una mezcla de los ésteres metílicos de los ácidos grasos triglicéridos de los aceites vegetales y/o grasas animales, es un combustible sustituto del diesel que se produce a partir de aceites como el ricino, grasas animales, metanol y de residuos de la agricultura. Posee las mismas propiedades del diesel y puede ser mezclado en cualquier proporción con el diesel obtenido de la refinación del petróleo. No es necesario efectuar ninguna modificación en los motores para usarlo. Actualmente importantes fabricantes de vehículos europeos han sacado sus modelos

con este combustible, y se tienen ya en el mercado automóviles, camiones, autobuses, tractores agrícolas, maquinaria pesada, industrial y de guerra, barcos, etc. Los biocombustibles constituyen una alternativa más ante la crisis energética que se avecina con el agotamiento de las reservas de petróleo, pero el empleo de determinados cultivos alimenticios con el propósito de atenuar la crisis energética, no deberá conducir a una mayor escasez y precios de los alimentos, pues el hambre es un grave problema de la humanidad, en particular en los países más pobres.

El reemplazo de cierta cantidad de combustibles fósiles por el uso de biocarburantes resolvería parte del problema de escasez de fuentes energéticas y de dependencia de las mismas (Russi, 2007). En términos sociales, la Comisaría de Agricultura y Desarrollo Rural de la UE señalaba: “las materias primas para la producción de biocarburantes proporcionan también en potencia una nueva salida para los agricultores europeos, permitiendo ahora convertirse en verdaderos empresarios”.

Bibliografía Consultada

Agarwal, A.: Hacia un tipo distinto de desarrollo. Proteger el entorno para lograr un crecimiento acelerado. En: El mundo en la encrucijada. El correo de la UNESCO. Agosto-Septiembre/1982:23-26pp.

Anliker, W.: Astrología vs. Ciencia. México. Astro Walter_Com.Walter Agricultura Biodinámica.mht. 2010.

Arzola, N.; Machado, J.; Hernández, L.B.: Comparación de la zeolita cargada y sin cargar con fertilizante nitrogenado mineral. Comisión 4:Agricultura.A-32.ZEOLITES 91.Program-Abstract.3rd.International Conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites.Havana, 1991 a

Arzola, N.; Machado, J.; Vázquez, A.: Selección de la granulometría y carga de la zeolita para uso agrícola Comisión 4:Agricultura.A-33.ZEOLITES 91.Program-Abstract.3rd.International Conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites.Havana, 1991 b

Barrios, E.: Calidad de recursos orgánicos, descomposición, disponibilidad de nutrientes y respuesta de los cultivos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Berná, J.M.; Monzó, J.: Patata en la región de Murcia (II) Fertilización y patología vegetal agrícola Vergel. Año XVIII.N^o 205(1999):28-34.

Bingham, F.T.; Davis, S.; Shade, E.: Water relations, salt balance, and nitrate leaching losses of a 960-acre citrus watershed. Soil Sci.112 (1971):410-418pp.

Borlaug, N.E.: Keynote Lecture. 15th World Congress of Soil Science. Supplement to transactions. Acapulco, México, 1994.

Borlaug, N.E.: Feeding a human population that increasingly crowds a fragile planet. In: J.D. Echevers (Ed), Proceedings of the 15th World Congress of Soil Science,

Volume 1, México, July 10-16, 1994. Published by the International Society of Soil Science and the Mexican Soil Science Society .México, 1994.

Bragagnolo, N.:Manual integrado de prácticas conservacionistas. CGP/RLA/JPN. Documento de campo 10. FAO. Santiago de Chile, 1995: 128 pp.

Buckman, H.; Brady, N.: Naturaleza y propiedades de los suelos. Edición Revolucionaria. La Habana, 1967.590pp.

Carson, R.: Primavera Silenciosa. Primera Edición. Editorial Luís de Carralt. Barcelona, 1946: 246pp.

Cassman, K.G.: The role of soil fertility research in developing sustainable food production systems. Better crops with Plant Food 74 (4) (1990): 16-19pp.

Coleman, D.: Soil function changes resulting from faunal alterations 15th World Congress of soil science. Acapulco. Vol. 4a (1994): 63-75pp.

Daly, H.: Significado, conceptualización y procedimientos operativos del desarrollo Sostenible y posibilidades de aplicación en la agricultura. En: Cadenas, A.: Agricultura y desarrollo sostenible. Madrid, 1995: 387 – 398 pp.

Ellies, A.; Grez, R.; Ramírez, C.: Potencial de humectación y estabilidad estructural de suelos sometido a diferentes manejos. Agricultura Técnica Vol. 55 (3-4) (1996 B):220-225.

Energy Information Administration: International Energy Outlook, 1998.

Fernández, María: La contaminación por nitratos. *Hortoinformación* (71) (1996):38-40pp.

Fujita, T.; Yasuhara, M.: Controlled release nitrogen fertilizer, new coated urea (meister or Ip-coat).Commission IV.14th International Congress of Soil Science.Kyoto. Vol. IV (1990):607-608pp.

García Roche, M.: M. Grillo: Límites de residuos permisibles de nitratos en productos vegetales de Cuba. *Revista CNIC Ciencias Biológicas* 22(1991) (1-2):95-97pp.

Haifa, T.: Sophisticated fertilizers and application methods for increasing use efficiency and reducing pollution. Commission IV.14th International Congress of Soil Science, Kyoto. Vol IV (1990): 561-562 pp.

Hughes, Lesley: «Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? » (In English). Trends in Ecology and Evolution 15 (2) (2001): 56-61pp

IPCC:Climate Change 2007: The Physical Science Basis- “Summary for Policymakers” 2007, p 9, section: “A Pale climatic Perspective” (acceded feb 2010).

IPCC: Cambio climático 2007: Informe de síntesis 2007, (accedido Feb 2010) emisiones de gases de efecto invernadero.

INPOFOS: Diagnóstico del estado nutricional de los cultivos. Ind. Grafica Screen. Quito. Ecuador, 1993:55pp.

Jung, J.: Factors determining the Reaching of nitrogen from soil, including some aspect of maintenance of water quality. Effects of intensive fertilizer use on the human environment. FAO SOILS BULLETIN. Rome, 1972: 87-107pp.

Kemmler, G.; Joly, C.; van den Bergen, T.T.: Response of food crops to fertilizer application in farmers fields, evaluation of results from the FAO fertilizer programme 1961-1986. Commission IV .14th International Congress of Soil Science. Kyoto, Vol IV (1990):572-573.

Krutzen, J.; Andrae, M: Biomass Burning in the tropics. Impact in Atmosphere Chemistry and Biochemical Cycles, Sciences 250 (1990): 1669-1678pp.

Lanfranconi, M.: Historia de la microscopia. Universidad Nacional de Mar del Plata.s/a: 49pp.

Le Treut, Hervé: «Clima, por qué los modelos no están equivocados», Mundo Científico (181) (1997)662-667pp.

Lee, K.E.: The functional significance of Biodiversity in soils. 15th World Congress of Soil Science. Volume 4a. Acapulco, 1994: 168-181pp.

Martínez, A.; Martínez, M. (2001): Efecto de bacterias solubilizadoras de fosfatos durante el periodo de enraizamiento de la caña de azúcar (*saccharum officinarum*). var. Venezuela 5171. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba, 2001.

Matichenkov V.V.: Role of mobile silicon compounds in the soil-plant system. Doctoral Dis.Dr. of Biological Sciences.Pushchino, 2008:314pp.

Matichenkov V.V.; Bocharnikova E.A.: The prospective Si fertilization for palm oil plantation. Proceedings of Agriculture, biotechnology & sustainability Conference. Volume 2.Malasysian Palm Oil Board.PIPOC, 2009:535-539pp.

McHargue, J.S.; Peter, A.M.: The removal of mineral plant- food by natural drainage waters. Kentucky Agr. Exp. Sta. Bull. 237, 1921. -Moescler, P.: El hombre, cáncer de la biosfera. En: Salvat, J.: Enciclopedia Salvat de la salud y medio ambiente. Salvat S.A. de Ediciones. Navarra. Tomo 4 (1985) 30-39 pp.

Mejía, S.; Cadavid, L.; El-Sharkawy, M.: Respuesta de la yuca al déficit de agua y fertilización .Suelos ecuatoriales 24(1994)23-28pp.

Moldenke, A.R.; Baumeister, N.; Estrada-Venegas, E.; Wernz, J.: Linkages between soil biodiversity and above ground plant performance. 15th World Congress of soil science. Acapulco, Vol 4 a (1994): 186-204pp.

Novic, I.: Sociedad y Naturaleza. Editorial Progreso. Moscú, 1982:207pp.

Olson, R.A.: Effects of intensive fertilizer use on the human environment. FAO Soils Bulletin. Roma, 1972: 15- 23pp.

Parr, J.F.; Papendick, R.I.; Youngberg, I.G.: Organic farming in the United States: principles and perspectives. *Agro-Ecosystems*, 8(1983)183-201pp.

Puerto A.; García, J.A.: La contaminación atmosférica. Temas monográficos. Europa artes gráficos S.A. Salamanca, 1987: 61pp.

Rivero, C.; Paolini, J.: Characterization of organic matter of three Venezuelan soils. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México Vol 3b (1994)77- 78 pp.

Russi, D.: Social Multi-Criteria Evaluation and Renewable Energy Policies. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Cerdanyola, España, 2007

Sánchez, P. A.: Tropical Soil Fertility Research: Towards the Second Paradigm 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, Vol. 1(1994) 65 - 88 pp.

Schnellhuber, Hans Joachim: «Global warming: Stop worrying, start panicking?». *PNAS* 105 (38) (2008):14239-14240, doi:10.1073/pnas.0807331105, ISSN 0027-8424

Senapati, B.K.; Panigrahi, P.K.; Lavelle, P.: Macrofaunal status and restoration strategy in degraded soil under intensive tea cultivation in India. 15th World Congress of soil science. Acapulco, Vol. 4a (1994) 64-75 pp.

Shukla, J. :«Predictability in the Midst of Chaos: A Scientific Basis for Climate Forecasting» *Science* 282 (5389):728-731, doi:10.1126/science.282.5389.728, ISSN 1095-9203, http://ptolemy.gmu.edu/~beall/data/chaos_papers/shukla-1998-science-v282.pdf

Sydney G.H.; Matichenko, V.V.; Datnoff, L.E.: Silicon. In: Handbook of Plant Nutrition, Massachussetts University, 2006.551-568pp.

Sobrepera, R.; López, D.; Arzola, N.; Morales, M.C.; López, T.; Sánchez, M.C.; Bravo T.; Lau, Y.; Maya, H.: Carga de zeolita con soluciones nitrogenadas para su uso en la agricultura como fertilizante de liberación lenta. Comisión 4 :Agricultura. A-41. ZEOLITES 91. Program-Abstract. 3rd. International Conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites. Havana, 1991

Sombroek, W.G.: Suelos en una tierra más caliente: cambios en América Latina. Memorias del XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo. La Habana, Vol. V. (1990): 1251-1266 pp.

Soto, G.: Historia del Movimiento Orgánico Mundial y Movimiento Orgánico en Centro América. Taller de Comercialización de Productos Orgánicos en Centro América, IICA, Costa Rica, 2000: 1- 6 pp.

Stewart, B.A.; Viets, F.G.Jr.; Hutchinson, O.L.; Kemper, W.D.: Nitrate and other water pollutants under fields and feedlots. *Environ* (1967)736-739pp.

Stern, Nicholas: «The Economics of Climate Change» (in English), *American Economic Review* 98 (2) (2008):1-37.http://www.bioenergy-World.com/americas/2006/IMG/pdf/stern_summary___what_is_the_economics_of_climate_change.pdf

The Economist: «A problem as big as a planet (global-change science) » (in English), *The Economist* (5 Nov 1994) 83-85pp.

Thomas, G.W.: Soil and climatic factors which affect nutrient mobility. In: *Nutrient Mobility in Soils: Accumulation*. Sci. Tech. 1, O.P. Engelstad, Ed. Soil Sci. of Amer. Inc., Madison, Wis, U.S.A.,1970.

Turner, S.J.; Walker, B.H.: *The Land-Atmosphere Interface*. Global Change. Report No.10. Printed by graphic System AB. Stockholm, 1990: 39pp.

Vinogradov, A.: El progreso técnico y la protección de la biosfera. En: *La sociedad y el medio ambiente*. Editorial Progreso. Moscú, 1981:32-44pp.

Voisin, A.: *Nuevas leyes científicas en la aplicación de los abonos*. Editorial Tecnos, S.A.Madrid, 1966:150 pp.

Walther, Gian-Reto; Post, E.; Convey, P.: «Ecological responses to recent climate change» (in English), *Nature* 416 (6879): 389-395pp. <http://eebweb.arizona.edu/courses/Ecol206/Walther%20et%20al%20Nature%202002.pdf>.

Woomer, P.L.: Modeling biotic and soil organic matter dynamics in shifting cultivation systems. 15th World Congress of Soil Science. Volume 4a. Acapulco, 1994: 59-60 pp.

“El organismo (animal o humano) es la fotografía bioquímica del medio en que vive; más particularmente del suelo que ha producido los alimentos de este organismo”

André Voisin

CAPITULO 2.EL ESTUDIO DE LOS SUELOS, SU CARTOGRAFÍA Y FACTORES LIMITANTES. USO, MEJORAMIENTO Y CONSERVACIÓN

2.1. CLASIFICACIÓN DE SUELOS.

Según Hernández y col. (2006) la clasificación de suelos constituye un tema de análisis y discusión de actualidad tanto en el contexto nacional como en el internacional, debido a que cada país aplica un sistema de clasificación que responda a sus intereses y características, donde no debe obviarse las características propias de los suelos y las condiciones histórico – naturales de cada zona o región, lo cual demanda un buen nivel de conocimientos y dominio de las bases de la clasificación de suelos a emplear (unidades taxonómicas y la nomenclatura).

Se considera que el VII Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo celebrado en Wisconsin, E.E.U.U. en 1960, constituyó el llamado “Congreso del Cambio”, con la presentación de la 7^{ma} Aproximación Americana, a pesar de que la Conferencia Internacional de Clasificación de Suelos, celebrada en Alma Atá (antigua URSS) en 1988, marcó un hito en materia de clasificación de suelos debido a que:

1. Se presentan por primera vez se presentaron algunas versiones de clasificación genética de los suelos que tomados en consideración horizontes y características de diagnóstico (clasificaciones de suelos de: URSS, China, Francia y FAO-UNESCO)
2. Existe consenso general entre las distintas escuelas de clasificación de suelos para preparar una Base Referencial de Suelos del Mundo.

En Cuba, la clasificación de suelos tuvo inicialmente su desarrollo siguiendo la línea de la clasificación de series y familias de suelos; en los años 60, se desarrolló la clasificación genética, sobre la cual se hicieron algunas versiones y a partir de los años 90, pedólogos del Instituto de Suelos incorporaron criterios de horizontes y características de diagnóstico en la clasificación de los suelos de Cuba.

2.1.1. EVOLUCIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN CUBA.

Esta evolución consta de tres etapas:

- Etapa colonial en Cuba (hasta 1902)
- Etapa de la Seudo- República (1902-1959)
- Etapa después del triunfo de la Revolución (1959-2006)

- **Etapas colonial en Cuba (hasta 1902)**

Según los estudios de Martínez Viera (1968) la cronología de los estudios de suelos en esta etapa se comportó de la forma siguiente:

- 1797- Antonio Morejón Gato presenta ante la Real Sociedad Económica de Amigos del País, el primer informe sobre los suelos de Cuba relacionado con “las buenas propiedades de la tierra bermeja para el cultivo de la caña de azúcar, sobre su excelencia con respecto a la negra”.
- 1842- Mariano Carrillo, explicó ante la misma sociedad sus “reflexiones acerca de la naturaleza del terreno de las Antillas”.
- 1850- en los Anales y memorias de la Real Junta de Fomento, aparece el informe sobre “Memorias sobre caña de azúcar y los diversos terrenos adecuados a ella”.
- 1855- Ramón de la Sagra realizó 16 análisis de los suelos cubanos.
- 1864- Manuel Fernández de Castro presentó lo que pudiera considerarse el primer estudio genético de los suelos de Cuba (en el trabajo “Sobre la formación de la tierra colorada, que constituye gran parte de los terrenos de cultivo de la Isla de Cuba”.
- 1872- Jules Lachaume en su informe “Fisiología de la Isla de Cuba”, escribe sobre los abonos, aconsejando su aplicación a cada variedad vegetal y discutiendo problemas de economía agrícola, política e industrial de las tierras.
- 1880- Edgar Carbonne publica un trabajo sobre los abonos producidos en los ingenios de Cuba y su valor correspondiente.
- 1881- Máximo Zandoya hace un estudio sobre el guano de murciélago en el cual expone su historia, caracteres y composición química y demuestra su superioridad como abono para la restauración de las tierras.
- 1884- Francisco Javier Balmaseda en su trabajo “Tesoro del agricultor cubano “ aboga porque la labor de la tierra cubana se realice con carácter científico y se creen las estaciones agronómicas al estilo de Inglaterra.
- 1884- Gabriel de Castro Palomino escribe en la Revista de Agricultura sobre el agotamiento del suelo por el cultivo.
- 1888- Luis Engel (agronomo austríaco residente en La Habana) presenta en la Revista de Agricultura una cantidad de resultados de análisis de suelos de tabaco y caña.

Como se aprecia en esta etapa la mayoría de los estudios realizados en Cuba se encuentran enfocados hacia los problemas de fertilidad de los suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar, sin embargo, ya internacionalmente se concedía importancia primordial a los estudios de Fisiología Vegetal y Química Agrícola, en ambos contextos aún no se aprecian de forma significativa estudios acerca de la génesis, clasificación y cartografía de suelos, los cuales comienzan a desarrollarse en el Siglo XIX en la antigua URSS por el científico ruso V.V. Dokuchaev.

- **Etapas de la Seudo- República (1902-1959)**

1912 – Gastón Alonso Cuadrado realizó el estudio sobre la tierra colorada y la tierra negra.

1913 - Mario Sánchez Roig realizó el estudio “Los suelos de la Isla de Pinos”.

Ambos estudios presentan criterios regionales sin tener en consideración al territorio nacional.

1916- Crawley realizó el primer intento de clasificación de suelos de Cuba con su trabajo “Las tierras de Cuba “ el que refleja la clasificación de los suelos por su composición mecánica (tierras arcillosas, arenosas y loams) por el color del suelo terrenos colorados, pardos, mulatos y negros) así como, consideró otras características como tierras calcáreas- pedregosas y tierras de sabanas)

1920- los doctores Bennett y Allison, realizaron un estudio de los suelos relacionados principalmente con el cultivo de la caña de azúcar, donde establecieron una clasificación de suelos sobre la base del sistema norteamericano de series y familias. Los resultados de estos estudios culminaron con la publicación del libro The Soils of Cuba y de un mapa a escala 1: 800 000 de los suelos de Cuba.

1932- Dr. Bennett regresó a Cuba y prosiguió los estudios de suelos publicando el libro Some New Cubans Soils, en el cual describió y clasificó nuevas series de suelos (17 nuevas series) así como, nuevos tipos y fases de varias series de suelos estudiadas.

1927-1928- Dr. Bennett preparó otros estudios sobre los suelos de Cuba como The Important Types of Cuban Soil Profiles y el Some Geographic Aspects of Cuban Soils.

1931- A- Bonazzi registró “La materia orgánica en los terrenos de Cuba”

1936- Estudios y observaciones sobre la fertilidad de los suelos

Las series de suelos de Cuba descritas por Bennett y Allison en 1928, fueron diagnosticadas siguiendo índices morfológicos como el color, la textura, concrecionamiento, compactación, entre otros, presentes en los suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar.

Los suelos se nombraron de acuerdo con el lugar donde eran observados por primera vez (Matanzas, Camagüey, La Habana, Oriente, Palma, San Cristóbal, entre otros) y en otros casos heredaron nombres de series de suelos ya existentes en los E.E.U.U. como Norfolk, Orangeburg, Greenville, Ruston y otros, estas series fueron agrupadas en familias y se confeccionó el mapa de suelos a escala 1: 800 000, el cual constituyó la base principal de la agricultura cubana.

Con el triunfo de la Revolución cubana el 1ero de enero de 1959, se produce una transformación del uso monocultivista en el país. La necesidad de una mayor utilización de los recursos naturales condiciona el apoyo del gobierno revolucionario hacia los estudios de suelos.

Lo anterior quedó materializado desde 1964, fecha en la que científicos rusos como I. Stepanov (1964) clasifica por primera vez a los suelos de Cuba con base genética por

los principios de la escuela soviética. Otros investigadores como S.V. Zonn y colaboradores (1966) realizan un experimento de construcción de la clasificación genética de los suelos de Cuba. En 1972, I.P. Guerasimov preparó un ensayo del enfoque genético de las clasificaciones de los suelos tropicales, cortezas de interperismo y productos de su redeposición.

En 1965, se fundó el Instituto de Suelos de la Academia de Ciencias de Cuba, el cual comienza el estudio científico de los suelos basado en los principios genéticos de formación. En estudios posteriores desarrollados por los investigadores cubanos del Instituto de Suelos de Cuba como Hernández y col. (1977) permitieron la publicación de los primeros estudios en una clasificación genética de la antigua provincia de Las Villas, en 1971, se publica el Mapa Genético de los Suelos de Cuba a escala 1:250 000 sobre la base de un levantamiento del país realizado en el período 1965 a 1968, a escala 1: 25 000 , con la colaboración técnica de especialistas de los países del antiguo campo socialista, fundamentalmente provenientes de la República Popular China, la URSS y se considera la primera versión de la clasificación genética de los Suelos de Cuba, cuyos principios y características son publicados en 1973 en el libro "Génesis y clasificación de los suelos de Cuba".

En 1975, se realizó el segundo intento de clasificación genética de los suelos en colaboración con especialistas de la antigua URSS, sistema de clasificación que es aprobado en el I Congreso del Partido Comunista de Cuba, como la taxonomía básica de clasificación de los suelos de Cuba. Esta clasificación se aplicó en el Mapa Nacional de Suelos desarrollado en todo el país a escala 1:25 000, terminado en 1990 por el Centro Nacional de Suelos y Fertilizantes (CNSF) del MINAGRI.

En esta clasificación se realizaron cambios profundos, tanto en la taxonomía como en la nomenclatura, en ella la concepción de que la clasificación de los suelos debe estar fundamentada en la génesis de los mismos, además se adoptaron unidades semejantes al sistema soviético, utilizadas en Cuba por Zon et al. (1966) y Shishov (1968): Tipo, Subtipo, Género, Especie y Variedad, También se utilizó la unidad Agrupamiento de suelos, que en parte coincide con los Grandes Grupos de la Iera versión de la Clasificación.

Las bases para establecer estas unidades fueron las mismas que las seguidas por las clasificaciones soviéticas, en cuanto a la nomenclatura también cambió. En esta nueva versión se separaron 10 Agrupamientos y 28 Tipos Genéticos de suelos, dicha clasificación se presentó más terminada donde se muestran unidades inferiores que toman en consideración aquellas propiedades de los suelos que tienen relación con el uso agrícola de los suelos. La II Clasificación Genética de los Suelos de Cuba contribuyó a erradicar una serie de problemas existentes en el país como la dualidad en materia de clasificación de suelos, identificar parámetros que inciden de forma directa en la evaluación agroproductiva de los suelos, por lo que se plantea que esta clasificación responde a los intereses de la agricultura del país y puede ser asimilada y de fácil utilización por los ingenieros y especialistas de la producción.

La II Clasificación de los suelos de Cuba, representó un logro de la ciencia cubana, sobretodo por su aplicación como sistema en todo el país en diferentes ramas que tienen que ver con el sector agropecuario y por la independencia que alcanzaron los pedólogos cubanos.

En 1980 se publicó el tercer intento de clasificación genética de los suelos, donde no se introducen cambios profundos con respecto a la II Clasificación, sino que se trató de argumentar y profundizar más en la explicación de las taxas superiores de

clasificación, agrupamiento, tipo y subtipos de suelos. No obstante, se introducen algunos nuevos trabajos de suelos que enriquecieron la clasificación genética.

En 1988, se realizó un Esquema de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, por grupos y tipos genéticos, que fue presentado por Hernández, A.; Ascanio, O.; Camacho, E. y Pérez Jiménez, J.M., en la Conferencia Internacional de Clasificación de Suelos efectuada en Alma Atá.

Esta nueva versión a pesar de resultar un enriquecimiento de la II Clasificación, no tuvo el mismo nivel de introducción, ya que no se aplicó en la cartografía de suelos, por eso su aplicación fue principalmente docente e investigativa.

2.2. DIFERENTES TIPOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

El suelo es un cuerpo natural de materiales minerales y orgánicos que se forman como resultado de muchos factores y la acción de muchos procesos. Una combinación de fuerzas físicas, químicas y bióticas actúa sobre los fragmentos de roca y la materia orgánica hasta producir el suelo que presenta espacios porosos donde se almacena aire y agua.

La dimensión vertical, expuesta por excavación desde la superficie hasta el material que dio origen o en que se sustenta el suelo, constituye el perfil de suelo. Las capas u horizontes de suelo, que se distinguen sobre la base del color, textura, estructura, y otras propiedades visibles, son nombradas horizontes, y el conjunto de estos horizontes conforman el perfil de suelo.

En la clasificación de los suelos se emplean horizontes diagnósticos, los cuales se utilizan para clasificar diferentes niveles taxonómicos. Se distinguen dos tipos de horizontes: los principales y los normales.

Los horizontes principales son el reflejo de la interrelación de las condiciones de formación de los suelos, que dan lugar a procesos de formación y cuyas características se manifiestan en la morfología del perfil. De esta forma, el horizonte diagnóstico es la expresión o producto final de las transformaciones y traslocaciones de las sustancias orgánicas y minerales (procesos de formación) que ocurren bajo diferentes condiciones (factores de formación); en otras palabras, es el reflejo de la génesis y evolución del suelo.

El horizonte principal se utiliza en la mayoría de los casos para definir el agrupamiento de suelos y se define con el horizonte B del perfil del suelo, aunque también puede ubicarse en el horizonte A (capa arable) del suelo como en los suelos Húmicos Sialíticos o en Histosoles, o puede no estar presente como en los Fluvisoles o en los suelos Poco Evolucionados.

Los horizontes normales de diagnósticos se definen como horizontes que representan un grupo de propiedades del suelo que pueden ser explicadas cuantitativamente y que se utilizan para diferenciar tipos y subtipos de suelos. En ocasiones estos horizontes pueden ser remplazados por características de suelos que se definen cuantitativamente, las cuales son denominadas como características de diagnóstico.

En correspondencia con lo antes referido es que se plantea que con estas categorías y conceptos, los suelos se clasifican sobre la base de horizontes y características de diagnósticos, en relación con su génesis y evolución, lo que además de seguir los principios fundamentales de nuestra Escuela Genética, consigue introducir la línea objetiva de clasificación de suelos que ha tomado una aceptación mundial en los últimos 20 años.

En total se han definido 12 horizontes principales:

1. Alítico
2. Ferrítico
3. Ferralítico
4. Ferrálico
5. Fersiálico
6. Siálico
7. Humificado
8. Vértico
9. Sálico
10. Nátrico
11. Hístico
12. Antrópico

En tanto, se están trabajando 14 horizontes normales, atribuibles tanto al horizonte A como al B, los cuales son:

1. Álbico
2. Argílico
3. Cálcico
4. Compactado
5. Hidratado
6. Hístico fibrico
7. Hístico sáprico
8. Hístico mésico
9. Húmico saturado
10. Húmico desaturado
11. Mullido
12. Nodular ferruginoso
13. Ócrico
14. Petroférrico

Como características de diagnóstico se han identificado:

1. Contacto lítico
2. Contacto paralítico
3. Características de color amarillo
4. Características de color rojo
5. Propiedades gléyicas
6. Propiedades de gleyzación suave (gleyzoso)
7. Propiedades vérticas
8. Propiedades salinas
9. Materiales sulfídicos
10. Materiales sulfáticos
11. Cambio textural abrupto
12. Sedimento arenosos
13. Características arénicas
14. Propiedades sódicas
15. Con contenido variable de carbonatos
16. Sin carbonatos

En Europa y América del Norte consideraron el clima predominante en la formación de la tierra. De acuerdo a ello existía una relación entre las zonas climáticas y los cinturones anchos de tierras, lo que inspiró el concepto zonal de tierras

Las tierras zonales son aquéllos en que el factor climático, ha actuando un periodo suficiente de tiempo, que opaca la influencia de cualquier otro factor. Las tierras Intrazonales son aquéllos en que alguna anomalía local, resulto lo suficientemente fuerte como para modificar la influencia del clima regional. Azonal o tierras inmaduras son aquellas en que se han diferenciado los perfiles pobremente, debido a su juventud, por la influencia del material de origen o el ambiente ha limitado su desarrollo.

En las tierras zonales se establecen dos grupos (Pedocals) donde se ha acumulado carbonato de calcio, ocurre en zonas frías y Pedalfers donde se ha acumulado hierro y aluminio, lo que sucede en los trópicos.

La tierra intrazonal incluye los suelos halomórficos, de regiones áridas, donde se han acumulado sales en la solución del suelo o sodio cambiante, los suelos hidromórficos, que son pantanosos, con problemas de drenaje y los suelos calcáreos donde se ha acumulado carbonato de calcio.

En las tierras azonales no existe división. Este concepto de zonalidad no es muy útil en el caso del trópico y subtrópico, donde la superficie de la tierra es generalmente más antigua que en Europa y donde otros factores han actuado con fuerza.

La acción de los factores de formación conduce al desarrollo de diferentes perfiles o tipos de suelos. La clasificación de estos puede basarse en criterios diversos. Como son:

-La clasificación taxonómica atendiendo a las características que presentan, como resultados de los procesos genéticos que lo originaron.

-Las propiedades específicas del suelo como: contenido de materia orgánica, permeabilidad, salinidad, pedregosidad, profundidad efectiva, etc.

-Aptitud para diferentes usos, fundamentalmente agrícola.

2.2.1. Clasificación taxonómica

Con el propósito de comentar estos tres criterios, se comenzara por la clasificación taxonómica, que posee como características principales las siguientes:

a) Bases

b) Unidades Taxonómicas o Taxas

c) Nomenclatura

Aunque todas las clasificaciones taxonómicas contienen esos tres aspectos las mismas difieren, por lo que existen numerosos sistemas de clasificación de suelos en el mundo, lo que constituye desde el nacimiento de la Pedología como ciencia, un tema de análisis y discusión. Numerosos esquemas de clasificación han surgido sobre todo en las regiones de clima templado (Europa y América del Norte), con el establecimiento de tres escuelas de clasificación que se reconocen a nivel internacional (la europea occidental, la soviética y la norteamericana). Según Hernández y Ascanio (2001) entre los aspectos que caracterizan las tres escuelas pedológicas antes planteadas se encuentran:

La Escuela Europea Occidental: La revelación más importante, es la tendencia a tratar de tomar en cuenta de la manera más completa sus características mineralógicas – petrográficas, aún en aquellos casos en que estas fueron heredadas completamente de la roca madre. Debido a las considerables dificultades en este complicado camino muchos de los trabajos de los científicos euro occidentales son muy discutibles.

La Escuela Soviética (rusa): Los principios para la confección de la clasificación de suelos de Rusia fueron establecidos por Dokuchaev y Sibirtsev. La nomenclatura también fue introducida por ellos tomando en cuenta los nombres populares de suelos (colores), con otros términos geográficos o genéticos. Estos principios partían directamente de la tesis Dokuchaeviana sobre los suelos como formaciones naturales (clima, roca madre, relieve, vegetación, mundo animal) y por la actividad económica del hombre.

La Escuela Norteamericana: El término "Serie de Suelo" fue introducido en el trabajo práctico de la investigación podológica antes de confirmarse la aproximación genética multifacético de los suelos. Aunque ese término, sin duda ha cambiado, el contenido de entonces a acá, su carácter empírico se ha conservado en gran parte.

a) Las bases de esta clasificación la constituyen:

- Horizontes de diagnósticos
- Características de diagnósticos
- Regímenes Hídricos
- Regímenes Térmicos
- Mineralogía, textura, pedregosidad, graviliosidad.

Los **horizontes de diagnósticos** lo representan los horizontes superficiales (epipedones), y los horizontes subsuperficiales (endopedones)

Las **características de diagnósticos** son sencillas y fácilmente medibles en el suelo.

Los **regímenes hídricos**, son el movimiento del agua del suelo, el que se realiza mediante el estudio en estaciones permanentes durante 7 – 10 años, midiendo sistemáticamente la humedad de suelo por el perfil.

Los **regímenes térmicos** se definen por el comportamiento de la temperatura en el suelo durante 7 – 10 años.

b) Las unidades taxonómicas o taxas

1. Orden (11)
2. Suborden (60)
3. Gran Grupo (303)
4. Subgrupo (> 1200)
5. Familia
6. Serie (17 000)

c) Nomenclatura

Los nombres de los suelos se fundamentan en vocablos latinos y griegos que tienen relación con una de las propiedades más importantes del suelo y dan lugar al llamado "elemento formativo", mediante el cual se va armando el nombre del suelo en relación con la unidad taxonómica

Suelos con epipedón mólico (mollus, que significa mullido)

Orden **Mollisol** (elemento formativo, **oll**)

Dentro del orden se clasifica por el régimen hídrico

Ustoll, si tiene régimen hídrico ústico

Una de las ventajas de este sistema de clasificación de suelos es la nomenclatura que, aunque utiliza nombres que aparentan ser extraños, con un poco de conocimiento resultan mucho más claros y descriptivos que los de otros sistemas. La mayoría de los elementos formativos se han extraído de raíces griegas o latinas; los nombres se forman anteponiendo una partícula descriptiva a la terminación sol.

La U.S. Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, USDA, 2003) se basa en las propiedades de los suelos, como estos se encuentra en el paisaje. Un objetivo del sistema es agrupar los suelos con similar génesis. La U.S. Soil Taxonomy es un sistema jerárquico que cada suelo se agrupa primero en la categoría más ancha. Cuando más detalles se agregan se definen las de más baja categorías. No se aplican las características diferenciando uniformemente a todos los suelos a un nivel categórico dado, porque los mismos tienen una complejidad enorme. Por consiguiente, en la U.S. Soil Taxonomy ciertos tipos de diferenciar las características sólo son aplicados a cierto taxa (del nivel sobre cuál está considerando).

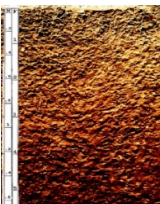
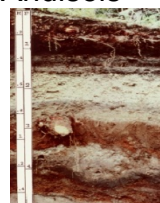
Hay seis unidades taxonómicas o taxas en la U.S. Soil Taxonomy:

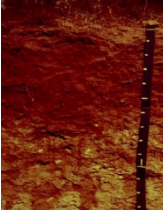
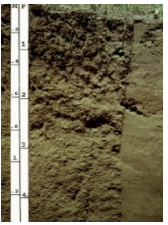
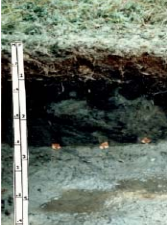
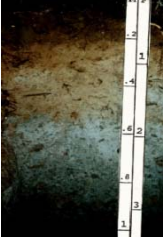
- Ordenes (11 taxa): esta categoría grandemente es basada en los procesos de formación del suelo indicado por la presencia o ausencia de horizontes principales de diagnóstico. Un orden dado incluye tierras cuyas propiedades sugieren que ellos no son disímiles en su génesis. Se piensa que ellos han sido formados por los mismos procesos genéticos generales (Cuadro 2.1 y 2.2).
- Subórdenes (60 taxa): los subórdenes son subdivisiones de órdenes. La presencia o ausencia de propiedades asociadas con él, ambiente climático, material parental principal, y la vegetación (Cuadro 2.3).
- Grandes Grupos (aproximado 303): los grandes grupos son subdivisiones de subórdenes según el tipo similar, orden, y horizontes de diagnóstico. El énfasis está en la presencia o ausencia de características específicas de diagnóstico, temperatura de la tierra, y regímenes de humedad de tierra.
- Subgrupos (> 1,200): son subdivisiones de los grandes grupos. El concepto central de un gran grupo hecho a un grupo (Typic). Los otros subgrupos pueden tener características que se usan para identificar las propiedades críticas comunes en los suelos en varios órdenes, subórdenes, y los grandes grupos.
- Familia: Las familias se diferencian en la respuesta al manejo y sobre todo a la penetración de raíces de la planta. Las diferencias en la textura, la mineralogía, temperatura, y profundidad de la tierra son las bases para la diferenciación familiar.
- La serie (aproximado 17,000 en el EE.UU.): sus características diferenciadoras son basadas principalmente en el tipo, un arreglo de horizontes, el color, la textura, la estructura, la consistencia, la reacción de los horizontes, propiedades químicas y las propiedades mineralógicas de los horizontes.

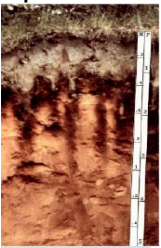
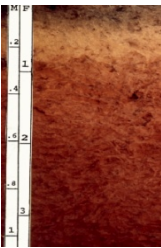
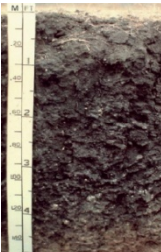
Cuadro 2.1. Elementos formativos de órdenes de la tierra (Soil Survey Staff, USDA, 2003).

Orden de suelo	Derivación	Elemento Formativo
Alfisols	Iluviación de arcilla, Al y Fe, hor Bt	alf
Andisols	Jap. <i>ando</i> , suelo negro, materiales volcánicos	and
Aridisols	L. <i>aridus</i> , seco, aridez, por clima o por sales	id
Entisols	reciente, muy joven (Poco desarrollado)	ent
Gelisols	Gr. <i>gelid</i> , muy frío	el
Histosols	Gr. <i>histos</i> , tejidos, materiales orgánicos	ist
Inceptisols	L. <i>inceptum</i> , Incipientes, joven, suelos poco desarrollados	ept
Mollisols	L. <i>mollis</i> , blando, suave	oll
Oxisols	Fr. <i>oxide</i> , óxidos, suelos tropicales	ox
Spodosols	Gr. <i>Spodos</i> , espódico, ceniza de madera	od
Ultisols	L. <i>ultimus</i> , último, últimas etapas de la evolución	ult
Vertisols	L. <i>verto</i> , mezcla por arcillas hinchables	ert

Cuadro 2.2. Breve descripción de los Órdenes de suelos (Soil Survey Staff, USDA, 2003).

Órdenes de suelo	Características Generales
Alfisols 	Se desarrollan en climas húmedos y subhúmedos, la media de precipitación anual es de 500-1300 mm. Frecuentemente están bajo la vegetación del bosque. Rasgos característicos: La acumulación de arcilla en un horizonte de Bt (B Argílico), el horizonte de E grueso, mucha agua disponible en la estación lluviosa, ligeramente a moderadamente ácido.
Andisols 	Son las tierras con más de 60% material volcánico (la ceniza, carbonilla, la piedra pómez, el basalto) con las densidades a granel debajo de 900 kg/m³ (0.9 g/cm³). Los rasgos característicos: Horizonte A Oscuro, minerales secundarios recién formados (el allophane, el imogolite, las arcillas del ferrihydrite), alta adsorción e inmovilización de fósforo, muy alta capacidad de intercambio catiónico.

Aridisols 	Existen en los climas secos. Casi siempre presentan régimen de humedad arídico. En cuanto a los horizontes diagnósticos, el epipedon es, en la inmensa mayoría de los casos, ócrico; y de los subsuperficiales aparecen ya horizontes evolucionados como el argílico, nátrico y muy frecuentemente presentan horizontes producidos por la acumulación de sales (cálcico, yésico, sálico) y a veces con cementaciones (petrocálcico). El perfil es de tipo ABC (ABtC; ABwC; ABtCk;).
Entisols 	No tienen un perfil desarrollado excepto un horizonte A poco profundo, marginal. Son Entisoles muchas llanuras aluviales recientes, depósitos de la ceniza volcánica, los depósitos sin consolidar con horizontes erosionados y las arenas. Sus propiedades están ampliamente determinadas (heredadas) por el material original. De los horizontes diagnósticos solo presentan aquellos que se originan fácilmente. Casi siempre con horizonte diagnóstico ócrico y sólo algunos con hístico y con álbico (desarrollados a partir de arenas).
Gelisols 	Tienen una capa de hielo permanente y muchos son cryoturbados (formación de turba bajo hielos). Estos suelos consisten de un material mineral u orgánico o ambos, comúnmente tienen capas de materiales gélicos (congelados) y un epipedon hístico o ócrico
Histosols 	Son los suelos orgánicos (turba y estiércoles húmedos), suelos con grandes acumulaciones de materia orgánica sin evolucionar.
Inceptisols 	Se encuentran especialmente en las regiones húmedas, tienen un horizonte de débil a moderado desarrollado. El desarrollo del horizonte ha estado detenido debido al clima frío, el sobre humedecimiento del suelo, o falta de tiempo para un mayor desarrollo. El rasgo característico: La textura tiene que estar más fina que la arena loamosa muy fina.
Mollisols 	Frecuentemente están bajo praderas. Los rasgos característicos: profundo, horizonte A oscuro, ellos pueden tener horizontes de B y acumulación de la cal

Spodosols 	Son las tierras típicamente arenosas. Los rasgos característicos: horizonte O, perfiles fuertemente ácidos, horizontes de E bien-lixiviados, Bh u horizontes de Bs de material orgánico acumulando óxidos de hierro más óxidos de aluminio
Ultisols 	Son los suelos más extendidos de climas tropicales y subtropicales. Los rasgos característicos: horizonte A espeso, la acumulación de arcilla en un Bt, fuertemente el ácido.
Vertisols 	Tienen un volumen alto de arcillas que se hinchan cuando se humedecen y se contraen cuando se secan. La tierra de la superficie entra en las grietas estacionalmente, mezclando la tierra gradualmente a la profundidad del agrietamiento.

Cuadro 2.3. Nombre de los Subórdenes en la U.S.Soil Taxonomy - los elementos formativos y significando (Soil Survey Staff, USDA, 2003).

Elemento formativo	Origen	Significado
alb	L. <i>albus</i> , blanco	Presencia de un horizonte albico
aqu	L. <i>aqua</i> , agua	Característica asociada con el “wetness”
ar	L. <i>arare</i> , de arar	Horizonte mezclado
arg	L. <i>argilla</i> , arcilla blanca	Presencia de un horizonte argílico
bor	Gr. <i>boreas</i> , Norte	Climas frescos
calc	L. <i>calcis</i> , cal	Presencia de un horizonte cálcico
camb	L. <i>cambiare</i> , de cambio	Presencia de un horizonte cámbico
cry	Gr. <i>kryos</i> , frío	Clima Frío
dur	L. <i>duras</i> , duro	Presencia de un duripan
fibr	L. <i>fibra</i> , fibra	Fase menos descompuesta
fluv	L. <i>fluvius</i> , río	Llanuras inundadas
fol	L. <i>folia</i> , hojas	Masa de hojas
gyps	L. <i>gypsum</i> , yeso	Presencia de un horizonte gypsico
hem	Gr. <i>hemi</i> , medio	Fase intermedia de descomposición
hist	Gr. <i>histos</i> , tejido	Suelo de material orgánico

Elemento formativo	Origen	Significado
hum	L. humus, tierra	Presencia de materia orgánicos
ochr	Gr. ochros, pálido	Presencia de un epipedón ócrico
orth	Gr. orthos, verdadero	Los comunes (secuencia de horizontes normales)
plagg	Ger. plaggen, turba	Presencia de un epipedón plaggen
per	L. perennis, todo el año	Suelos con un régimen de humedad Perúdic
psamm	Gr. psammos, arena	Textura arenosa
rend	Polish Rendzina, suelo sobre piedra caliza	Rendzinalike (rendzina común)
sal	L. sal, sal	Presencia de un horizonte sálico
sapr	Gr. sapros, corrompido	Fase de mayor descomposición
stat	Gr. statiskos, estacionario	No congellipediturbation
torr	Gr. torridus, caliente, seco	Suelo con régimen de humedad Torcí
trop	Gr. tropikos, el de solsticio	Incesantemente caluroso
turb	L. turbidus, disturbed	Activa congellipediturbation
ud	L. udus, húmedo	Suelos con régimen de humedad udico
umbr	L. umbra, sombra	Presentan un epipedon umbrico
ust	L. ustus, quemado	Suelos con régimen de humedad Ustico
vit	L. vitrum, vidrio	Presencia de vidrio
xer	Gr. xeros, seco	Suelos con régimen de humedad xerico

En la U.S. Soil Taxonomy se toman en consideración los regímenes de humedad del suelo que se definen como aparece en el Cuadro 2.4.

Cuadro 2.4. Clasificación de los regímenes de humedad (Soil Survey Staff, USDA, 2003).

Régimen de humedad del suelo	Características
Dry	El contenido de humedad es menor que la cantidad retenida a 15 atmósferas de tensión (1500 kPa-punto de marchites permanente).
Xeric	Suelos con inviernos húmedos y veranos secos(por ejemplo: clima del mediterráneo)
Aridic/Torric	Los suelos están secos más de la mitad del tiempo(zona de clima árido)
Perudic	

	En la mayoría de los años la precipitación excede la evapotranspiración cada mes del año.

Udic	En la mayoría de los años los suelos no están secos más de 90 días consecutivos.
Ustic	En la mayoría de los años los suelos están seco durante 90 días consecutivos y húmedos en alguna parte para la mitad los días, la temperatura de la tierra es menor a 5°C
Aquic	Suelos que están suficientemente saturados como para presentar condiciones de reducción. Normalmente tienen bajo chroma o tienen subsuelos con gley

También la U.S.Soil Taxonomy considera la temperatura del suelo (Cuadro 2.5)

Cuadro 2.5. Regímenes de temperatura del suelo (Soil Survey Staff, USDA, 2003).

Régimen de temperatura	Media anual de temperatura en la zona de las raíces(grados C)
Pergelic	< 0
Cryic	0 -8
Frigid	< 8
Mesic	8 - 15
Thermic	15 - 22
Hypothermic	> 22

Los nombres son palabras sintéticas, de nueva configuración, auto explicativas, conformadas por un prefijo explicativo y un sufijo que es un elemento formativo de cada clase (todos los nombres de los suelos de cada orden, suborden y gran grupo, terminan de la misma manera). Así todos los órdenes terminan en "sol" y llevan un prefijo en función de un carácter predominante. Todos los suelos están agrupados en 11 órdenes: Histosol, Entisol, Vertisol, Inceptisol, Andisol, Aridisol, Mollisol, Alfisol, Ultisol, Spodosol y Oxisol.

El orden constituye la unidad principal y se basa en los horizontes de diagnóstico, o en el régimen hídrico o en características de diagnóstico.

Ejemplos:

Endopedón argílico, más del 35% de saturación por bases ALFISOL

Endopedón argílico, menos del 35% de saturación por bases ULTISOL

Los subórdenes en general están dados por los regímenes hídricos

Ejemplo

Alfisol -----Aqualf -----Régimen ácuico

Alfisol -----Udalf ----- Régimen údico

Todos los suelos de cada suborden terminan del mismo modo (se utiliza un conjunto de letras del nombre del orden) y llevan un prefijo que caracteriza a cada suborden; por ejemplo: Boralfs, Udalfs, Ustalfs, Xeralfs y Aqualfs.

Los grandes grupos terminan con el nombre del suborden y llevan un prefijo que define a cada gran grupo; por ejemplo: Durixeralfs, Natrixeralfs, Fragixeralfs, Plinthoxeralfs, Rhodoxeralfs, Palexeralfs, y Haploxeralfs.

Los subgrupos, se anteponen con un adjetivo al nombre explicado en el párrafo anterior; por ejemplo: Mollic Haploxeralfs, Vertic Haploxeralfs, Calcic Haploxeralfs, Ultic Haploxeralfs, Aquic Haploxeralfs, etc.

Como se puede apreciar en los ejemplos anteriores, el nombre del suelo se va armando con los elementos formativos abreviados de las diferentes taxas (subgrupo-gran grupo-suborden-orden), por ejemplo:

-Suborden

Una palabra, las últimas 2-3 letras indican el orden del suelo

Criterio: Hidromorfismo, influencia del clima y la vegetación, texturas extremas.

Ejemplo: Aqu^{ent}

-Gran grupo

Una palabra con tres elementos de información. Las últimas 2-3 letras indican el orden, incluye el elemento formador del suborden y añade información sobre los horizontes de diagnósticos y las propiedades de diagnósticos.

Ejemplo: Ps^{am}ma^{qu}ent^{ent}

-Subgrupo

Dos palabras. Toda la información anterior más datos sobre si es típico, integrado (comparte propiedades con suelos de otro gran grupo, suborden u orden), estragado (suelos con alguna propiedad que no es representativa del gran grupo al que pertenecen). Las categorías superiores van ocupando ordenada y abreviadamente las últimas letras del nombre que se le asigna al suelo, hasta conformar el nombre final, como se resume en el Cuadro 2.6.

Cuadro 2.6: Nombre de órdenes, Subórdenes, Grandes Grupos y Subgrupos de la U.S Soil Taxonomy

Orden	Suborden	Gran Grupo	Subgrupo
Alfisols	Aqualfs	Cryaqualfs	Typic.

El nombre seria: Typic Cryaqualfs

En busca de un sistema de clasificación único para su utilización a nivel mundial la FAO elaboro un sistema que se empleo en el mapa de suelos del mundo. La equivalencia de este sistema con el de la U.S.Soil Taxonomy se esquematiza en el Cuadro 2.7.

Cuadro 2.7. Las unidades de suelo de la FAO equivalente a la U.S.Soil Taxonomy

FAO SOIL	U.S.SOIL TAXONOMY
Acrisols	Ultisols
Cambisols	Inceptisols
Ferralsols	Oxisols
Gleysols	Aquic suborders
Histosols	Histosols
Lithosols	Lithic Subgroups
Luvisols	Alfisols
Nitisols	Ultisols and Alfisols
Podzols	Spodosols
Podzoluvisols	Glossic Great Groups of Alfisols
Solonchaks	Salic Great Group
Solonetz	Natric Great Group
Vertisols	Vertisols
Xerosols	Mollic Aridisols
Yermosols	Typic Aridisols

Cuadro 2.8: Agrupamientos de suelos de la clasificación de suelos cubana (Hernández et al., s/a).

2.1.2. Mapas de suelo

Los mapas de suelo consisten en la representación gráfica de una determinada zona de la superficie terrestre, en los que aparecen reflejados sobre un papel los diferentes tipos de suelos separados por sus contornos.

- De acuerdo con su escala estos reúnen las características siguientes:
- Mapas detallados, comprenden los de escalas de 1:2 000 hasta 1:7 500, se emplean con fines de investigación en áreas limitadas dedicadas a trabajos científicos y generalmente comprenden áreas relativamente pequeñas.
- Mapas semidetallados, comprenden los mapas de escalas mayores a 1:7 500 y hasta 1:50 000, se emplean con fines de racionalización y de distribución de las tierras de regiones agrícolas donde el suelo se trabaja intensamente en la producción de múltiples cosechas.

Agrupamiento	Proceso de Formación	Horizonte Principal
1.- Alítico	Alitización	Hor. B Alítico
2.- Ferrítico	Ferritización	Hor. B Férrico
3.- Ferralítico	Ferralitización	Hor. B Ferralítico
4.- Ferrálico	Ferralitización incompleta	Hor. B Ferrálico
5.- Fersialítico	Fersialitización	Hor. B Fersiálico
6.- Pardo Sialítico	Sialitización	Hor. B Siálico
7.- Húmico Sialítico	Humificación	Hor. A Humificado
8.- Vertisol	Formación de Vertisol	Hor. A o B Vértico
9.- Hidromórfico	Gleyzación	Propiedades gléyicas
10.-Halomórfico	Salinización, Sodificación	Hor. Sálico o Nátrico
11.-Fluvisol	Proceso aluvial	Sin Hor. Principal definido
12.-Histosol	Acumulación de turba	Horizonte Hístico
13.-Poco evolucionado	Sin proceso definido	Sin Hor. Principal definido
14.-Antrosol	Influencia antropogénica	Horizonte Antrópico
Agrupamiento	Proceso de Formación	Horizonte Principal
1.- Alítico	Alitización	Hor. B Alítico
2.- Ferrítico	Ferritización	Hor. B Férrico
3.- Ferralítico	Ferralitización	Hor. B Ferralítico
4.- Ferrálico	Ferralitización incompleta	Hor. B Ferrálico
5.- Fersialítico	Fersialitización	Hor. B Fersiálico
6.- Pardo Sialítico	Sialitización	Hor. B Siálico
7.- Húmico Sialítico	Humificación	Hor. A Humificado
8.- Vertisol	Formación de Vertisol	Hor. A o B Vértico
9.- Hidromórfico	Gleyzación	Propiedades gléyicas
10.-Halomórfico	Salinización, Sodificación	Hor. Sálico o Nátrico
11.-Fluvisol	Proceso aluvial	Sin Hor. Principal definido
12.-Histosol	Acumulación de turba	Horizonte Hístico
13.-Poco evolucionado	Sin proceso definido	Sin Hor. Principal definido
14.-Antrosol	Influencia antropogénica	Horizonte Antrópico

- Mapas poco detallados, tienen escalas entre 1:60 000 y 1: 300 000, se utilizan como mapas generales de uso a nivel de grandes regiones y nación. De acuerdo a las normas para elaborar los mapas de suelo a las diferentes escalas, se establece por la FAO (1985) un número de perfiles a tomar por unidad de superficie:

- mapa con escala 1: 2500 uno cada 10-15 ha
- mapa con escala 1: 10000 uno cada 20 – 35 ha
- mapa con escala 1: 25000 uno cada 40 – 75 ha
- mapa con escala 1: 50000 uno cada 100-150 ha

Es necesario representar en el mapa la superficie de cada suelo, con ese fin se comprueban y precisan los contornos de suelos, se describen los perfiles de suelo y se toman muestras por horizontes. Se ilustra en la Figura 2.1 con el mapa de suelos del mundo.

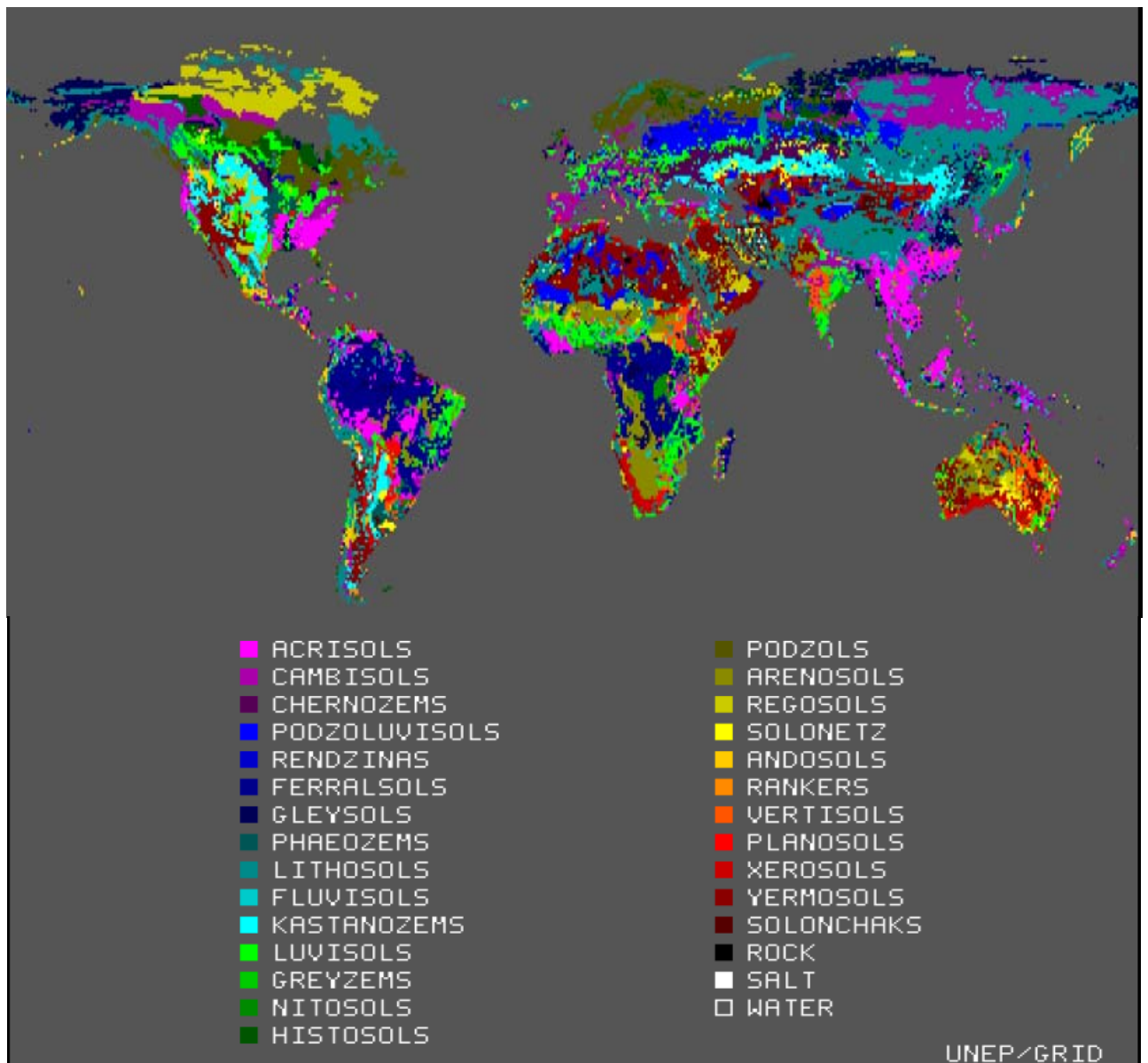


Figura 2.1. Mapa de suelos del mundo y leyenda elaborados por la FAO (1992)

2.1.3. Aptitud de las tierras

En el caso de los suelos no solo era necesario clasificarlos y agruparlos para generalizar los resultados obtenidos en las investigaciones, sino evaluarlos para su uso agrícola, conocer cual es la mejor opción de uso de cada suelo o de un ambiente (suelo mas clima) y así surge la evaluación de tierras.

En su forma actual la evaluación de tierra busca evaluar y predecir el impacto ambiental de uno o varios tipos de usos. Su principal utilidad es proveer a los responsables de planificación y manejo (a diferentes niveles) las bases para la toma de decisiones más racionales, entendiendo que la planificación del uso de la tierra tiene como objetivo principal asegurar que la superficie del terreno se emplee en tal forma que permita obtener los máximos beneficios socio-económicos, donde se incluyen la producción de alimentos sin la degradación de los suelos, el agua y el ambiente en general, es decir, que a través de las diferentes técnicas de planificación del uso de la tierra se garantice un desarrollo sostenible del sector. La evaluación de tierra, en su forma tradicional puede definirse, como el proceso de estimación del potencial de la tierra para un tipo de uso específico.

La importancia de la evaluación de tierras se hace más comprensible si se analizan opiniones de expertos como las siguientes:

1. El objetivo fundamental es seleccionar el mejor uso posible entre varios para la unidad de tierra que se evalúa, por lo cual, se tienen aspectos físicos y socioeconómicos (FAO, 1976)
2. El manejo sostenible de la tierra puede considerarse entonces como una combinación de tecnologías, políticas y actividades en la cual se consideran tantos principios económicos - sociales como razones ambientales de forma simultánea la cual, sin duda genera conflictos, la solución de estos conflictos está por lo tanto en el planeamiento y manejo integral del recurso (Dumanki, 1993)
3. La clasificación agro productiva categoriza y clasifica la tierra con diferentes aptitudes respecto a un cultivo determinado, definiendo la extensión que ocupa y si es posible establece para los distintos grados de aptitud cuales son los rendimientos esperados para las condiciones medias de cada suelo y región según sus condiciones climáticas específicas esto se inserta en las metodologías o directivas de Evaluación de Tierra de la FAO (FAO, 1976 y 1985) en los aspectos de identificación de requisitos de uso de la tierra y en la armonización, la cual es la esencia de la fase interpretativa, sin considerar elementos socio- económicos

El esquema de evaluación de tierra de la FAO es publicado en 1976 (FAO, 1976) tras una serie de discusiones en grupos de trabajo apoyados por la División de Desarrollo de Tierra y Agua de la FAO (Land and water Development, AGL) Los principales promotores del sistema de evaluación de Tierra de la FAO fueron investigadores europeos, encabezados por Beek (1998), que realizaba proyecto en países en desarrollo. Para la mejor comprensión se definirán los principales conceptos que intervienen en el esquema (FAO, 1976).

La definición de Tierra por FAO (1985):

"Una zona de la superficie del planeta cuyas características abarcan todos los atributos estables o predeciblemente cíclicos de la biosfera verticalmente por encima

y por debajo de esta zona , incluido la atmósfera , el suelo , la geología , hidrología , población vegetal y animal y los resultados de la actividad humana pasada y presente , en la amplitud en que estos atributos ejercen una influencia significativa sobre los usos presente y futuro de la tierra por el hombre."

Según FAO (1985) la *clase de aptitud* es la correspondencia de un tipo dado de tierra para con un tipo específico de uso". "Las clase de aptitud pueden especificarse en varios niveles de detalle desde los ordenes hasta las clases .Los ordenes son los más generales y se consideran solamente dos, estos son "A" para el apto y "N" para el no apto. Las clases son subdivisiones de los órdenes que indican diferentes grados de aptitud , tales como "A1" apto "A2" moderadamente apto "A3" marginalmente apto , "N1" temporalmente apto o no apto económicamente "N2" no apto físicamente. N2 significa en el contexto de la evaluación las limitaciones de la tierra son incorregibles a cualquier costo (Rosister, 1994).

En el sistema de la FAO no existe una escala de excelente a muy mala, sino más bien se trata de aptitud, es decir si es Apta o No Apta para un uso específico. No hay tierras malas sino usos inapropiados. El mejor ejemplo de esta afirmación es el caso de las áreas de mal drenaje, inapropiadas para muchos cultivos pueden ser sin embargo muy aptas para el arroz de regadío.

2.1.4. Factores edáficos

El suelo es el medio donde se sostienen las plantas, de él, toman agua y nutrientes, que les resultan indispensables para el metabolismo y la formación de su biomasa, de ahí que el conocimiento de los factores edáficos que inciden en la producción agrícola, y la acción que se ejerza para superar el límite por ellos impuesto es un paso imprescindible para toda aspiración de obtener altos rendimientos y hacer más rentable la producción. De las propiedades químicas, físicas, físico-químicas y biológicas del suelo depende en gran medida el cultivo que debe ubicarse, el manejo agronómico a utilizar y el rendimiento que es posible alcanzar.

Con el propósito de facilitar el conocimiento de; las características de los suelos, su clasificación taxonómica por diferentes sistemas y hacer posible el intercambio entre especialistas de diferentes países, se coleccionan y concentran en un local, monolitos de los principales suelos que existen en un país, un ejemplo, es la colección existente en el Centro Nacional de Referencia de Suelos de Cuba (Figura 2.2).



Figura 2.2. Colección de monolitos de suelos del Centro Nacional de Referencia de Suelos de Cuba (Arzola, 2009).

Los estudios de factores edáficos limitativos para un cultivo sirven de base para la selección de las medidas agronómicas a emplear y para el establecimiento de las diferentes categorías de aptitud, las cuales se relacionan con aspectos económicos por cuanto expresan el porcentaje de disminución de los rendimientos.

La degradación de las tierras es un asunto muy importante para todos los países debido a sus impactos adversos en la productividad de la tierra, seguridad alimentaria, el cambio climático global, el mantenimiento medio ambiental y finalmente en la calidad de vida. Existen extensas áreas consideradas como ecosistemas frágiles, en las cuales los procesos degradativos de los suelos se manifiestan en diferentes magnitudes: erosión, desertificación, salinización, compactación, contaminación, sequía, exceso de humedad, acidificación, pérdida de materia orgánica, son problemas actuales que amenazan con destruir la fertilidad del suelo, recurso natural que requiere de un periodo de formación tan prolongado, que puede considerarse no renovable.

El conocimiento de los suelos debe permitir conocer hasta el nivel de unidad mínima de manejo agrícola: a) el tipo de suelo, b) sus propiedades individuales y c) su aptitud para los cultivos.

Roldós (1986) estableció para la caña de azúcar, valores críticos para la profundidad efectiva, densidad aparente, contenido de gravas y drenaje. Condiciones y manejos agronómicos que pueden ocasionar que estos factores se conviertan en limitantes para los cultivos, y las medidas a utilizar para atenuar o impedir que esto ocurra, deben ser empleadas por el agricultor para conservar o mejorar la fertilidad de sus suelos. Los principales factores edáficos que suelen afectar con mayor incidencia los cultivos y las cualidades de la tierra sobre las que tienen influencia se exponen a continuación:

Profundidad efectiva

La profundidad efectiva es aquella a que las raíces pueden llegar sin encontrarse con ninguna barrera que impida su paso, esta barrera puede ser física, como por ejemplo una capa compacta, piedras, etc o de otro tipo, por ejemplo, un manto freático alto, una capa con exceso de carbonatos o alguna sustancia que le resulte tóxica a las raíces. La P. E. es una de las características de la tierra que más influye en el desarrollo radical de los cultivos, puede estar determinada por:

- Horizontes endurecidos (compactación, pedregosidad, sodicidad, concrecionamiento)
- Toxicidad (provocada por acidez, salinidad)
- Deficiencia de oxígeno (gleyzación, cercanía de un manto freático).

Cuando la P. E. está determinada por la presencia de lechos rocosos u horizontes endurecidos que limitan el flujo de agua, la profundidad juega un importante papel en el cálculo de las reservas de la humedad disponibles sobre todo en los períodos secos en que es necesario el riego. Si la humedad del suelo se retiene a bajas tensiones las raíces la extraen con facilidad, pero en los períodos de sequía, si no le es posible a las plantas profundizar su sistema radical en busca de la humedad necesaria, se refuerza el estrés hídrico. La P. E. tiene una importante influencia en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, sobre todo el fósforo y potasio, aun en suelos bien abastecidos.

En áreas con pendiente la erosión suele haber originado pérdidas de arcilla y de materia orgánica, quedando lechos rocosos o horizontes endurecidos a poca profundidad, en otros casos incluso en lugares llanos se presentan suelos con una capa de gley, piedras, concreciones o compactados ya sea por su condición natural o por la mecanización de la cosecha. Estas barreras que impiden que la raíz profundice originan que el sistema radical sea superficial y de menor tamaño.

Las medidas para mejorar los suelos con esta limitación se deben dirigir a eliminar o atenuar la causa que ocasiona la poca profundidad del suelo, por ejemplo si es una capa compacta, romper esta con las labores. En caso de no ser posible incrementar la profundidad efectiva las medidas deben consistir en mejorar la fertilidad de esa delgada capa de suelo mediante el empleo de abonos orgánicos y minerales y el suministro de agua con el riego.

La capa arable, representa la porción más fértil del suelo y cuando es destruida por elementos naturales o por el hombre. Por ejemplo, cuando se realizan cortes en la superficie del terreno sin tener presente la profundidad del suelo, sucede que suelos fértiles se transforman en improductivos y que se destruya lo que de forma natural fue creado durante miles de años. El procedimiento adecuado en estos casos consiste en quitar y colocar en un lugar aledaño la capa arable, nivelar el subsuelo y volver a colocar la capa arable en la superficie. Como este procedimiento es costoso, a veces los empresarios se deciden por destruir el suelo nivelando la capa arable, lo que resulta tanto más perjudicial mientras más acentuados sean los desniveles existentes. La recuperación de la afectación originada por el hombre, puede resultar tan costosa e impracticable (mover volúmenes de suelos de áreas productivas) que generalmente es necesario limitarse a emplear medidas agronómicas (abonos orgánicos, mayor dosis de fertilizantes minerales, disponer de riego) y a ubicar cultivos que resulten la opción menos mala.

El conocimiento de la profundidad efectiva hasta el nivel de unidad mínima de manejo agrícola resulta de gran importancia para establecer las medidas de conservación de suelo, el cultivo a ubicar y el manejo agronómico a utilizar. Una representación de las diferentes categorías de esta característica de los suelos la provincia de Cienfuegos, Cuba, aparece en el mapa temático de la Figura 2.3.

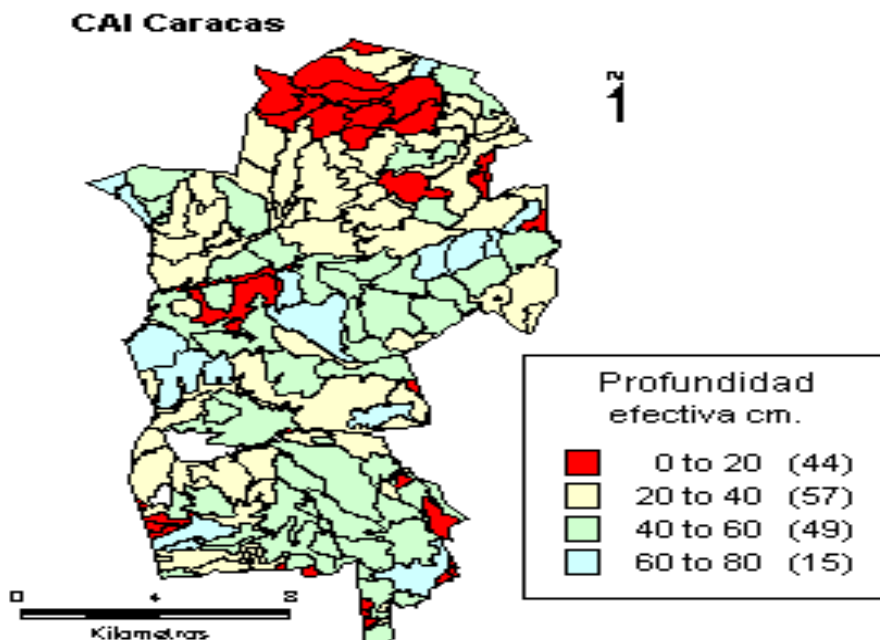


Figura 2.3. Variación de la profundidad efectiva en los suelos de la empresa azucarera Ciudad Caracas de Cienfuegos, Cuba (Arzola et al., 2001).

Erosión hídrica

El hombre, elimina la vegetación natural y labra el suelo, destruye con ello la cobertura natural y las gotas de lluvia impactan con fuerza los agregados, los que se dispersan y son arrastrados (sin obstáculos que disminuyan su velocidad) por el agua de escorrentía hasta el lugar donde esta se vierta. Este proceso se conoce como erosión hídrica, ya que el suelo puede perderse por el viento y entonces se denomina erosión eólica.

La erosión es un proceso degradante de los suelos y en su desarrollo intervienen numerosos factores. La erosión es ampliamente conocida por su efecto desbastador, razón por la cual, miles de toneladas de suelo se pierden cada año y terrenos otrora fértiles se convierten en pedregales y solares yermos. En los países tropicales la erosión hídrica es la más perjudicial la cual es provocada por lo efectos de las precipitaciones y sobre todo la energía de impacto de la lluvia.

La erosión hídrica se clasifica en tres tipos.

- ✓ Erosión laminar.
- ✓ Erosión en surcos.
- ✓ Erosión en cárcavas.

Mientras más ondulado, menor cobertura e infiltración de agua posea el terreno y más abundantes e intensas sean las lluvias, mayores podrán ser las pérdidas ocasionadas

por la erosión hídrica. Se puede precisar que las pendientes más largas e inclinadas están expuestas a un mayor proceso erosivo.

En la medida que la pendiente es más pronunciada se limitan más las labores mecanizadas lo que afecta la productividad de las labores y el beneficio económico, en tanto que el terreno queda más expuesto a la erosión, lo que conlleva a pérdidas progresivas de su fertilidad y capacidad productiva. En terrenos con elevado grado de pendiente se hace necesario emplear medidas de conservación de suelos, para evitar que estos se transformen en pedregales improductivos.

Las medidas en estos casos están dictadas por la magnitud de la pendiente, que puede llegar hasta hacer imposible las labores mecánicas, en tanto que para conservar el suelo es necesario utilizar prácticas como: conservar la cubierta con restos vegetales, barreras vivas, garantizar buena población del campo, plantar en contorno, emplear el laboreo mínimo y no quemar.

La erosión ocasiona por una parte que disminuya la profundidad efectiva del suelo y por la otra, que se pierdan la arcilla y la materia orgánica, que son las partículas más importantes para almacenar y suministrar agua y nutrientes al cultivo, de esta forma muchos suelos fértiles, van a parar a ríos, lagos y mar.

La erosión hídrica, puede degradar el suelo, en localidades con pendiente, donde no se hayan tomado medidas para atenuar su efecto, la misma comienza por arrastrar las fracciones más ligeras como la arcilla y la materia orgánica, que son a su vez, las que más contribuyen a la fertilidad del suelo, de continuar ese proceso, finalmente puede quedar solo la roca en la superficie, desapareciendo las posibilidades de cualquier uso agrícola. En regiones montañosas, es posible percatarse que los lugares más elevados y de mayor pendiente frecuentemente quedan desprovistos de vegetación, mientras los lugares más bajos, donde el agua deposita parte de las materias sólidas en suspensión, están verdes, allí se forma suelo y existe protección contra la erosión, la cubierta del suelo y disminuir la velocidad de las aguas de escorrentía es utilizada desde hace siglos para proteger el suelo de la erosión (Figura 2.4).



Figura 2.4. Terrazas construidas por los incas en Machu-Picchu, Perú (Arzola, 2010).

En regiones montañosas de Colombia (Mariquita-Honda) se realiza siembra de pastos en surcos transversales a la pendiente, los cuales forman pequeños escalones que protegen de la erosión y permiten la cría de ganado vacuno.

Si bien la erosión al arrastrar las partículas que más benefician la fertilidad (como son: materia orgánica y arcilla) y disminuir la profundidad efectiva del suelo, afecta la cobertura del suelo con vegetación, en la medida que existe menos vegetación, es a su vez mayor la erosión. Este sinergismo probablemente está presente en las fotos de lugares de Venezuela fuertemente erosionados (Figura 2.5).



Figura 2.5. Fuerte erosión hídrica en elevaciones, en las cercanías de Guanare, Venezuela (Arzola, 2008).

Las medidas para contrarrestar la erosión se dirigen en dos sentidos que son:

- 1.- Evitar el golpe directo de las gotas de lluvia en la superficie del suelo, ya que se dispersan las partículas del suelo y,
- 2.- Disminuir la velocidad del agua de escorrentía que arrastra esas partículas.

Ambos efectos se atenúan de estar protegido el suelo, bien sea, mediante una cubierta muerta (mulch) o una cubierta viva (barreras vivas), además, esa cubierta, favorece el contenido de humedad del suelo y evita la incidencia directa de los rayos solares en su superficie; por ambas razones, se mantiene más baja su temperatura y disminuye la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo (Sánchez, 1981). Esa cubierta, es en potencia materia orgánica para el suelo y el incremento del contenido orgánico, mejora la formación de agregados estables, la percolación del agua y la retención de humedad, todo lo cual contrarresta el efecto de la erosión. Una buena cubierta vegetal y el empleo de medidas para reducir la velocidad de escorrentía del agua, como pueden ser siembra en contornos, terrazas o algún obstáculo que retenga restos vegetales (Figura 2.6), son necesarias para atenuar el efecto de la erosión.



a) en las cercanías de Barquisimeto, Venezuela, alambres transversales a la pendiente (Arzola, 2008).



b) UBPC Tuinucu de la empresa Melanio Hernández, Cuba, tranque con piedras (Arzola, 2009).



c) barreras vivas, Ecudos S.A, Ecuador (Arzola, 2006)



d) cubierta de paja, La Margarita, México (Arzola, 2003)

Figura 2.6. Medidas utilizadas para atenuar la erosión hídrica en algunas localidades de América.

La erosión puede presentarse y ser severa incluso en lugares llanos, donde se realice un uso indiscriminado del riego, el cual, puede originar erosión laminar, formación de surcos y cárcavas (Figura 2.7).



Figura 2.7. Erosión provocada por el riego indiscriminado por gravedad en áreas del ingenio Ecudos, S.A. de C.V., Ecuador (Arzola, 2006).

Mal drenaje y compactación

Los suelos arcillosos, donde predominan arcillas del tipo 2:1, como los Vertisuelos y los Gley, se compactan y agrietan fuertemente en época de seca, lo que afecta el sistema radical del cultivo y consecuentemente la asimilación de agua y nutrientes por la planta, mientras que en época de lluvia el mal drenaje ocasiona falta de oxígeno, lo que afecta la respiración aeróbica de la raíz y consecuentemente la absorción de nutrientes y agua, en tanto que, se realiza la respiración anaeróbica que produce etanol tóxico para la raíz. Esta situación es sumamente crítica en esos suelos, particularmente cuando existe un manto freático cercano a la superficie (Figura 2.8). En esos casos, se debe mejorar el drenaje, descompactar, aplicar abonos orgánicos y de existir riego, utilizar agua de bajo contenido de sales, para evitar la formación de suelos halomórficos.



Figura 2.8. De izquierda a derecha: Mal drenaje, síntomas de hidromorfia, manto freático próximo a la superficie, fuerte agrietamiento en seco en áreas del Ingenio Ecudos, S.A. de C.V., Ecuador (Arzola, 2006).

Frecuentemente en suelos de muy mal drenaje, es preferible establecer un cultivo que se adapte a esas condiciones, como el arroz, que es capaz de tomar oxígeno por sus hojas y trasladarlo hasta la raíz para que la planta realice la respiración normalmente. A pesar de ello, en casos extremos de fuerte reducción (bajo potencial redox), se forman sustancias hasta niveles tóxicos (SH_2 , ácidos orgánicos, hierro y manganeso

reducidos) que ocasionan diferentes enfermedades o desordenes fisiológicos en el arroz.

Rocosisidad, pedregosidad, gravillosidad

El área total útil para las raíces del cultivo disminuye en la medida que aumenta el espacio ocupado por diferentes conglomerados (rocas, piedras, pedregones, gravas, concreciones) mientras que por otra parte, se ve limitada la mecanización. Esto afecta el rendimiento agrícola y la productividad de las labores.

La presencia de estos conglomerados, disminuye la capacidad productiva del suelo, pues reduce el volumen de tierra puesta a disposición del cultivo, la cohesión entre partículas y la ascensión capilar; por tal razón, queda menos agua disponible para las raíces. Debido a ello, es conveniente mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la disponibilidad de agua y nutrientes mediante el riego, la fertilización, etc.

En el caso de abundancia de rocas (Figura 2.9) en ocasiones, se rompen estas para permitir el paso de los vehículos que transportaran la cosecha. En ese caso, o cuando están presentes piedras (Figura 2.10) se puede realizar la laboriosa tarea de sacarlas para hacer cercas, sin que ello implique necesariamente, una mejora para el cultivo, pues la erosión en áreas con pendiente suele ser mayor en ese caso y la conservación de la humedad menor (la humedad se conserva debajo de las piedras) .



Figura 2.9. Área con limitaciones para el crecimiento y mecanización del cultivo por abundancia de rocas en áreas del ingenio La Margarita, Oaxaca, México (Arzola, 2003).



Figura 2.10. Abundancia de piedras y gravas en áreas del ingenio La Margarita, Oaxaca, México (Arzola, 2003).

Concreciones y lateritas

Los pequeños y compactos conglomerados, presentes en algunos suelos, nombrados concreciones (Figura 2.11), presentan altos contenidos de hierro y manganeso y en su formación participa una sustancia cementante como el humus y la sílice. Como la presencia de hierro está asociada a la formación de concreciones y este le imparte a los suelos colores rojos y amarillos, no es extraño, que con mucha frecuencia las concreciones aparezcan en estos suelos, además, en condiciones de humedad alternante (exceso de humedad y sequía), en suelos ácidos ricos en hierro, se forman capas férricas muy duras conocidas como lateritas o conglomerados de concreciones, las cuales poseen consecuencias negativas para el crecimiento de las raíces, por limitarse la profundidad efectiva y quedar limitado el sistema radical hasta el lugar donde se presenta esta barrera.

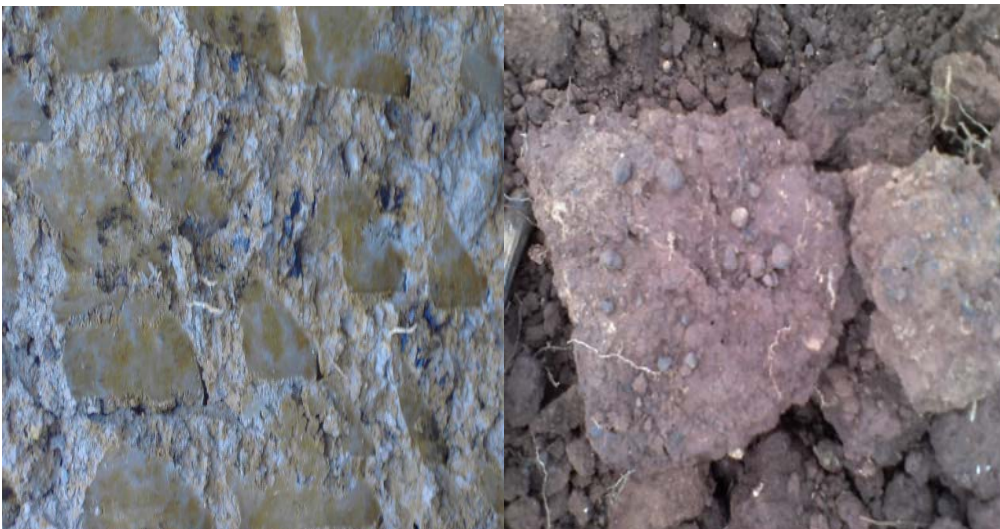


Figura 2.11. Concreciones (Foto izquierda, áreas del ingenio Ecudos S.A. de C.V., Ecuador, Arzola, 2006 y Foto derecha, áreas del banco de semilla de la empresa azucarera Carlos Baliño, Villa Clara, Cuba, Arzola, 2009).

Las concreciones son inertes sin valor como fuente de agua y nutrientes para el cultivo, por tanto el espacio que ellas ocupan, similar a lo que sucede con piedras o gravas, es a expensa de la parte activa del suelo y significa menor suministro de agua y nutrientes para el cultivo, se puede añadir también, que al formarse las concreciones, aparecen fosfatos de hierro y aluminio, queda así el fósforo que las forma sin valor para la nutrición de las plantas(ocluido), lo que es una razón más para explicar porque muchos suelos donde abundan las concreciones son insuficientes en fósforo. Las corazas férricas o lateritas limitan la profundidad efectiva del suelo, el desarrollo del sistema radical y consecuentemente la absorción de agua y nutrientes por la planta, lo que resulta particularmente perjudicial durante la época de seca, mientras que por otra parte, en época de lluvia dicha coraza impide el paso del agua y se crean condiciones de exceso de humedad.

En las condiciones de acidez y sobrehumedecimiento que generalmente acompañan al proceso de concrecionamiento y laterización aparece toxicidad de los elementos Al y Mn y una menor disponibilidad de nitrógeno, fósforo, molibdeno y otros elementos (Fogliata, 1995).

En estos suelos comúnmente se requiere para lograr rendimientos aceptables de la aplicación de abonos orgánicos, fertilizantes minerales completos, microelementos, encalado, riego y drenaje.

Textura

Las partículas del suelo se clasifican como arena, limo y arcilla. Las partículas de arena tienen diámetros entre 2 y 0,05 mm, las de limo entre 0,05 y 0,002 mm, y las de arcilla son menores de 0,002. En dependencia de la abundancia de cada una de estas partículas se clasifica la textura del suelo, la cual varía desde suelos arenosos hasta arcillosos pesados (Figura 2.12).



Figura 2.12. Suelo de textura gruesa, reseca y de pobres reservas nutricionales(izquierda) y suelo arcilloso pesado de buenas propiedades químicas y malas físicas(derecha), en áreas del ingenio Ecudos S.A. de C.V., Ecuador(Arzola, 2006).

La textura gruesa, en suelos donde abunda la arena, origina suelos resecanes y deficientes en reservas nutricionales, aunque de muy buenas propiedades físicas, en tanto que, en los suelos de textura fina, donde abunda la arcilla (de tipo 2:1), se originan suelos con elevadas reservas nutricionales, pero de muy malas propiedades físicas

Un manejo agronómico que contrarreste los efectos depresivos que sobre el rendimiento posea la limitación edáfica existente, es en cualquier caso decisivo, por ejemplo, en las arenas del Sahara en Egipto, para cualquier opción de uso agrícola, se establece primeramente un sistema de riego con agua del río Nilo, se aplican los fangos del río (contienen arcilla y materia orgánica) y se utilizan elevadas dosis de fertilizantes minerales, de esta forma, mejoran las propiedades del suelo y se obtienen abundantes cosechas.

Acidez

Los problemas de la acidificación de los suelos se hacen más patentes, en aquellos casos en que existe un menor poder amortiguador, donde pequeñas pérdidas de bases o adiciones de ácido, pueden repercutir con mayor intensidad sobre la reacción del suelo, tal es el caso de suelos con bajo valor T, como por ejemplo los Ferralíticos Cuarcíticos de Cuba.

En el ingenio La Margarita, Oaxaca, México, se determinó el pH de los suelos del área de abasto cañero en el año 1990 y posteriormente ello se repitió en 1998. Disminuyó al transcurrir 8 años el área ocupada por suelos ácidos y muy ácidos, lo que dice bien de las recomendaciones realizadas en el año 1990 (INICA, 1990 y 1998) (Figura 2.13).

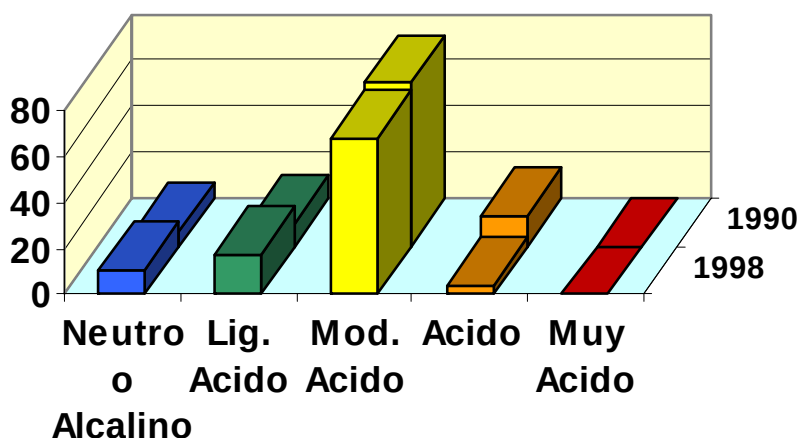


Figura 2.13. Porcentaje de área correspondiente a las categorías de acidez de los suelos en 1990 y 1998 en áreas de abasto del ingenio La Margarita, Oaxaca, México (INICA, 1990 y 1998).

Las causas más frecuentes de infertilidad de los suelos ácidos son indirectas y generalmente pueden atribuirse a uno o más de los factores siguientes: toxicidad por aluminio, manganeso o hierro y deficiencias de calcio o magnesio. El porcentaje de

saturación por aluminio, calculado por la siguiente fórmula, aumenta con la acidificación del suelo y se relaciona estrechamente con la producción de los cultivos.

$$\% \text{ de Al} = \frac{\text{Al} \times 100}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al}} \quad (\text{cationes en cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1})$$

El aluminio tiende a acumularse en las raíces, impidiendo la absorción y el traslado del calcio y del fósforo en la planta, apareciendo por ello insuficiencia de estos nutrientes en los suelos con un alto porcentaje de saturación con aluminio. Los efectos depresivos sobre el rendimiento con el incremento de saturación con aluminio del suelo son diferentes para los distintos cultivos. Un efecto de esta enmienda es sobre el carbono orgánico total del suelo (COT)(Cuadro 2.9).

Cuadro 2.9. Decremento o incremento del contenido de carbono orgánico del suelo con el encalado de la caña de azúcar en diferentes empresas azucareras de Cuba (Arzola, 2007).

Dosis de caliza Incorporada(t/ha)	*Variación del **C.O.T. en el suelo (%)	Variación (t de carbono/ha)	Condición
3.36 t de caliza /ha	-0.14	-3.11	Suelo Ferralítico Cuarcítico amarillo(Alfisol)
3.00 t de caliza/ha	-0.20	-4.48	Suelo Pardo con Carbonatos (Inceptisol)
4.00 t de caliza/ha	0.01	0.22	Pardo sin Carbonato típico (Inceptisol)
3.15 t de caliza/ha	-0.32	-7.17	Suelo Ferralítico cuarcítico Amarillo (Alfisol)
3.15 t de caliza/ha	-0.15	-3.36	Gley húmico concrecionario sobre caliza(Gleysol)

*Decremento o Incremento (Tratamiento- Testigo)/Testigo X 100

**C.O.T.=Carbono orgánico total del suelo

La necesidad de encalado la define la insuficiencia de calcio y/o magnesio y el porcentaje que representa el aluminio dentro de la capacidad de cambio catiónica efectiva. Cuando estos indicadores no son los que se utilizan para el diagnóstico y se encalan suelos ácidos, que no presentan insuficiencias de calcio o magnesio, ni toxicidad por aluminio, los efectos de esta enmienda pueden ser nulos o incluso negativos sobre los rendimientos, pues suele afectarse la asimilabilidad de los microelementos y disminuir el contenido de materia orgánica

Materia orgánica

En condiciones naturales se establece entre el suelo y la vegetación que sobre él se desarrolla un sistema casi cerrado pues la vegetación toma nutrientes del suelo, forma biomasa y sus restos orgánicos se incorporan de nuevo suministrando nutrientes y humus. El hombre crea esa condición con la reforestación, protege con ello el suelo y almacena carbono en la biomasa de la planta y en la materia orgánica del suelo, contrarresta con ello el efecto invernadero (Figura 2.14).



Figura 2.14. Reforestación con pino en áreas cercanas a la ciudad de Santo Domingo, Villa Clara, Cuba (Arzola, 2009).

Cuando el hombre elimina esa vegetación y labra el suelo, altera ese equilibrio pues en la cosecha se lleva parte de los nutrientes y de la materia orgánica que anteriormente se incorporaba, además, los cultivos son generalmente menos eficientes en absorber la radiación solar que los bosques, situación que es más aguda en el trópico y que origina:

- a) Una menor formación de biomasa y aporte de materia orgánica al suelo;
- b) Mayor temperatura del suelo lo que provoca mayor tasa de descomposición de la materia orgánica y mayor evaporación del agua.

Bajo condiciones de laboreo en el trópico, el menor aporte de restos orgánicos y la mayor descomposición de estos en el suelo no sólo por la mayor radiación solar, sino también por la mejor aireación, origina que disminuya el contenido de materia orgánica.

Como esta representa la principal reserva de carbono de la biosfera, y constituye la principal fuente de Carbono y Nitrógeno en los ecosistemas terrestres, de su conservación depende en gran medida la vida del planeta. Para conservarla es necesario dirigir permanentemente el proceso de transformación de los restos orgánicos hacia la formación de sustancias húmicas estables y con ello disminuir la

emisión de gases a la atmósfera contribuyendo a atenuar el efecto invernadero y a elevar la productividad de los ecosistemas terrestres (Martínez et al., 2001).

El humus mejora las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas de los suelos, por su importancia el aporte de abonos orgánicos y abonos verdes constituye una importante mejora para la fertilidad y el potencial de rendimiento de los suelos.

Con el aprovechamiento de los residuos de la agroindustria de la caña de azúcar como fuentes de materia orgánica, nutrientes y agua para el cultivo, mejoran las propiedades de los suelos y el rendimiento del cultivo y paralelamente se protege el entorno de la contaminación (Cuadro 2.10).

Cuadro 2.10. Variación del rendimiento de la caña de azúcar con el empleo de diferentes abonos orgánicos en diferentes condiciones de Cuba (Arzola, 2007).

Nombre	Forma de aplicación	Dosis	*Incremento de rendimiento (%)
Cachaza	Incorporada con la capa arable	45 t. ha ⁻¹ en base seca	126
Cachaza	Sobre los esquejes en plantación	15 t. ha ⁻¹ en base seca	104
Compost	Sobre los esquejes en plantación	3.5 t. ha ⁻¹ en base seca	118
Residuo de torula	Fertirriego por aspersión	1000 m ³ /ha/cosecha	19
Residuo de fabricación De azúcar crudo	Fertirriego por aspersión	1750 m ³ /ha/cosecha	0

* Incremento= (Tratamiento- Testigo)/Testigo X 100

El contenido de C.O.T. del suelo se favorece con la aplicación de los residuos del procesamiento agroindustrial de la caña de azúcar, lo que está en correspondencia con la necesidad de reciclar los mismos dada las mejoras que de esta forma se obtiene en el suelo y el daño que se deja de hacer a las aguas y a la atmósfera (Cuadro 2.11).

Cuadro 2.11. Incremento del contenido orgánico del suelo con la aplicación de residuos del procesamiento agroindustrial de la caña de azúcar (Arzola, 2007).

Abono orgánico	C.O.T. del suelo (%)	Condición
Cachaza	0,89	Incorporada en suelo Húmico Calcimórfico
Residuo de levadura torula	1,18	Riego 7 años en suelo Ferralítico Amarillo gleysado
Cachaza disuelta en agua	0.26	Riego en suelo Ferralítico rojo hidratado y compactado

Valor T

Representa la reserva "almacen de nutrientes" para la nutrición vegetal. La modificación de la CIC, se hace de mayor importancia en los suelos de textura gruesa, suelos ácidos muy evolucionados con arcillas de tipo 1:1 u óxidos hidratados de hierro y aluminio y en suelos pobres en materia orgánica (Chapman, 1965; Chapman, 1965a; Black, 1968).

Silicio

A pesar de no haberse demostrado que el Si sea un elemento esencial para todas las plantas, se reportan en regiones de La Florida, EE.UU., en áreas de suelos orgánicos, importantes efectos beneficiosos, como son:

- Mayor crecimiento y rendimiento del cultivo (mayor contenido de azúcar en la caña).
- Reducción de la incidencia de enfermedades (especialmente en arroz), por lo que disminuye la necesidad de emplear fungicidas.
- Mejora de las propiedades físicas del suelo.
- Incremento de la fotosíntesis.
- Mejora en la economía del agua.
- Incremento de la asimilabilidad del fósforo
- Disminución de la toxicidad del Fe y Mn.

El silicio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, pero su contenido disminuye con el proceso de meteorización de los suelos, que se caracteriza precisamente por la pérdida de Si y bases. Esto ocasiona que la insuficiencia de este elemento se pueda presentar con más frecuencia en suelos ácidos, Ferralitizados (rojos) o arenosos (particularmente si ese elemento se ha exportado con el transcurso de las cosechas). Como el Si no es un constituyente de la estructura de la materia orgánica del suelo, los suelos orgánicos también son propensos a su insuficiencia.

La insuficiencia de este elemento se puede eliminar esparciendo sobre la superficie, durante la preparación del suelo, silicato de calcio, el cual debe incorporarse con alguna labor antes de la plantación.

Salinidad y sodicidad

La salinidad y la sodicidad se relacionan con la acumulación de sales solubles en el perfil del suelo. Se considera para clasificar los suelos halomórficos la conductividad y el porcentaje de saturación con sodio (Cuadro 2.12)

Cuadro 2.12. Clasificación de los suelos según su conductividad y porcentaje de sodio (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954; Bower et al., 1958)

Grupo de suelos	Conductividad del extracto saturado dS. m ⁻¹ a 25o C	Saturación de la CIC con Na (%)
Salinos	>4	<15
Salino-sódicos	>4	>15
No salino-sódicos	<4	>15
Normales	<4	<15

Las vías por las cuales el hombre saliniza los suelos son:

-Riego con agua de baja calidad.

-Riego sin poner en práctica soluciones adecuadas al mal drenaje de los suelos.

En suelos de baja velocidad de infiltración del agua, cercanas a la costa, cuando se establece un sistema de riego y se sobre explota el manto freático, suele bajar el nivel de este y penetrar el agua salina, de continuar el riego con esta agua cada vez se aportara mas sales al suelo. De no existir drenaje la acumulación de sales será más rápida y por esta causa muchos suelos fértiles han llegado a convertirse en salinos o sódicos.

El principal efecto asociado a la presencia de altos contenidos de sales solubles en la zona radical es que se dificulta la absorción de agua por aumento de la presión osmótica, así como el efecto tóxico de las sales de la solución del suelo, lo que se agrava con la falta de humedad.

La recuperación de un suelo salino es costosa, pues se requiere de agua de buena calidad para el riego y de un sistema de drenes con tubos enterrados a profundidad que recojan el agua que lava las sales. Esta agua con sales debe recogerse en canales que no desemboquen a áreas agrícolas aledañas que puede perjudicar.

El lavado de las sales se facilita si se mejora la estructura del suelo, por ello el empleo de abonos orgánicos y abonos verdes es conveniente, también cultivar especies de planta que resistan la salinidad y que extraigan sales para con su exportación en la cosecha eliminar sales.

Cuando no se trata de sales en la solución del suelo, sino de altos contenidos de sodio cambiante en el complejo de cambio se considera el suelo sódico y debe eliminarse el sodio mediante el intercambio con un catión que no resulte perjudicial, es tradicional la aplicación de sulfato de calcio y el lavado del sulfato de sodio formado.

La alcalinización del perfil produce una serie de consecuencias desfavorables para las propiedades fisicoquímicas del suelo. Así tanto las arcillas sódicas como el humus se dispersan, los agregados estructurales se destruyen. Las arcillas y los ácidos húmicos

se iluvian, acumulándose en el horizonte B, formándose un horizonte de acumulación de arcillas sódicas, es decir, que se origina un horizonte nátrico (si la intensidad de la iluviación es suficiente), originándose una estructura muy peculiar llamada columnar que presenta la cara superior de los prismas redondeada.

En un suelo de mal drenaje de la zona Sausalito, Ingenio Ecudos S.A. de Ecuador se encontró un elevado contenido de sodio cambiante y una relación calcio/magnesio estrecha, características estas que contribuyen a la dispersión de las arcillas, mal drenaje, compactación y muerte de las plantas en casos extremos.

En los suelos halomórficos muy buenos resultados se reportan con la aplicación de abonos orgánicos (por ejemplo cachaza incorporada a razón de 100 a 150 t/ha) y el pase de topes en el subsuelo que faciliten el drenaje y el riego con agua de buena calidad.

Exceso de carbonato de calcio

En estos suelos disminuye la asimilabilidad del hierro y el manganeso, lo que se acentúa en condiciones de baja temperatura y falta de humedad., En esas condiciones en ocasiones aparece clorosis férrica, particularmente en plantaciones jóvenes, pues entonces no solo falta hierro disponible, sino que también, el pobre desarrollo del nuevo sistema radical impide su asimilación.

La erosión en suelos formados sobre calizas facilita la aparición de este factor limitante, que afecta la asimilabilidad del fósforo cuando se forman fosfatos de calcio insolubles, la del potasio por ser antagónicos ambos elementos y que ocasiona mayores pérdidas de nitrógeno en forma amoniacal (proceso conocido como volatilización del nitrógeno), por ello deben preferirse en este caso fertilizantes nitrogenados en que el nitrógeno no se presente en forma amoniacal y enterrarlos cerca del sistema radical.

No solo el carbonato puede provenir de la roca madre, es posible encontrar acumulación de carbonatos secundarios en el perfil. Estos carbonatos son los de mayor actividad a excepción de los "ojos de buey" (Nódulos cristalizados con poca solubilidad) y se presentan en forma de concreciones, pseudo micelios y manchas. Su formación presupone una disolución previa de una fuente carbonatada y su posterior deposición en un régimen evaporítico, otra fuente es el CO₂ gaseoso (Figura 2.15).



Figura 2.15. La erosión hídrica ha disminuido drásticamente la profundidad efectiva del suelo, aparece casi en la superficie el carbonato de calcio (banco de semilla de la empresa azucarera Quintín Banderas, Villa Clara, Cuba (Arzola, 2009).

Ruiz y Navia (1980), han detectado en regiones de Chile bajos contenidos de hierro soluble al DTPA coincidiendo con altos contenidos de bicarbonatos y a veces, excesivos niveles de fósforo. Han corregido los síntomas de clorosis férrica con quelatos, sulfatos de hierro, así como con azufre en inyecciones al tronco de árboles.

Desde el punto de vista económico para eliminar el problema de los suelos carbonatados, no es razonable tratar de eliminar los carbonatos con la aplicación de ácidos minerales, por lo que generalmente se aplica o mayor dosis del elemento que se pierde o insolubiliza o se emplean estos en la forma en que se pierden menos (Ejemplo, nitrógeno en forma nítrica y no amoniacal) o se asimilan mejor (Ejemplo, hierro como quelato ferroso).

En presencia de exceso de carbonato es recomendable:

- Evitar el estrés hídrico.
- Emplear el laboreo mínimo.
- Utilizar implementos verticales, no invertir el prisma.

Utilizar mejoradores orgánicos como la vinaza, que posean efecto residual ácido, pues ello aumenta el contenido de hierro extractable (Camargo et al., 1983).

Contenido de nutrientes

Para que las plantas puedan vivir necesitan tomar elementos nutrientes que les resultan esenciales o imprescindibles para la constitución de su organismo, algunos de estos elementos los toman del aire o del agua, como el carbono, el hidrógeno o el oxígeno, mientras otros los toman del suelo, como el nitrógeno, el potasio, el fósforo,

el calcio, el magnesio, el azufre (una fracción puede asimilarla del SO₂ del aire) y los microelementos.

Cuando alguno de estos elementos se encuentra en cantidad insuficiente para alcanzar el máximo rendimiento del cultivo se requiere de la aplicación del fertilizante que lo contenga en la cantidad adecuada, pues en defecto se afectan los rendimientos, pero en exceso también puede ocurrir ello por insolubilizarse otros nutrientes que le resulten necesarios, además del gasto innecesario en la compra y aplicación de un producto que no dejara ningún provecho para el agricultor.

El diagnóstico de la necesidad de fertilizantes de los cultivos, debe considerar las interacciones entre nutrientes y las modificaciones que ocurren en el tiempo, por ejemplo, a partir de experimentos de campo bien conducidos y evaluados con caña de azúcar, se concluyó hace varias décadas en Tucumán, Argentina, que se requería solo de aplicar fertilizantes nitrogenados pues no existía incremento ni mejora alguna con la aplicación de fertilizantes fosfóricos ni potásicos, por lo cual, se generalizó esta recomendación que con el paso del tiempo comenzó a mostrar efectos negativos, pues los suelos fueron agotando sus reservas de fósforo y potasio y estos comenzaron a ser el factor limitante de los rendimientos.

Desbalance nutricional

Los desbalances nutricionales, son el resultado del efecto del exceso o la insuficiencia de un(os) nutriente(s) sobre la asimilabilidad de otro(s), pueden ser muy diversos, por esa razón, no es posible abarcar este amplio tema en tan pequeño espacio, por lo que solo se ilustrará este fenómeno, con un ejemplo.

En una unidad de producción ubicada en un área nombrada Majagua, de la empresa arrocera “Sur del Jíbaro” de la provincia “Sancti Spiritus” en Cuba, morían las plantas de arroz en más de 1000 ha dedicadas a ese cultivo, desconociéndose las causas y vías de solución, aunque existían diferentes hipótesis, por lo que fue necesario investigar todas ellas. Para resolver lo anterior se realizaron varios estudios (Arzola, 1980), cuyos resultados principales se resumen a continuación:

- El contenido de sales y la conductividad eléctrica del agua de riego y otros indicadores de su calidad (contenido de sodio, CSR, RAS) fueron normales y no pudrían ser la causa de la muerte de las plantas de arroz.
- El contenido de hierro de las plantas que crecen en el suelo donde se presenta la afectación es esencialmente mayor al de aquellas que crecen saludables en los suelos aledaños. En el mayor grado de intensidad de los síntomas de las plantas se supera 10 veces el límite de toxicidad por hierro para la planta arroz. Por otra parte, el contenido de fósforo de las plantas afectadas, es evidentemente menor que el de las plantas sanas. Los análisis de muestras de plantas con diferente grado de intensidad de los síntomas muestran, que el contenido de hierro incrementa con el aumento del grado de intensidad de los síntomas de la enfermedad, mientras que disminuyen los contenidos de fósforo y potasio.
- Al incrementar la dosis de fósforo aumenta en general el contenido de fósforo de la planta, mientras que el contenido de hierro así como la relación Fe /P disminuyen.

Esto origina un mayor rendimiento. Altas aplicaciones de fertilizante fosfórico podrían por lo tanto servir para eliminar la toxicidad por hierro en ese suelo.

- De las relaciones entre el rendimiento relativo en las plantas cultivadas en macetas y los análisis de suelo resultan a modo de orientación para evaluar el suelo donde mueren las plantas, los siguientes valores límites:

- Para el contenido de fósforo asimilable P según Olsen.

< 0.9 mg P/100g= Bajo

0.9 – 1.4 mg P/100g= Medio

1.4 – 2.3 P/100 g= Suficiente.

> 2.3 mg P/100g= Alto.

- Para el contenido de fósforo asimilable P según Bray y Kurtz

< 0.3 mg P/100g= Bajo

0.3 – 0.8 mg P/100g= Medio

0.8 – 1.5 mg P/100g= Suficiente

> 1.5 mg P/100g= Alto

- Para el contenido de fosfato de hierro por el fraccionamiento de Chang y Jackson.

< 8 mg P/100g= Bajo

8 – 11 mg P/100g= Medio

11 – 14 mg P/100g= Suficiente

> 14 mg P/100g= Alto

Como hasta ahora no existe ningún valor límite para evaluar el análisis de suelo para el cultivo de las plantas de arroz en ese suelo, deben ser los valores anteriores utilizados y perfeccionados en un futuro.

- De las investigaciones realizadas podrían derivarse los siguientes grupos de valores para la relación Fe /P:

Relación Fe/P Rendimiento de la planta de arroz.

< 0.32 Buen rendimiento

0.32 – 2.00 Fuerte disminución del rendimiento

> 2.00 Muy poco o ningún rendimiento

- Como los resultados obtenidos muestran que para obtener con seguridad buen rendimiento de las plantas de arroz en la región afectada se necesitan muy elevadas dosis de fósforo (alrededor de 275 kg P/ha) lo cual no es posible utilizar en la práctica, se debe cambiar de arroz de aniego a arroz de secano o plantar otro cultivo tolerante.

2.1.5. Integración de factores edáficos

Al encontrarse al mínimo, cualquier de los factores edáficos mencionados anteriormente se deprimirá el rendimiento del cultivo y solo este incrementara cuando el nivel de dicho factor deje de ser limitante mediante el empleo de la medida requerida, en ese punto, otro factor puede pasar a ser limitante por estar al nivel más bajo, entonces se deberá repetir lo anterior. Así sucesivamente hasta que todos los factores se encuentren en un nivel óptimo para la especie de planta o variedad de que se trate.

Una forma esquemática muy ilustrativa de esa ley conocida como “ley del mínimo”, compara el rendimiento a obtener con la cantidad de agua que puede contener un barril, la que dependerá de la altura de cada una de las tablas que lo compone, cada tabla representa un factor limitante y el rendimiento dependerá de la tabla más baja(factor limitante).Esto permite comprender que cuando se establecen adecuada relaciones entre los diferentes factores edáficos y el rendimiento, la determinación de dichos factores en una localidad permitirá conocer cuáles deben ser modificados para aumentar el rendimiento. De estar limitado el rendimiento por factores que el hombre no puede modificar, solo es posible establecer la aptitud de ese suelo y ubicar el cultivo o variedad que mejor se adapte a esa condición.

Para ejemplificar la relación entre algunos factores edáficos (no modificables o al menos bastante estables en el suelo) y el rendimiento, se eligió el cultivo de la caña de azúcar y se encontró (a pesar de existir poca información), que era posible, establecer un sistema de evaluación de suelos, que podría perfeccionarse en un futuro de disponerse de mayor volumen de información e integrarse mayor cantidad de factores (Arzola, 1999). Este sistema se basa en una evaluación por puntos que integran los factores y categorías siguientes:

Profundidad efectiva: es la profundidad del suelo que pueden alcanzar las raíces del cultivo (PE)

Profundidad (cm)	Categoría	Puntuación
<22	Poco profundo	0
22-40	Med. profundo	1
>40	Profundo	2

Materia orgánica del suelo en por ciento (MO)

Contenido	Categoría	Puntuación
<1.0	Bajo	0
1.0-3.0	Medio	1
>3.0	Alto	2

Conglomerados o Inclusiones del suelo, en por ciento (I): contenido en la capa arable del suelo, puede ser; concreciones (I^c), gravas (I^g) 0.2-7.5cm., piedras (I^p) >7.5cm.

Contenido	Categoría	Puntuación
>20	Mala	0
<20	Buena	1

Textura del suelo (T): determinada en la capa arable del suelo y clasificada en los grupos establecidos por klimes para la clasificación textural de los suelos cubanos.

Textura (T)	Categoría	Puntuación
Arenoso a loam arcillo-arenoso	Mala	0
Loam arcilloso a arcilla	Buena	1

Drenaje (D)	Categoría	Puntuación
	Malo	-0.5
	Bueno	0

Un suelo se considera de “mal drenaje”, si una vez saturado de agua, se mantenía encharcado (a pesar de no caer más lluvias) durante un periodo >6 días; en ese caso se resta 0.5 a la puntuación total (por ello el mal drenaje se distingue por puntuaciones fraccionarias) y de “buen drenaje” si esto ocurre en ≤ 6 días. Un suelo se considerará “secante”, cuando una vez saturado drene el agua gravitacional en menos de 3 días, lo cual no altera el valor de su aptitud (coincide con suelos de baja reserva nutricional), debido a que ello se puede corregir con el riego.

El número de puntos que identifica un suelo (P) se calcula mediante la suma de las puntuaciones alcanzadas en cada una de las características individuales antes mencionadas, es decir: $P = PE + MO + I + T + D$.

De evaluarse de cero, la profundidad efectiva (PE), las inclusiones (I), la textura (T) o el contenido de materia orgánica (MO), estas letras aparecerán como exponente del número que identifica la aptitud del suelo. Por ejemplo, un suelo cuya aptitud se evalúa de 3 y posee más de 20% de concreciones, se expresará con la notación siguiente; 3^{lc}. El exponente indica la(s) característica(s) limitante(s) del rendimiento del cultivo.

Para la calibración del sistema de evaluación antes mencionado se recopiló información de experimentos de campo en que existía un excelente manejo de las plantaciones cañeras y de áreas de producción en que se realizaba un adecuado manejo asociándose los rendimientos obtenidos en esos casos con la puntuación (P) de los suelos presentes en esas áreas. Este sistema de evaluación de suelos mediante puntos (mayor puntuación equivale a mayor potencial de rendimiento del

suelo) fue calibrado a través del ajuste a ecuaciones de regresión ($Y = \text{Rendimiento}$, $X = \text{Número de puntos del suelo}$).

En ambos casos (áreas experimentales y de producción) se encontró relación entre la puntuación del suelo y los rendimientos de los retoño (Figuras 2.16 y 2.17). Es de señalar que, suelos con igual puntuación pueden provenir de combinaciones muy diferentes de propiedades, por lo que la variabilidad del rendimiento en localidades con igual puntuación puede ser relativamente amplia, esta es una razón, para establecer rangos de variación para los rendimientos dentro de un rango de puntuaciones, tal como se propone en el Cuadro 2.13. La valoración que se logra con la escala propuesta consiste principalmente en ordenar los suelos en cuatro categorías, existiendo un orden según el cual, “apta” es superior a “medianamente apta”, esta lo es respecto a “marginamente apta” y la peor sería la “no-apta”.

CEPA: Retoño

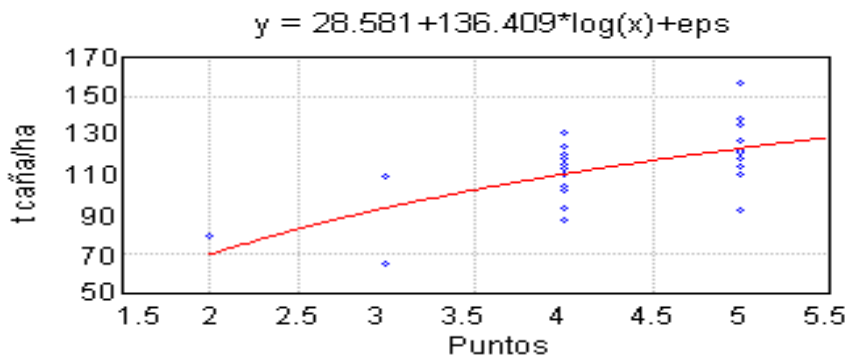


Figura 2.16. Relación entre las toneladas de caña/ha y la puntuación del suelo (áreas experimentales) (Arzola, 1999).

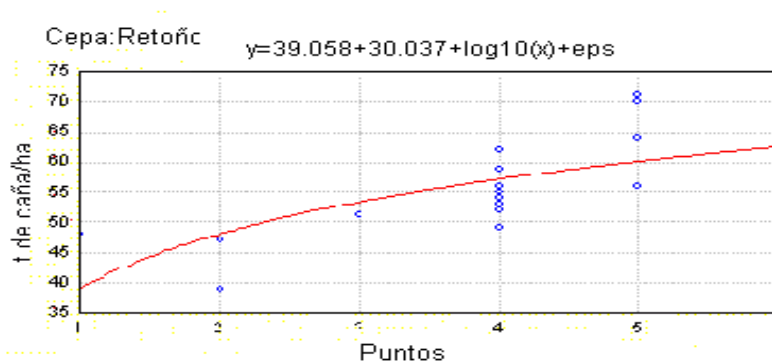


Figura 2.17. Relación entre las toneladas de caña/ha y la puntuación del suelo (áreas de producción con buen manejo agrícola) (Arzola, 1999).

Cuadro 2.13. Evaluación de la aptitud física de los suelos para la producción de caña de azúcar (t de caña. ha⁻¹) (Arzola, 1999)

Puntos (P)	Aptitud del suelo	Áreas experimentales	Áreas de producción
≤2.0	No Apto	< 70	<50
2.01 - 3.50	Marginalmente apto	70.1-100	50.1-55
3.51-4.50	Medianamente Apto	100.1-115	55.1-60
> 4.50	Apto	>115	>60

Por lo general, no se evalúa aisladamente el suelo para la ubicación de un cultivo, sino el ambiente en general (suelo y clima) y entonces se nombra evaluación de tierras.

La posibilidad de existencia de un cultivo en una localidad, está en principio determinada por los componentes climáticos, como la temperatura y la radiación solar, los cuales el hombre no puede modificar, pero si es posible ajustar las fechas de siembra y de cosecha atendiendo a dichos factores. Una gran importancia para la producción de arroz posee, la radiación solar en el periodo comprendido entre la formación del primordio y la floración, por esa razón, el rendimiento de este cultivo dependerá en gran medida de cuando se siembra y recolecta el mismo (Álvaro, 2006). Para una región donde los factores no modificables del clima, permiten la existencia de un cultivo, la lluvia, de no existir regadío, es el principal factor a considerar.

La influencia del clima está estrechamente relacionada con las características de la especie de planta y como en los países del trópico, varía la intensidad de la radiación solar, la temperatura y la lluvia durante los meses del año, ello puede ser aprovechado por el hombre en su beneficio. En el Caribe, la época de lluvia y elevadas temperaturas ocurre, entre los meses de Mayo-Octubre, en ese periodo solo se benefician las plantas de tipo C-4(caña de azúcar, maíz y pastos), pero las plantas C-3(papa, tomate, frijoles, arroz, lechuga, etc.) solo pueden sembrarse en el periodo de menor temperatura y menor lluvia, siempre que exista riego (Noviembre-Abril). De no contarse con riego, es imposible una producción aceptable de muchos cultivos necesarios para la alimentación humana durante los meses de Noviembre-Abril (todos los C-3), mientras que solo maíz, caña de azúcar, pastos y malas hierbas, se ajustan al periodo lluvioso, donde cada día son más frecuentes y devastadores los ciclones.

En la provincia de Cienfuegos, como parte de un trabajo realizado en las áreas cañeras de todas las provincias en Cuba, se evaluó el potencial productivo de las tierras (aptitud física), a partir de la información generada de un estudio de suelo realizado y de la evaluación de los factores edáficos a nivel de parcelas. El sistema utilizado fue el de Mesa y Mesa (1993) que define cuatro categorías: Tierras Sumamente Aptas (A₁), Tierras Medianamente Aptas (A₂), Tierras Marginalmente Aptas (A₃) y Tierras No Aptas (N). Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 2.18 y sirvieron como un elemento fundamental para reubicar el cultivo de la caña de azúcar a las tierras con mejor aptitud y dedicar las restantes a otra opción de uso.

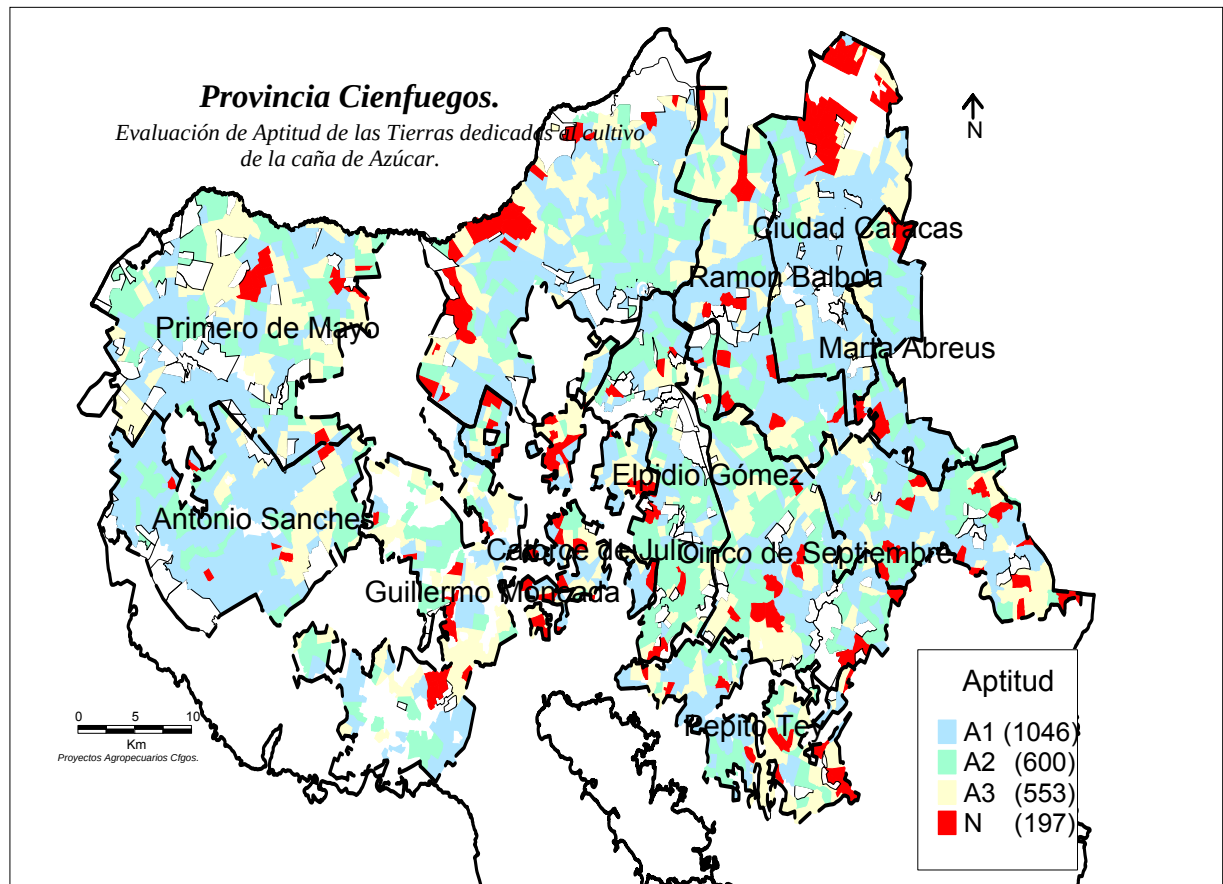


Figura 2.18. Distribución de las áreas cañeras atendiendo a la aptitud física de sus tierras para el cultivo de la caña de azúcar en la provincia de Cienfuegos, Cuba (Arzola et al., 2001).

La aptitud de las tierras, representa un potencial de rendimiento para un cultivo, el cual puede aprovecharse en mayor o menor medida, dependiendo del manejo agronómico. Este último, varía en función del hombre (aptitud y actitud de este) y de los recursos y tecnologías de que disponga. En países de Centroamérica, como Nicaragua (que es el de mayor superficie), se obtienen pobres resultados productivos y económicos en la agricultura, a pesar de:

- Disponer la región de la costa atlántica de grandes reservas fluviales (numerosos ríos), elevadas precipitaciones, debido a que las masas de aire húmedo procedente del Atlántico al chocar con la cordillera Centroamericana provocan precipitaciones de 4000 y 5000 mm. anuales, por esa causa, ha sido intenso el lavado de sílice y bases y es frecuente la presencia de suelos muy desarrollados en las montañas, estos aunque de buenas propiedades físicas requieren de elevadas dosis de fertilizantes y de encalado por la presencia de aluminio a niveles tóxicos y/o insuficiencia de calcio o magnesio

- Una vez seca esa masa de aire al atravesar la cordillera llega a las tierras de la zona del Pacífico donde no existen elevadas precipitaciones, pero si elevadas reservas de agua (lago Managua y Nicaragua) y suelos muy fértiles de origen volcánico, que podrían suministrar abundantes cosechas de implementarse el regadío.

Tanto en las tierras aledañas de la costa atlántica como del pacífico, sería posible alcanzar una elevada producción agrícola, pues los factores limitantes que se presentan podrían ser modificados por el hombre de disponer este de los recursos, el conocimiento y la voluntad para ello, pero las limitaciones socioeconómicas del país y no las naturales, son la principal atadura de la producción agrícola.

2.2. Manejo agronómico de las plantaciones

Atendiendo a los factores edáficos que limiten el rendimiento del cultivo se deberán seleccionar las medidas a emplear para eliminar o atenuar el efecto depresivo de estos sobre los rendimientos, por ejemplo, el cultivo y laboreo profundo del suelo puede resultar muy beneficioso en suelos donde la aireación y el exceso de humedad son factores limitantes (Gley), pero no así en los sueltos y bien aireados (Cairo, 1980). La correcta selección del paquete tecnológico a emplear en cada unidad mínima de manejo agrícola, requiere de un detallado estudio de suelos y de la selección e implementación del mismo, pero en muchas regiones de Latinoamérica y el Caribe, más bien la tradición, el empirismo y las limitaciones de recursos deciden el manejo agronómico a utilizar; un ejemplo de agricultores mexicanos dedicados al monocultivo de la caña de azúcar, ubicados en zonas de Oaxaca y Veracruz permite ilustrar este aspecto.

En la Figura 2.19 se puede apreciar al comparar las fotos que se señalan en parejas, como varían las prácticas de manejo agronómico utilizadas por los productores en la zona mencionada, como son: con y sin recogida de rocas (1 y 4); quema y cubierta de paja (2 y 5); protección o no de la erosión con el método de plantación (3 y 6); solo algunos agricultores utilizan la cosecha mecanizada(7);no existe riego, por lo que la sequía suele ocasionar estragos(8) y solo escasas excepciones emplean abono orgánico(9).

Las diferencias en el manejo agronómico no se fundamentan en un estudio de suelos, pues bajo condiciones similares productores diferentes utilizan manejo agrícolas diferenciados y también lo contrario, bajo condiciones diferentes utilizan la misma práctica, como sucedía con el empleo de una sola fórmula y dosis de fertilizante completo para toda el área de abasto cañero del ingenio, hasta que se realizó el primer estudio de suelos (INICA, 1990).

Con el monocultivo se reduce la cubierta vegetal y los suelos (con las prácticas tradicionales de preparación) permanecen desnudos por largos periodos de tiempo, en ocasiones coincidiendo esto con las condiciones más propicias para el arrastre de partículas como arcilla y materia orgánica. La erosión del suelo no sólo se produce por efecto de la pendiente y la escorrentía, sino también por el mal uso del riego, que incluso en lugares llanos puede arrastrar el horizonte superficial del suelo.

A este efecto de la erosión se le añade el uso casi exclusivo (excepto escasas excepciones) de fertilizantes químicos en lugar de abonos orgánicos y la “generalizada” quema de los restos de cosecha. Por ello, disminuye el contenido de materia orgánica del suelo y la estabilidad de los agregados.

La pérdida de los restos de cosecha, tiene consecuencias directas sobre el cultivo y los organismos vivos que interactúan con él, el quemar la caña de azúcar antes de la cosecha con el propósito de incrementar la productividad en el corte, eliminar serpientes y otros animales venenosos y facilitar las labores agrícolas para la próxima cosecha, puede haberse afectado en gran medida la población de serpientes las

cuales se alimentan de animales como el ratón, de esta forma incrementa la cantidad de roedores que producen apreciables perdidas en los cañaverales. Los productores no quieren abandonar, ni siquiera la práctica de requemar los restos después de la cosecha de la caña quemada, aun cuando el peligro de las serpientes sea remoto y la cosecha ya fue realizada, debido a que los ratones encuentran un excelente hábitat cuando se dejan los restos de cosecha y ha desaparecido el control natural.

En Ecuador donde también se quema la caña y existe la situación antes mencionada tratan de restablecer el equilibrio biológico aumentando el número de gavilanes y ubicando postes que le sirven para posarse y vigilar el entorno, mientras en Brasil cosechan la mayor parte de la caña verde con maquinas(en ellas está protegido el operador de animales venenosos) y tienen los equipos e implementos especializados para realizar todas las labores agrícolas y conservar la cubierta de paja después del corte, de esta forma, conservan el suelo, el entorno y la fauna.

Las diferencias mencionadas hacen evidente que se requiere de la diferenciación de todas las prácticas agronómicas de la región atendiendo a la variabilidad de propiedades de ambientes existentes y con una base de conocimientos que permita establecerlas con un fundamento científico-técnico y no como hasta ahora, qué en muchas regiones, el manejo agronómico se soporta en la tradición, experiencia de los ancestros y posibilidades de los agricultores. Desde luego, esto debe estar sustentado por un mayor apoyo de los gobiernos de la región a los productores agrícolas, para que los mismos puedan disponer de los recursos necesarios y ser competitivos a nivel internacional.

1.-Afloramiento rocoso



2.-Requema



3.-Surcos a favor de la pendiente



4.-Recogida de rocas



5.-Cubierta de paja



6.- Plantación en contorno



7.-Cosecha mecanizada



8.-Efectos de la sequía



9.- Aplicación de cachaza



Figura 2.19. El manejo agronómico diferente de los productores no se ha sustentado en diferencias varietales y ambientales (Ingenio La Margarita, Oaxaca, México) (Arzola, 2003).

En Latinoamérica y el Caribe también aparece un campesino creativo, capaz de enseñar con sus prácticas agroecológicas al más ilustre profesor o académico, un ejemplo es José Casimiro González, de la provincia de Sancti Spiritus en Cuba, el cual, aprovecha todas las potencialidades de su finca, protege el entorno de la

contaminación, ahorra recursos naturales, mejora los suelos y produce alimentos de excelente calidad biológica.

Casimiro posee una gran variedad de cultivos y de animales domésticos que le suministran lo suficiente para alimentarse los 5 integrantes de su familia y tener un excedente productivo en sus 10 ha de tierra, no utiliza pesticidas, herbicidas ni fertilizantes minerales ya que ha creado defensas naturales contra las plagas y aprovecha las excretas de los animales como abono. La cría de lombrices, genera humus y un extracto líquido del proceso de humificación que utiliza como abonos.

La preparación de los suelos, surquear y labores de cultivo la realiza con un implemento multipropósito inventado por él, que tirado por bueyes es empleado en maíz, frijol, caña de azúcar, arroz, etc. Este productivo y eficiente implemento es capaz de preparar tres surcos simultáneamente en cultivos como el frijol o el arroz, su deshierbe es perfecto; aunque a la eliminación de las hierbas también contribuyen un simpático bando de ocas. No requiere energía de combustibles fósiles para sus labores agrícolas pues dispone del implemento anteriormente mencionado, el agua de una micro presa la traslada mediante una bomba de ariete hasta tanques situados en su casa (mas de 200m. de distancia), la extracción del agua subterránea de los pozos es con molinos de viento; tampoco requiere de una fuente de energía externa para cocinar, ya que dispone de un rustico fogón de leña. Actualmente esta por terminar un digestor para obtener biogás de las aguas albañales.

Los cercados son naturales con piña ratón, la que a menudo está acompañada por arbustos de leucaena cuyas hojas utiliza para alimento animal. Estos cercados seguros y permanentes, brindan a su vez un adecuado hábitat para diferentes especies, las que no se ven afectadas por productos químicos.

Casimiro es un ejemplo de lo que puede hacer un pequeño agricultor, con limitados recursos (como existen millones en nuestra América). Para él y su familia forma parte de su vida, ser autosuficientes en alimentos y energía, mejorar sus suelos, proteger el entorno, la biodiversidad y los recursos naturales (Figura 2.20).



Figura 2.20. Finca de Casimiro (implemento multipropósito surcando, recogiendo el extracto líquido de la producción de humus de lombriz con estiércol vacuno, cerca viva de piña ratón, cocina rustica de leña) (Arzola, 2009).

Barreto (2005) señala que la sostenibilidad agrícola significa equilibrio armónico entre el desarrollo agrario y los componentes del agroecosistema, siendo necesario el uso adecuado de los recursos disponibles en la localidad, tales como el clima, suelo, agua, vegetación, animales y tradiciones agrícolas, para lograr una agricultura económicamente factible, ecológicamente protegida, culturalmente adaptada y socialmente justa, sin excluir los recursos externos utilizables como complemento de los locales.

2.3. Proteger los suelos para proteger el agua, la atmósfera y la biodiversidad

El carbono, elemento que sustenta la vida en el planeta, se presenta en forma orgánica o inorgánica, desde el punto de vista de un balance de este elemento en la biosfera, mientras en mayor proporción se encuentre en el suelo en la primera forma, menos consecuencias negativas existirán para el hombre por lo siguiente:

- Mayor proporción de carbono presente en el suelo en forma orgánica, significa, menos carbono orgánico en las aguas y en consecuencia mejor oxigenación de estas para que los peces puedan respirar.
- Mayor proporción de carbono presente en el suelo en forma orgánica, significa, menos anhídrido carbónico en la atmósfera, por tanto se contrarrestar el efecto invernadero que amenaza con originar un aumento de la temperatura de la atmósfera

y que se derritan parte de los hielos de los polos y que superficies actualmente pobladas queden sumergidas por el mayor nivel de las aguas.

- Mayor proporción de carbono presente en el suelo en forma orgánica, significa, mayores reservas nutricionales, mejores propiedades físicas, químicas y físico-químicas de los suelos, menor erosión y en resumen mejor fertilidad y capacidad productiva de los suelos.

Aunque los combustibles fósiles son la mayor fuente de carbono que incrementa el efecto invernadero, el carbono de la materia orgánica del suelo es la segunda mayor reserva que en el ciclo del carbono se presenta en forma orgánica (Scharpenseel y Jaramillo, 1994), por ello su conocimiento es necesario para lograr que el hombre pueda influir favorablemente en el ciclo del carbono.

Para disponer de información sobre el efecto del laboreo del suelo sobre su contenido de carbono, se realizó una comparación entre un área de un bosque de tecas y un área aledaña cultivada durante varias décadas, con caña de azúcar, en las cercanías del batey Espartaco, Cienfuegos, Cuba. En esta comparación se aceptó lo expuesto por Arrouays, et al. (1994) que establece como premisa que exista estabilidad en el contenido de C.O.T (Carbono orgánico total del suelo).

El contenido de C.O.T. fue superior en el bosque que en el agrosistema de caña de azúcar, lo que se hace más patente en el horizonte superficial (Cuadro 2.14).

Cuadro 2.14. Comparación de un agrosistema de caña de azúcar y un bosque artificial en un suelo Pardo sin Carbonatos (Arzola, 2007).

Profundidad (cm.)	Carbono orgánico (%)		*t de carbono.ha ⁻¹		
	Bosque	Caña	Bosque	Caña	Diferencia
0-15cm.	2.81	1.67	52.68	31.31	21.37
15-30cm.	1.97	1.17	36.94	21.94	15.00
30-45cm.	1.25	0.89	23.43	16.69	6.74
Total			113.05	69.94	43.11

La diferencia encontrada, tomada como referencia, indica que la tala de los bosques para el cultivo de la caña de azúcar en Cuba, podría haber representado en alrededor de 1.5 millones de ha dedicadas a este cultivo, 64.7 millones de t de carbono vertidas principalmente a la atmósfera. Es de destacar, que esto solo se refiere al carbono acumulado en el suelo, pues el bosque con mucha mayor biomasa que cualquier cultivo acumula gran cantidad de carbono, en hojas, tallos y raíces, por otra parte, los bosques naturales conforman diferentes pisos de vegetación y podrían superar como sumidero de carbono a este bosque artificial de tecas.

Las pérdidas anuales por mineralización del C.O.T. en los suelos del mundo se encuentran entre 2.5×10^9 t y 7.4×10^9 t de carbono, también se estima que el 27% del total de carbono almacenado en el suelo desde la era prehistórica ha sido perdido (Buringh, 1983).

Un menor contenido de C.O.T. del suelo, origina: menos reserva de nutrientes, menor capacidad de intercambio catiónico, peor estructura, menor retención de humedad, menor aireación, más compactación, mayor facilidad para la erosión y menor

población microbiana. Esto a su vez representa menor rendimiento del cultivo (menor biomasa de la caña de azúcar) y mayor contaminación ambiental.

Otro estudio, fue realizado con el propósito de tener información sobre el empleo de diferentes prácticas agrícolas, sobre el contenido de COT del suelo, también se utilizó el cultivo de la caña de azúcar en la localidad antes mencionada.

Los mayores contenidos de COT se presentaron en el tratamiento con cachaza y los más bajos en el que se mantuvo bajo laboreo (Cuadro 2.15). Esto se puede explicar por el elevado aporte de carbono de la cachaza y por la mayor tasa de descomposición de los compuestos orgánicos que posee el suelo bajo laboreo (Sánchez, 1976).

Cuadro 2.15. Contenido de carbono en el suelo Pardo sin carbonatos sometido a diferentes manejos agronómicos (promedio de todos los muestreos) (Arzola, 2007).

Indicador	Suelo desnudo		Caña de azúcar	Cachaza 100 t .ha ⁻¹ .
	Sin labrar (sdsI)	Labrado (sdl)		
Carbono orgánico Total (%)	1,78	1,66	2,01	2,14
t de carbono orgánico total/ha	39.87	37.18	45.02	47,94
*Relación CFL/CFG	9.81	10.19	12.59	8.51

El suelo cultivado de caña de azúcar mostró la mayor relación entre la fracción fina/ fracción gruesa de carbono, lo que es un indicador de la mejor calidad de la materia orgánica acumulada en el suelo con ese tratamiento, pues a la fracción fina se le atribuye gran importancia en la fertilidad del suelo.

La variación del C.O.T a través del tiempo, cuando se han utilizado diferentes prácticas agrícolas, muestra que el suelo desnudo sin laboreo (sdsI) o sea en barbecho (pero extrayendo de la parcela la vegetación natural que se formaba), incrementa ligeramente su contenido de C.O.T, por encima del suelo desnudo bajo laboreo (sdl), lo que se podría explicar por la mayor aireación del suelo bajo laboreo y la consecuente mayor tasa de mineralización de los compuestos orgánicos presentes en el suelo. La aplicación de cachaza incrementó apreciablemente el contenido de C.O.T al año de la aplicación, pero posteriormente dicho contenido disminuyó hasta valores solo ligeramente superiores al inicial, lo que evidencia la alta tasa de mineralización de este abono bajo condiciones tropicales.

De forma sostenida solo el cultivo de la caña de azúcar (sin quemas) incrementó el contenido de C.O.T. del suelo, pues al transcurrir tres años, presento los mayores valores de ese indicador, lo que puede atribuirse al aporte de paja, raíces y otros restos orgánicos que parecen formar compuestos estables en el suelo (humus)..

El menor contenido de C.O.T. se presento en el suelo bajo laboreo, esto sugiere que es beneficioso mover el suelo durante su preparación lo menos posible y el menor

tiempo posible, para disminuir de esa forma la tasa de mineralización de los compuestos orgánicos del suelo y las pérdidas por erosión.

Dejar el suelo sin sembrar disminuye el contenido de C.O.T. con respecto a cuándo permanece plantado de caña de azúcar, en otras palabras, el suelo debe permanecer el mayor tiempo posible con caña de azúcar (Arzola, 2007), aunque esta opción resulta inferior a tener el suelo cubierto de bosque.

Castro (2006a) reporta, a partir de la revisión de trabajos realizados por varios autores, que la reducción de las emisiones de carbono en Centroamérica, mediante el empleo de diferentes métodos, como son, incrementar las plantaciones de bosques y disminuir la deforestación podría representar el dejar de verter a la atmósfera entre 6.2-6.5 millones de t de carbono anuales.

Según Castro (2006b) Costa Rica ha sido pionera en el desarrollo y venta de créditos de reducción de emisiones. Los créditos costarricenses eran principalmente el resultado de convertir pastizales y campos cultivados en bosques, puesto que el crecimiento del bosque absorbía los gases de dióxido de carbono que contribuían al calentamiento global. En 1996, Costa Rica vendió exitosamente sus primeras 200.000 toneladas de créditos de reducción de emisiones de carbono por \$10 la tonelada de carbono.

Utilizando los resultados promedio de ocho modelos, sin comercio internacional el costo marginal de una tonelada de reducciones de emisiones de carbono sería \$164 en Estados Unidos, \$260 en Europa y \$277 en Japón. Si se permitieran negociaciones con los países en desarrollo, el costo marginal bajaría incluso a \$28 la tonelada.

Un bosque acumula más materia orgánica en el suelo que cualquier cultivo, incluso que la caña de azúcar, pero esta última produce mayor cantidad de biomasa por unidad de tiempo, acumula el carbono con mayor rapidéz y por lo tanto protege más del efecto invernadero. Si este efecto más eficiente de la caña de azúcar y de otros cultivos C4 como sumideros de carbono, no se valora en toda su magnitud es porque la mayor parte de la biomasa formada por estos cultivos es aprovechada por el hombre con diferentes fines, uno de los cuales es producir energía y sustituir combustibles fósiles, en tanto que, en un bosque la biomasa formada o bien se mantiene almacenada en la vegetación o se incorpora al suelo como materia orgánica.

Si se compara un bosque con un cultivo como la caña de azúcar, esta última bien podría recibir un valor adicional por su contribución a atenuar las emisiones de anhídrido carbonico a la atmosfera, sustituir combustibles fósiles y proteger el nivel orgánico de los suelos.

2.4. Estudio detallado de suelos

El rendimiento de un cultivo está influenciado por un gran número de factores tanto internos (genotipo) como externos (ambiente) y el hombre debe emplear en dependencia de ellos un manejo agrícola que le permita alcanzar los mejores resultados para las generaciones actuales y las futuras.

El primer estudio de suelos con el propósito de lograr un manejo integral de las plantaciones cañeras fue realizado por el INICA en el año 1990 (INICA, 1990) en el ingenio La Margarita S.A. de C.V., posteriormente fue actualizado al transcurrir varios años. Las zonas abarcadas se ubican en las franjas colindantes de los Estados de

Oaxaca y Veracruz, donde se encuentran los poblados de Tierra Blanca y Vicente Camalote, como los de mayor densidad de población.

Posteriormente varios estudios con características similares se realizaron en diferentes países y recientemente se terminó uno en las zonas de abasto del ingenio Ecudos S.A. de C.V. en Ecuador (INICA, 2007), el que incluyó, un amplio paquete de recomendaciones. En su ejecución se pueden considerar estos estudios divididos en dos etapas que serán tratadas a continuación:

El esquema metodológico general utilizado consiste en elaborar un mapa semidetallado de los suelos, evaluar los factores edáficos potencialmente limitantes y tomar por UMMA una muestra de suelo compuesta. Este trabajo se desarrolla en las siguientes etapas:

1. *Preparatoria* (recopilación y procesamiento de información: catastral, edafoclimática, de manejo, etc.).
2. *De campo* (calicatas, puntos de observación, evaluación de factores limitantes, muestreos de suelo y foliar).
3. *Laboratorio*(Análisis y control de calidad de los resultados)
4. *Elaboración del mapa de suelo, temáticos y del informe final*

En función del método de análisis paisajístico y la confección de patrones se identifican los elementos estructurales y de componentes, con características definidas en las fotografías se realiza en gabinete la interpretación y delimitación inicial de las unidades foto edafológicas. La precisión del trabajo de interpretación de gabinete se complementa con la comprobación en el campo.

La ejecución del trabajo contempla el reconocimiento general de la zona de estudio, toma de puntos con barrena agrológica, trazado de las líneas de suelo, selección de las áreas de muestreo, apertura de perfiles y toma de muestra.

Para la identificación y separación de los contornos de suelo se toman puntos de observación con barrenas agrológicas o minicalicatas, aspecto que permite delimitar las unidades Taxonómicas de suelo y las áreas de muestreo donde se realizan los perfiles edafológicos.

Estos estudios incluyen un mapa de suelo, que consisten en la representación gráfica de la zona estudiada, en la que aparecen reflejadas sobre un papel los diferentes tipos de suelos separados por sus contornos.

En cada contorno de suelo aparecerá una fórmula que permita conocer la clasificación taxonómica del suelo y sus propiedades principales, un ejemplo aparece en la Figura 2.21.

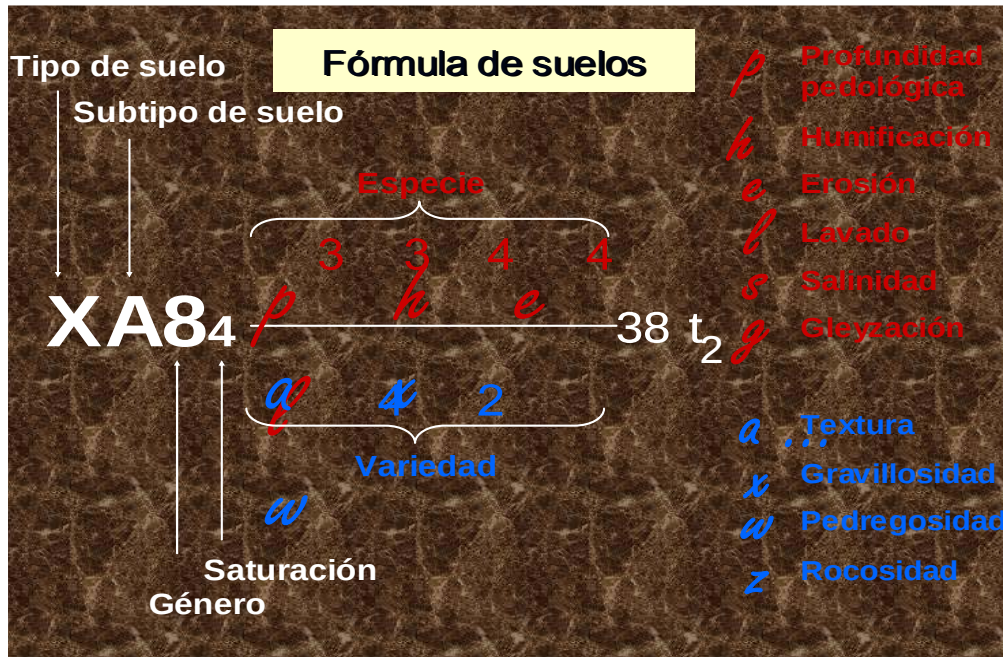


Figura 2.21. Fórmula de suelos que identifica cada contorno del mapa

La evaluación de los factores edáficos que inciden en el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar se realiza según metodología de la FAO (1977) adaptada por el INICA (1993), los resultados de estudios investigativos realizados por investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Cuba (INICA).

Actualización del estudio de suelos

Cada vez que transcurre un ciclo de cosechas y conociendo que la fertilidad de los suelos está condicionada por diversas propiedades químicas, físicas, biológicas y por factores sociales y económicos, todos en constantes cambios y transformaciones, se realiza la actualización del estudio. El muestreo se realiza con barrena agrológica a una profundidad de 0-25 cm. por la diagonal de la parcela (Figura 2.22). Se toman entre 30 y 50 submuestras para conformar la muestra compuesta, en dependencia de las dimensiones de la parcela y las características del relieve.

El peso fundamental de la actualización es la recomendación de fertilizantes y enmiendas, dado que las variables que definen la necesidad de ello, varían con mayor rapidez en el tiempo que otras que resultan más estables y que ya fueron inventariadas en el estudio de suelos.



Figura 2.22. Toma de muestras de suelo con la barrena agrológica en áreas de abasto cañero del Ingenio La Margarita, Oaxaca, México (Arzola, 2003).

Procesamiento de la información

Un trabajo tan integral, exhaustivo y metódico requiere de una alta integración multidisciplinaria y la manipulación de gran volumen de información que sólo es posible procesar con el uso de sistemas automatizados, el cual, debe estar diseñado para integrar, de modo eficiente, los modelos matemáticos, reglas de decisión, algoritmos, resultados del estudio así como asegurar el seguimiento de la respuesta productiva a las recomendaciones que resulten de éste (Figura 2.23).

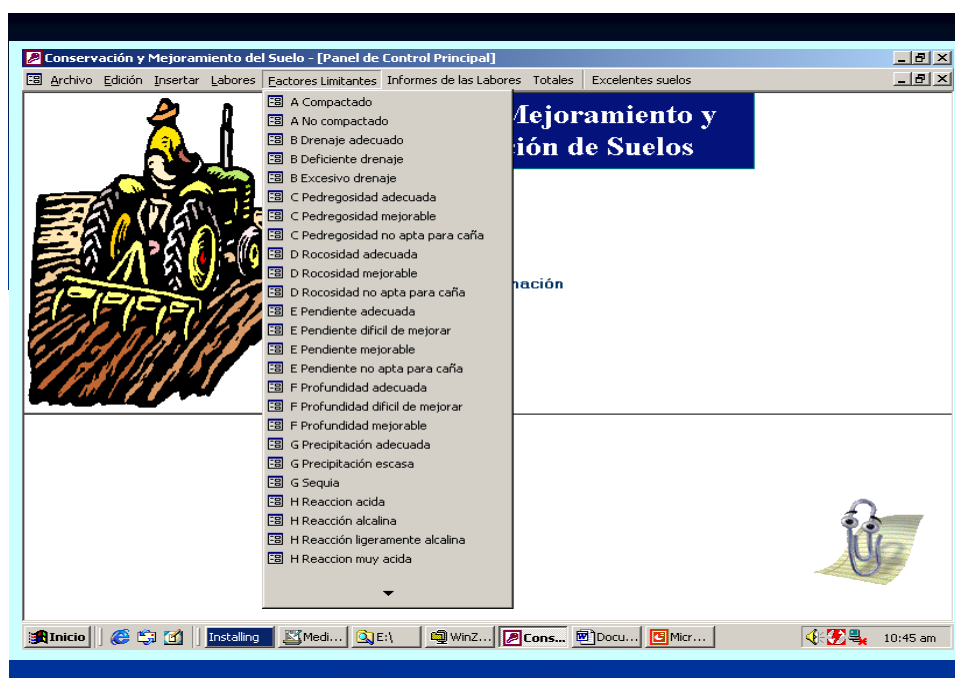


Figura 2.23. Servicio automatizado de recomendación de medidas de conservación y mejoramiento de suelos (Mesa y Arzola, 2006).

Entrega de la información

La información es entregada al cliente, en una reunión en que participan técnicos y dirigentes de la entidad, la misma incluye el informe central, anexos, mapas de suelo, temáticos y software especializados (Figura 2.24), siempre se le brinda gran atención a lo relacionado con el empleo de fertilizantes y enmiendas, posteriormente se realiza la implementación de todas las recomendaciones emanadas de dicho estudio,



Figura 2.24. Entrega de la información al cliente al concluir un estudio de suelos en el ingenio Ecudos, S.A.de C.V., Ecuador (Arzola, 2006)

Bibliografía Consultada

Alvaro, C.: Las variedades de arroz de alto rendimiento y la industria molinera. II Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006(CD con ponencias del evento).

Arrouays, D.; Pelissier, D.; King, D.; Le Bissonnais, Y.: Changes in carbon storage in humic soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. A geographical study for a reliable estimation of global carbon release in a small natural area. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco. México, 1994:221-234pp.

Arzola, N.: Untersuchungen uber Wachstumsstorungen von Reis auf einer Boden in Anbaugebiet Majagua, Kuba. Diss z Promotion A K-M-Universitat, Leipzig, 1980.

Arzola, N.: Guía metodológica para la clasificación agroproductiva de los suelos cañeros. Resultado Resolución 34/98 CITMA, Provincia de Cienfuegos, Cuba, 1999.

Arzola, N.: Manejo agrícola de las aéreas cañeras en armonía con el ciclo biogeoquímico del carbono y el nitrógeno y la fertilidad de los suelos.VIII Taller Nacional del Medio Ambiente. Bayamo, Cuba, 2007.

Arzola, N. y Elisabeta Hernández: Evaluación de la Aptitud Física de las Tierras de la Provincia Cienfuegos.Primer Aproximación.Cienfuegos, Cuba, 2001.

Arzola, N.: Fotos tomadas durante la actualización del estudio de suelos para el manejo integral de las plantaciones cañeras. Ingenio La Margarita S.A. de C.V., Oaxaca México, 2003.

Arzola, N.: Fotos tomadas durante la realización del estudio de suelos para el manejo integral de las plantaciones cañeras. Ingenio Ecudos S.A. de C.V., Ecuador, 2006.

Arzola, N.: Fotos tomadas durante la realización del proyecto para el aprovechamiento integral de los residuos de los polígonos de producción de alcohol y levadura torula.Venezuela, 2008.

Arzola, N.: Foto tomada en Machu Pichu, Peru, 2010.

Arzola, N.: Fotos tomadas en recorridos en las provincias de Sancti Spiritus y Villa Clara, Cuba, 2009.

Bachmann,J.:Auswirkungen der organischen Substanz verschiedenen Zersetzungsgrades auf physikalische Bodeneigenschaften Tesis. Univ. Hannover, 1988.

Barreto, B.: Caracterización de la Gestión Agraria Sostenible de la Empresa Efraín Alfonso a través de un Set de Indicadores de Sostenibilidad. Tesis de Maestría en Agricultura Sostenible. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.2005: 53pp.

Bergmann, W. y Neubert, P. :Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse.Gustav Fischer Verlag. Jena, 1976:346pp.

Black, C.A.: Soil-Plant Relationships. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, London, Sydney.1968:792 pp.

Botero, R.: Manejo de excretas en sistemas agropecuarios integrados amigables con el ambiente tropical. Universidad Herat de Costa Rica. II Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006(CD con ponencias).

Bowen, E., A.; Kratky, A.: Compactación del suelo. Causas, efectos y como reducir los daños. Agric. Amer., 34 (6), 1985:10-14pp.

Bower, C.A.; Harper, W.G.; Moodie, C.D.; Overstreet, R.; Richards, L.A.: Report of the nomenclature committee appointed by the board of collaborators of the U.S. Salinity Laboratory. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22 (1958): 270pp.

Buyanovsky, G.A.; Aslam, M.; Wagner, G.H.: Carbon turnover in soil physical fractions. Soil Sci. Soc. Am. J. (1994) 58: 1167-1173pp.

Buringh, P.: Organic carbon in soils of the world. In: Woodwell G.M., ed. The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle. John Wiley and sons. New York, 1983, 91-111pp.

Cairo, P.: Phisikalische Eigenschaften wichtiger Boden Kubas und ihre Beeinflussung durch Kulturmassnahmen. Leipzig, Karl-Marx Universitat Diss., 1980.

Camargo, O. A.; Valladares, M. A.: Característica química y física de solos que recebeu vinhaca por longo tempo. Campinas. Instituto Agronómico. Boletín Técnico 76, 1983: 30pp.

Castro, R.: Agricultura Sostenible: Oportunidades con Mercado Global de CO₂. II Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006a (CD con ponencias).

Castro, R.: Los bosques de Costa Rica y el impacto del Protocolo de Kyoto. II Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006b (CD con ponencias).

Chapman, H.D.: Cation exchange capacity Agronomy 9(1965):891-901pp.

Chapman, H.D.: Total exchange bases. Agronomy 9(1965 a):902-904pp.

Daly, H.: Significado, conceptualización y procedimientos operativos del desarrollo Sostenible y posibilidades de aplicación en la agricultura. En: Cadenas, A.: Agricultura y desarrollo sostenible. Madrid, 1995: 387 – 398 pp.

Dumankis, J.: Strategies and opportunities for soil survey information and research ITC J., 1, 1993.: 36-41pp.

Ellies, A.; Glez, R.; Ramírez, C.: Potencial de humectación y estabilidad estructural de suelos sometido a diferentes manejos. Agricultura Técnica. Vol. 55 (3-4) (1996): 220-225pp.

FAO. : A framework for land evaluation. Soil Bulletin 32, Rome, 1976.

FAO.: Guía para la descripción de perfiles de suelo. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas. FAO, Roma, 1977, 70 pp.

Fogliata, A. F.: Agronomía de la caña de azúcar. Tomo II. Tecnología. Costos. Producción. De el graduado, Tucumán, 1995: 1080 pp.

FAO.: Directiva evaluación de tierras para la agricultura en secano. Boletín de suelos de la FAO, 52 Roma, 1985.

FAO: World Reference Base (WRB) for Soil Resource. ISSS-ISRIC-FAO. 1992.

Fogliata, A. F.: Agronomía de la caña de azúcar. Tomo II. Editorial Tecnología. Costos de Producción. Tucumán, Argentina, 1995: 1080 pp.

Fowkes, F. M.: Attractive forces at interfaces. Industrial and Engineering Chemistry. Washington D. C. 56(12) (1964):40-52pp.

Grupo de técnicos de PDVSA-AGRÍCOLA: Visita realizada a Brasil para conocer sobre el empleo de la vinaza en el fertirriego de la caña de azúcar. Brasil, 2008. 28pp.

Hernández, A.; Ascanio, O.: Desarrollo y estado actual de la clasificación de suelos en el mundo y en Cuba. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes V-24. Varadero, Cuba. 2001.

Hernández, A.; Morales, M.; Ascanio, M.O.; Morell, F.: Manual para la nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba(s/a).

INICA: Resultados del estudio de suelos para el manejo integral de las plantaciones cañeras ingenio "La Margarita", Oaxaca, México, 1990:123pp.

INICA: Actualización del estudio de suelos y perfeccionamiento de los criterios para el manejo de los fertilizantes. Ingenio Don Pablo Machado Llosas. 1998: 32 pp.

INICA: Resultados del estudio de suelos para el manejo integral de las plantaciones cañeras ingenio "Ecudos S.A. de C.V.", Ecuador, 2007:128pp

Jenkinson, D. S.; Rayner, M. J. H.: The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Sci. 123 (1977) 298-305pp.

Martínez, F.; Calero, B.; Calderon, E.; Valera, M.; Ticante, J.: Transformación de los restos orgánicos en los suelos y su impacto ambiental. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Martínez, F.; Cuevas, G.; Iglesias, M. T.; Walter, I.: Efectos de la aplicación de residuos orgánicos urbanos sobre las principales características químicas de un suelo degradado. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Mesa, A.; A. Mesa.: AGRO24. Sistema para el cálculo del potencial productivo de los suelos. Versión 4.0. Agrosoft, CNSF. MINAG, Cuba, 1993.

Mesa, S.; Arzola, N.: Servicio automatizado de recomendación de medidas de conservación y mejoramiento de suelos. Memorias del Sexto Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe (ATALAC).Guayaquil, Ecuador, 2006:309-312pp.

Roldós, J.: Evaluación de algunos factores edáficos limitantes de la producción de caña de azúcar. Resumen de la tesis presentada en opción al grado científico de candidato a doctor en ciencias agrícolas. INICA, La Habana, Cuba. 1986:40pp.

Rossiter, D.: Land Evaluation. Lecture notes. Cornell University. Collage of agriculture and life sciences. SCAS Teaching Series T 94-1, 1994.

Rod, D.; Lefroy, B.; Blair, G.: The Dynamics of soil organic matter changes resulting from cropping. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco. México, 1994: 235-245pp.

Rühlmann, J.: A.: New approach to estimating the pool of stable organic matter in soil using data from long-term field experiments. Plant Soil. 213(1999) 149-160pp.

Ruiz S.R.; Navia P.T.: Determinación de microelementos en suelo mediante el método DTPA (ácido dietilen triamino penta-acético). Agricultura Técnica (Chile). 40(2) (1980)80-82pp.

Sánchez P.A.: Suelos del trópico, características y manejo. Editorial IICA. Costa Rica, 1981: 671 pp.

Scharpenseel, H.W.;Jaramillo, V.J.: Words of introductions by the Convenor of Symposium. 15thWorld Congress of Soil Science. Acapulco. México, Vol. 9 (1994), 149pp

Shepashenko, G. L.; Riverol, M.: Regularidades de la manifestación de la erosión hídrica acelerada de los suelos en las condiciones tropicales de Cuba. Cien. Agric. 21: (1984)125-127pp.

Soil Survey Staff.: Keys to Soil Taxonomy.USDA.NRCS. 9th Edition.2003:331pp.

U.S. Salinity Laboratory Staff: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.U.S. Dept. Ag. Handbook 60, 1954.

Weil, R. N.: Maize-weed competition and soil erosion in unweeded maize. Trop. Agri.59 (1982)207-213pp.

“Como la fotosíntesis y la respiración, probablemente ningún proceso en la Naturaleza es tan vital para la vida vegetal y animal como el intercambio de iones, entre las partículas de suelo y las raíces de las plantas.”

Brady

CAPITULO 3. EL COMPLEJO DE CAMBIO DEL SUELO Y LA ABSORCIÓN DE NUTRIENTES POR LAS PLANTAS.

3.1. Generalidades

Se considera que del volumen total del suelo alrededor de un 50% lo ocupan los materiales inorgánicos (45%) y la materia orgánica (5%), el otro 50 % lo ocupan los poros que pueden contener en mayor o menor medida aire o agua.

Los materiales inorgánicos son:

Arena: es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 mm. Una partícula individual dentro de este rango es llamada grano de arena. Una roca consolidada y compuesta por estas partículas se denomina arenisca.

Limo: es un material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Es un sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,002 mm. a 0,06 mm. De acuerdo a los resultados obtenidos en los suelos pampeanos, en estos materiales el valor de capacidad de intercambio por unidad de limo no es constante, variando entre 9 y 20 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ de limo, siendo mayor en los suelos de textura más gruesa (INTA, 2002).

Arcilla: coloide que se caracterizan por su extremadamente pequeño tamaño de partícula, (menor de 0,002 mm), presenta cargas eléctricas en las que pueden retenerse en forma cambiables los iones.

La *materia orgánica* puede estar en el suelo en diferentes grados de descomposición, su forma estable denominada humus. Sustancia que se origina a raíz de procesos químicos de descomposición y síntesis de restos orgánicos vegetales, y en menor medida animales, que se incorporan al suelo. La composición química del humus varía porque depende de la acción de organismos vivos del suelo, como bacterias, protozoos, hongos y ciertos tipos de escarabajos, pero casi siempre contiene cantidades variables de proteínas y ciertos ácidos urónicos combinados con ligninas y sus derivados. El humus es una materia homogénea, amorfa, de color oscuro, inodora y con cargas eléctricas negativas.

En el suelo, la materia orgánica se transforma, descompone o degrada hasta mineralizarse debido a la acción de microorganismos, todo este proceso natural da lugar a la humificación, proceso evolutivo mediante el cual a partir de la modificación de tejidos originales y de la síntesis de los organismos del suelo, se produce un conjunto de compuestos estables de color oscuro o negruzco, amorfos y coloidales, conocidos con el nombre de Humus. El humus está constituido por las huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.

Mediante los reactivos alcalinos, como NaOH, se separan las huminas (que son insolubles) de los ácidos fúlvicos y húmicos, que son solubles. Estos últimos se

separan mediante tratamiento ácido, generalmente CIH; los ácidos fúlvicos son solubles en CIH mientras que los húmicos son insolubles.

Las huminas, son la fracción insoluble del humus tanto en ácidos como en álcalis y componen un porcentaje considerable del humus. Los compuestos húmicos no extraíbles con reactivos alcalinos o huminas, constituyen un grupo de sustancias relativamente diferentes entre sí, cuyo origen puede tener lugar mediante la vía de herencia o la de neoformación. En el primer caso se encuentra la humina heredada.

La humina heredada está constituida por partículas de densidad menor de $1,8 \text{ g/cm}^3$ pero que al contrario que la materia orgánica libre, con la que presenta otras diferencias de tipo químico, se hallan retenidas en los agregados de la fracción pesada del suelo mediante uniones que no se rompen por medio de la agitación mecánica común pero si por la de los ultrasonidos.

El ácido húmico es un material orgánico de color oscuro insoluble en ácidos con carga negativa. Se presenta como un sólido amorfo de color marrón oscuro, generalmente insolubles en agua y en casi todos los disolventes no polares, pero fácilmente dispersables en las soluciones acuosas de los hidróxidos y sales básicas de los metales alcalinos, constituyendo un hidrosol que puede experimentar floculación mediante el tratamiento de los ácidos o los demás cationes.

El ácido fúlvico es el material sobrante en la solución una vez que se ha extraído el ácido húmico por acidificación. Constituye una serie de compuestos sólidos o semisólidos, amorfos, de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no precipitables por los ácidos, susceptibles en cambio de experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentración de las soluciones de cationes no alcalinos. Tiene carga negativa y es soluble en álcalis y ácidos. El humus influye en la capacidad de un suelo para retener y poner a disposición de la planta tanto aniones como cationes.

La capacidad de *intercambio catiónico* (C.I.C.) está dada por el ácido fúlvico y húmico afectando de manera positiva la disponibilidad de nitrógeno (en su forma amoniacal), potasio, calcio, magnesio, cobre, hierro, manganeso y zinc. La *capacidad de intercambio aniónico* (C.I.A.) está dada por las huminas y tiene influencia sobre la disponibilidad de nitrógeno (en su forma nítrica) fósforo, azufre, boro, molibdeno y cloro.

Los grupos funcionales más importantes de la materia orgánica del suelo son el Carboxilo (COOH) y el fenólico (OH), ambos actúan como ácidos débiles, lo que explica que la materia orgánica, le brinde carácter ácido a los suelos. La carga de la materia orgánica del suelo es variable, pero el PIE (punto de carga cero) ocurre a un pH en torno a 3, por lo que la carga será negativa en la inmensa mayoría de los suelos (por ser superior su pH a 3), aumentando ésta con el pH. Los valores máximos están entre 150 y 300 $\text{cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ (materia orgánica seca).

3.2. Importancia de la CIC del suelo

Tradicionalmente la fracción arcillosa y el humus son los coloides a que se le atribuye la existencia de cargas eléctricas que pueden intercambiar los iones del suelo y constituyen el complejo de cambio del suelo, a pesar de que el resultado reportado por INTA (2002) añade a esta relación el limo.

Los iones retenidos en el complejo de cambio se mantienen en equilibrio con los de la solución del suelo, de la cual pueden ser tomados por la planta y trasladados hasta

los lugares donde son utilizados, para hacer posible el desarrollo y crecimiento de la misma.

La reserva de nutrientes de los suelos depende de su CIC, ya que existe un equilibrio entre los iones que se encuentran en forma cambiante y los que están en la solución del suelo. De esta forma cuando los nutrientes son absorbidos por las plantas de la solución del suelo, inmediatamente son reemplazados por los que se encontraban en forma cambiante. De no existir esta propiedad como sucede en la arena, no existirá ese reemplazamiento y la planta no podría nutrirse, los nutrientes se perderían rápidamente por escorrentía y lavado y sería necesario suministrarlos como sucede en un cultivo hidropónico.

La CIC puede compararse a un almacén donde existen las reservas en tanto mayor medida mientras mayor sea, en el caso del suelo para ampliar ese almacén se requiere de arcillas de elevado valor de esa característica, de humus y del pH adecuado cuando esta propiedad varía con el grado de acidez del medio.

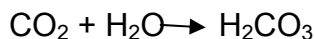
Por razones prácticas no se aplica comúnmente arcilla de elevada capacidad de intercambio catiónico a los suelos con el propósito de elevar la magnitud de esta propiedad, lo cual sería beneficioso no solo por aumentar las reservas nutricionales sino también hídricas.

Las rocas zeolíticas son minerales que se destacan entre otras propiedades por su elevada CIC y retención de agua y han dado buenos resultados donde esas propiedades limitan el rendimiento de los cultivos, como sucede en suelos arenosos y donde abundan los óxidos hidratados de hierro y aluminio.

El origen de las cargas de las arcillas, su constitución, las propiedades del complejo de cambio del suelo y los mecanismos de absorción de nutrientes por las plantas debe ser conocido por aquellos que se interesan por la nutrición vegetal.

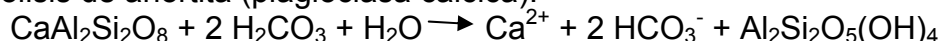
3.3. Formación de las arcillas

Una cuestión importante en la formación del suelo es la génesis de los minerales más característicos del mismo: la formación de los minerales de la arcilla en este ambiente está íntimamente ligada a reacciones de hidrólisis de los minerales silicatados de las rocas. Estas reacciones pueden desarrollarse en el medio hidrotermal (durante la formación de un depósito mineral), o como procesos exógenos (bajo condiciones atmosféricas), una vez que las rocas por erosión se encuentran en la superficie o su proximidad. El CO₂ disuelto en el agua de lluvia o de los ríos puede desencadenar una serie de procesos hidrolíticos:

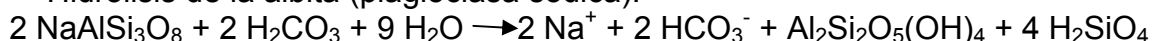


El ácido carbónico así formado reacciona con los feldespatos, induciendo la formación de minerales del grupo de la arcilla. A continuación ilustramos este tipo de reacciones con tres ejemplos conducentes a la formación de caolinita, Al₂Si₂O₅(OH)₄:

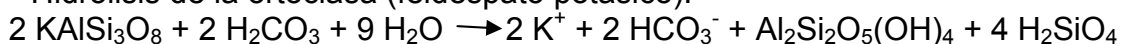
1) Hidrólisis de anortita (plagioclasa cálcica):



2) Hidrólisis de la albita (plagioclasa sódica):



3) Hidrólisis de la ortoclasa (feldespato potásico):



El clima, a través de los parámetros de humedad y temperatura, controla fuertemente el proceso formador de arcillas a partir de los silicatos. Así, en condiciones de

humedad y calor la hidrólisis dará lugar a arcillas caoliníticas, e incluso a un residuo final de gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Por el contrario, en climas áridos la arcilla predominante resulta ser del tipo illita-esmectita (2:1). Cabe destacar, no obstante, que el mundo de los procesos formadores de arcillas es extraordinariamente complejo, por lo cual lo anteriormente dicho tiene que ser tomado únicamente en el contexto de una simplificación didáctica (Universidad de Extremadura, 2006).

Las arcillas de tipo 2:1 como la esmectita se forman con bajas precipitaciones, lo que podría explicarse por ser menos intensa la meteorización y la pérdida de sílice y bases, al aumentar la lluvia y ser más intenso el intemperismo se pierde más sílice y se forman arcillas 1:1 y de ser aun mayor este proceso se forman óxidos minerales, especialmente de Si, Al y Fe, que son componentes muy abundantes en la corteza terrestre. Debido a su gran abundancia en la litosfera y a su baja solubilidad en el intervalo normal de valores de pH de los suelos, el aluminio y el hierro forman los óxidos, oxihidróxidos e hidróxidos más importantes y reactivos que se encuentran en él. La goetita (FeOOH) es uno de los compuestos de hierro más abundantes, mientras que la gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$ es el más importante de los minerales de aluminio que se pueden encontrar en los suelos.

De lo anterior, se puede comprender que en las regiones de intensas lluvias de los trópicos al envejecer los suelos, se forman arcillas como la caolinita y óxidos hidratados de hierro y aluminio, por otra parte, en suelos jóvenes en regiones de baja precipitación y temperaturas será menos intensa la meteorización y predominarán arcillas de tipo 2:1.

Las arcillas menos intemperizadas, poseen una red cristalina de laminas superpuestas que se ordenan en capas de tetraedros y octaedros, que al repetirse forma la estructura cristalina, mientras que con el intemperismo se pierde sílice y se forman compuestos amorfos de hierro y aluminio, sin estructura cristalina.

3.4. Factores de que depende la CIC del suelo

La propiedad del suelo de retener iones propicia que estos no se pierdan por diferentes vías y puedan ser absorbidos por las plantas. Si esa propiedad no existiera, el suelo no dispondría de ninguna reserva nutricional y los nutrientes aplicados con los fertilizantes se perderían con rapidez por escorrentía y lavado. De forma más generalizada los suelos están en capacidad de retener cationes, mientras que la retención aniónica tiene importancia solo en determinadas condiciones que serán objeto de atención más adelante.

Los factores que determinan la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos son conocidos desde hace varias décadas, también desde entonces se ha explicado con claridad los conceptos de capacidad de cambio catiónico (CIC) y capacidad de cambio de bases (CCB)(Chapman, 1965; Chapman, 1965 a; Black, 1968; Yera y Arzola, 2007), a pesar de ello las confusiones entre estos términos han sido frecuentes por lo que se prefiere utilizar la terminología de valor T para la CIC y valor S para la CCB, en tanto que al por ciento de saturación de bases se le denomina Valor V ($V = S/T \cdot 100$).

Principalmente los suelos retienen cationes y a esa propiedad se le nombra, capacidad de intercambio catiónico (CIC) o valor T. El valor de la misma depende de la cantidad y tipo de arcilla, de la cantidad de materia orgánica y sus características y de la reacción del suelo en los casos en que exista carga variable.

3.4.1. Cantidad y tipo de arcilla

Las arcillas varían en esta propiedad en el orden óxidos hidratados de hierro y aluminio < arcillas 1:1 < arcillas 2:1, por ello de acuerdo a la abundancia de estos tipos de arcilla los suelos podrán diferir ampliamente en su CIC. Las arcillas de tipo 2:1, poseen dos láminas de sílice que emparedan una de alúmina. La lámina de sílice se forma por tetraedros y en cada uno de ellos se encuentra el silicio en el centro y la lámina de alúmina se forma por octaedros y en el centro de cada uno de ellos se encuentra el aluminio (Figura 3.1).

Estructura de la montmorillonita

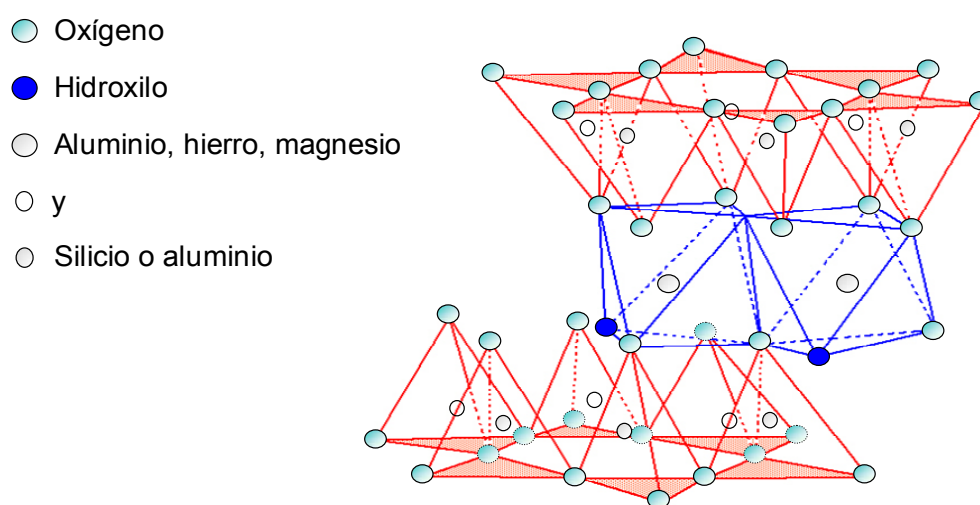


Figura 3.1. Estructura de la montmorillonita (Black, 1968)

El origen de las cargas de las arcillas, puede ser de dos tipos (permanente o variable), para ilustrar las mismas se puede tomar esta arcilla como ejemplo.

•Cargas permanentes

La capacidad de intercambio catiónico está regida principalmente por los desequilibrios de carga que se producen en las capas de la arcilla, provocadas por el reemplazamiento de silicio por aluminio en las capas tetraédricas o de aluminio por magnesio en las octaédricas. Estas sustituciones isomórficas ocurren en la red cristalina de las arcillas, si un ión silicio (de la lamina de sílice) que posee cuatro cargas positivas es remplazado por un aluminio con tres cargas positivas, queda una carga negativa libre, lo mismo ocurre cuando un aluminio (de la lámina de alúmina) es sustituido por un magnesio con dos cargas positivas. Estas cargas siempre son negativas.

- Cargas variables

Estas se presentan en los bordes rotos de las arcillas, en la materia orgánica y en especial abundan en los óxidos hidratados de hierro y aluminio, a diferencia de las cargas permanentes que no dependen de las características del medio donde se encuentren, en este caso se trata de compuestos anfóteros, que poseen un punto isoeléctrico(igual cantidad de cargas positivas y negativas). Si el pH del medio es superior al punto isoeléctrico del coloide de que se trate se carga negativamente y si es inferior se carga positivamente.

Estas cargas se conocen como "cargas inducidas o variables" dado que cambian de positivas a negativas según el pH de la solución, a diferencia de las cargas fijas que aparecen producto de las sustituciones isomórficas en las arcillas. Ahora bien, la acidez o alcalinidad de la solución viene decidida por el punto isoeléctrico del coloide que decide su floculación y la neutralización de dichas cargas. El punto isoeléctrico promedio de las arcillas se sitúa alrededor de 5.5 a 6, por lo que valores más bajos se consideran ácidos mientras que valores mayores son básicos.

Para valores de pH por debajo del PIE, la capacidad de intercambio catiónico decrece sensiblemente y las cargas variables se hacen positivas por lo que al exterior quedan los hidrogeniones y aluminios del borde de las capas con una fuerte tendencia a la fijación de aniones, lo cual es especialmente importante en lo referente al fósforo, que en su mayor parte queda atrapado e inmovilizado; la pequeña capacidad de intercambio catiónico está saturada con aluminio e hidrógeno y solo una pequeñísima parte lo hace con bases.

Por encima del PIE se produce una rápida disminución de la capacidad de fijación aniónica a la par que el aluminio va siendo sustituido por formas hidratadas de menor solubilidad y toxicidad que la forma anhidra; el hidrogeno permanece constante hasta valores cercanos a 6 en los que comienza un descenso notable del mismo; todo ello va acompañado de un incremento paulatino de las bases que toman el protagonismo a valores cercanos a 6 y se incrementan rápidamente hasta constituir la totalidad del complejo de cambio cuando se supera el valor de 7.5 a 8.

- Huecos hexagonales en la red cristalina de las arcillas

En el caso de las arcillas de tipo 2:1, existen huecos hexagonales en las caras externas de las laminas de sílice (Figura 3.2) y en los mismos caben iones como el potasio y el amonio, por ello cuando alguno de estos iones se encuentra entre dos moléculas de arcilla 2:1, (como la montmorillonita o la vermiculita), puede originarse una atracción electrostática y quedar atrapado, proceso que es frecuente en el caso del potasio y que se conoce como fijación de potasio. Existen arcillas, también de tipo 2:1, en las cuales ya el potasio se encuentra fijado como es el caso de la illita y cuando se dan determinadas condiciones, el mismo puede pasar a la solución del suelo y quedar disponible para ser absorbido por el cultivo, proceso que se conoce como liberación de potasio.

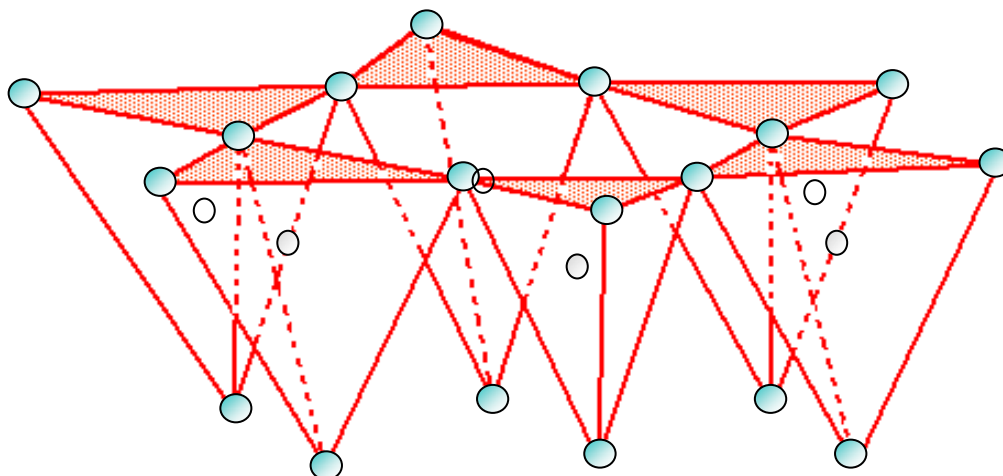


Figura 3.2. Hueco hexagonal existente entre los tetraedros de sílice de la red cristalina de las arcillas (Black, 1968).

- Liberación de potasio

La liberación de potasio, conlleva a una transformación de las arcillas de forma diferente según la acidez o alcalinidad del medio, este proceso aumenta la disponibilidad de potasio para las plantas.

Hidrólisis alcalina: En un medio en que abunde el carbonato cálcico se produce una neutralización de los ácidos formados en la descomposición del material orgánico, ocurre una hidrólisis neutra con una solución muy rica en calcio y con algo de silicio procedente de la escasa hidrólisis de los minerales primarios de estructura diferente a los filosilicatos. Las ilitas que están con frecuencia asociadas a las calizas, sufren un ataque por esta solución que hace que parte de aluminio octaédrico (de las sustituciones isomorfas) sea nuevamente reemplazado por el silicio de la solución; este aluminio va reemplazando al magnesio que había ocupado su lugar en la capa octaédrica. Se produce una disminución en los déficits de carga iniciales que provoca que las láminas se abran para permitir la salida del potasio que ahora no está atraído por las cargas que anteriormente existían.

Hidrólisis ácida: Cuando el material original no es eminentemente básico, la acidez de la materia orgánica predomina sobre la basicidad generada en los incipientes procesos de alteración geoquímica. Se crea un medio levemente ácido en el que solo existe algo de silicio en forma aniónica. Este exceso de silicio favorece su entrada en las capas tetraédricas de los minerales micáceos abiertos, sustituyendo al aluminio y disminuyendo la carga del mineral. Ello favorece la salida del potasio interlaminar, que va siendo sustituido por parte del aluminio eliminado de la capa tetraédrica. La disminución de carga favorece la apertura de las láminas y la entrada de moléculas de agua, formándose un mineral semejante a la vermiculita solo que aluminico. Este mineral se conoce como hidrómica o vermiculita di octaédrica, que es poco estable.

Cuando el medio es confinado con un escaso drenaje, el aluminio de la intercapa puede acabar formando gibsita, con lo que aparece un mineral semejante a las cloritas pero con una capa gibsítica en lugar de la brucítica habitual. Este mineral se conoce

como clorita alumínica y es propio y exclusivo de estos medios de baja alteración geoquímica, con rocas preferentemente ácidas y climas templados no excesivamente fríos ni húmedos.

- Transformación de arcillas

Con el proceso de meteorización en los trópicos húmedos los suelos van perdiendo sílice y bases y las arcillas de tipo 2:1, pueden perder parte de su sílice y transformarse en arcillas de tipo 1:1, en la cual solo se presenta una lamina de sílice y otra de alúmina, conformada por tetraedros en el primer caso y octaedros en el segundo. De forma esquemática se pueden representar como aparece en la Figura 3.3.

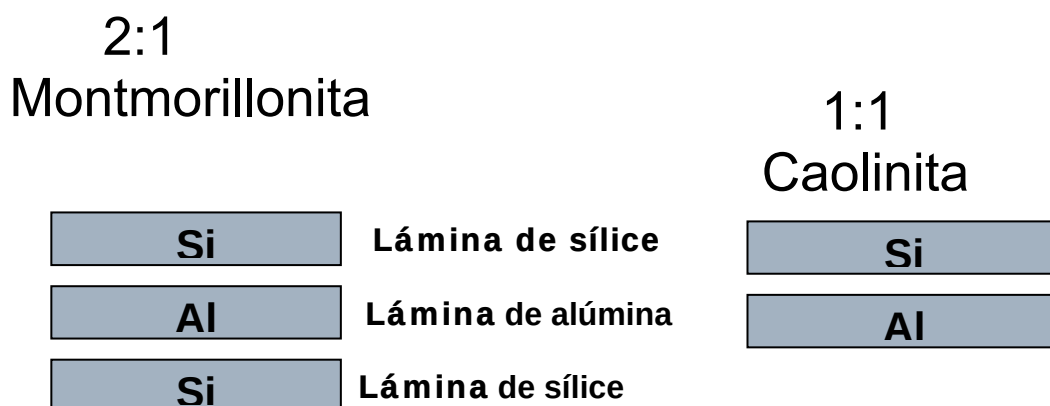


Figura 3.3. Esquema que representa las arcillas de tipo 2:1 y 1:1

Si la meteorización continúa con intensidad, como sucede en el trópico, donde son abundantes las precipitaciones y elevadas las temperaturas, se seguirá perdiendo sílice y aparecerán los óxidos hidratados de hierro y aluminio, los que se caracterizan por presentar cuando el medio es ácido (pH por debajo de su punto isoeléctrico) retención aniónica y cuando el pH aumenta por encima de punto isoeléctrico aumenta su capacidad de intercambio catiónico.

Atendiendo a lo mencionado anteriormente, los suelos atendiendo al tipo y cantidad de arcilla presente difieren en su CIC y en su grado de evolución o envejecimiento, desde una mayor relación Si/Al o Si/Al + Fe, hacia una relación cada vez menor, como se ilustra en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Relación entre evolución y CIC de los suelos al variar el tipo de arcilla

Característica	2:1	1:1	Óxidos hidratados de hierro y aluminio
Evolución del suelo	Joven	Maduro	Viejo
CIC	Alta	Media	Baja
Relación Si/Al+Fe	Alta	Media	Baja

Según Mejía (1996), la carga variable de los oxisoles y suelos óxicos proviene de los óxidos e hidróxidos de Fe^{+3} y Al^{+3} que se comportan como sustancias anfóteras, dependiendo del pH. Así, la adición de cal agrícola y fosfatos, induce un incremento en la carga neta negativa de los oxisoles, incrementa el pH, mientras que los fosfatos

al disminuir el pH del punto isoelectrico aumentan la CIC en 0,8 cmol, por cada mmol de P adsorbido.

3.4.2. Cantidad y tipo de materia orgánica

Arzola (1989) reporta una CIC de la materia orgánica presente en suelos cubanos entre 207 y 543 $\text{cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ de suelo, lo que demuestra por una parte la elevada contribución de la misma a la CIC del suelo y por la otra la gran variabilidad de la misma en esa propiedad, lo que se asocia a su diversidad en características y a la reacción del suelo.

Arzola y Melian (1975) reportan aumento de la CIC de los suelos al incrementar su contenido de materia orgánica.

A modo de ilustración sobre el efecto de los abonos orgánicos en esta característica, se puede apreciar como en condiciones de producción la aplicación de cachaza incremento de forma altamente significativa el contenido de materia orgánica y el valor T del suelo, existiendo una ecuación de regresión que cuantifica la relación entre ambas variables: $\text{Valor T} = 2.88 (\text{M.O.}) + 24.44$ (Cuadro 3.2).

Cuadro3.2: Influencia de la aplicación de cachaza sobre el contenido de materia orgánica (M. O.) y el valor T en un suelo Húmico Calcimórfico dedicado a caña de azúcar(Arzola, 1989).

Tratamientos	Profundidad(cm.)			
	0-20cm.		20-40cm.	
	Materia Orgánica	Valor T	Materia Orgánica	Valor T
	%	$\text{cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$	%	$\text{cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$
Con cachaza	4.67	38.75	4.63	38.75
Sin cachaza	3.13	33.50	2.75	34.50
Diferencia	1.54**	5.25**	1.84**	4.25**

3.4.3. Reacción del suelo

El encalado puede modificar dos características de los suelos que se relacionan inversamente con la CIC: el contenido de materia orgánica y el pH. Un aumento del pH por el encalado por encima del punto isoelectrico de los coloides de los suelos que posean cargas inducidas, siempre que no disminuya el contenido orgánico ocasionará un aumento de la CIC.

En suelos donde abundan arcillas de hidróxido o caolinita, que presentan cargas inducidas el aumento del pH suele incrementar la CIC.En un suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillo rojizo lixiviado donde el encalado incremento significativamente el pH, sin cambiar el contenido de materia orgánica del suelo se encontró un coeficiente de correlación entre el pH y la CIC de 0.79**, en ese mismo suelo, un ligero aumento del pH y fuerte disminución del contenido de materia orgánica originan disminución de la CIC, lo que se puede explicar por la presencia de arcillas con cargas inducidas, pues el humus del suelo aumenta su CIC cuando lo hace el pH(Arzola,1989).Al no existir estas arcillas como en el suelo Pardo sin Carbonatos y no variar el contenido de materia orgánica, tampoco varió la CIC, aún cuando el aumento del pH del suelo

pudo haber originado mayor CIC del humus, lo que acentúa la importancia de las cargas variables en el caso de las arcillas con esa característica (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3: Influencia del encalado sobre algunas características de los suelos relacionadas con la CIC (Arzola, 1989).

Clasificación del suelo	pH en KCl			Materia Orgánica (%)			Valor T (cmol ⁽⁺⁾ .kg ⁻¹)		
	Con cal	Sin cal	Dif.	Con cal	Sin cal	Dif.	Con cal	Sin cal	Dif.
Ferralítico Cuarcítico amarillo rojizo	5.72	4.60	**	1.69	1.45	ns	28.00	19.30	**
Pardo sin Carbonato típico	5.26	4.87	**	2.82	2.84	ns	36.00	36.30	ns
Ferralítico Cuarcítico amarillento lixiviado concrecionario	6.98	6.59	*	2.66	3.21	**	42.75	53.25	**

3.5. Factores que influyen en los procesos de intercambio catiónico

De acuerdo a la ley de acción de masas una elevada concentración de un catión en un intercambiador originara por equilibrio una mayor concentración del mismo en la solución y viceversa, no obstante, existen otros factores que por su importancia serán tratados en esta oportunidad.

3.5.1. Valencia del ión y volumen hidrodinámico

Con el aumento de la valencia aumenta la retención del ión en un intercambiador (en los suelos generalmente existe mas calcio y magnesio que potasio y sodio), mientras a igualdad de valencia el de mayor radio iónico que sería el de menor volumen hidrodinámico se retendría con mayor fuerza, por ejemplo, si solo actuara este factor predominaria en forma cambiante el calcio sobre el magnesio o el potasio sobre el sodio.

3.5.2. Selectividad de un intercambiador

Es la preferencia que un intercambiador puede mostrar por determinados cationes. Se han encontrado así, las siguientes secuencias de selectividad.

Ilita $Al > K > Ca > Mg > Na$

Caolinita $Ca > Mg > K > Al > Na$

Montmorillonita $Ca > Mg > H > K > Na$

Materia orgánica $Mn > Ba > Ca > Mg > NH_4 > K > Na$

3.5.3. Ión complementario

Mientras con mayor fuerza se retenga un ión, se encontrara mas cerca de la superficie del intercambiador y menos dificultades tendrán los retenidos con menor

fuerza, para intercambiarse, ya que estarán mas alejados de la superficie del intercambiador, pero mas cerca de la solución del suelo y podrán pasar a esta última con mayor facilidad. Para ilustrar lo anterior, el calcio por ser divalente se retiene con mayor fuerza que el potasio, por ello impide menos el paso del potasio a la solución del suelo que lo que lo hace el potasio con el.

3.5.4. Grado de saturación

Al aumentar el grado de saturación de un catión, existen mayores posibilidades de que este alejado de la superficie de la micela y de que pueda intercambiarse y pasar a la solución del suelo.

3.5.5. Sucesión de los cambios

No existe una estricta equivalencia en los cambios de los iones cambiables. Un catión recientemente añadido se intercambiara con mayor facilidad que si se encontrara anteriormente en forma cambiante.

3.5.6. Cambios de concentración en la solución del suelo

Las fuerzas de atracción entre iones de carga opuesta, debilitan su movilidad, y esto produce el mismo efecto que una disminución de la concentración. En los climas húmedos, donde la solución del suelo se diluye por grandes precipitaciones, disminuye más fuertemente la concentración de la solución del suelo que la del intercambiador, esto significa menor disminución de la movilidad para los iones monovalentes que para los divalentes, por ello los primeros pasan a la solución del suelo y los segundos a la forma intercambiable. En estos climas, la solución del suelo se enriquece en calcio a costa del magnesio y potasio a costa del sodio. En climas áridos, ocurre lo contrario y suelen presentarse suelos donde el sodio y/o magnesio afectan la fertilidad del suelo.

3.6. La CIC y el medio ambiente

Esta propiedad de los suelos es indispensable para el crecimiento y desarrollo de cualquier cultivo, gracias a ella los suelos poseen reservas no solo de nutrientes sino también de agua. De no existir la CIC como sucede en una arena, los nutrientes se perderían por lavado y escorrentía y el suelo estaría seco por no retener el agua. El suelo no sostendría la vida de los cultivos sin esa propiedad, por tanto tampoco sería posible la vida de los animales y el hombre, por otra parte, mientras menor sea la retención de los suelos mas iones se perderán por escorrentía y lavado y pasarían a las aguas contaminándolas o propiciando procesos como la eutrofización. Dentro de las medidas para aumentar la CIC se encuentra el empleo de los residuos de origen orgánico en la agricultura, evitar la quema de los rastrojos, mover el suelo solo lo imprescindible y en general utilizar todas aquellas medidas que mejoren el contenido de materia orgánica del suelo, las que paralelamente evitan que se contaminen las aguas y la atmósfera se enriquezca en carbono.

Por su efecto beneficioso para la biosfera, no es de extrañar que a la CIC se le considere el segundo proceso en importancia para la vida en el planeta, solo superada por la fotosíntesis. Se pueden citar entre sus beneficios ambientales:

- Mayor fertilidad química del suelo al aumentar establemente las reservas de nutrientes de estos, disminuir las pérdidas y aumentar la eficiencia de los fertilizantes.
- Disminuir el contenido salino de las aguas de lavado en el suelo y beneficiar la calidad de las aguas subterráneas.
- Disminuir el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes, lo que contribuye a evitar la eutrofización.

La elevada CIC de la zeolita puede favorecer esta propiedad de los suelos, también puede utilizarse para alcanzar otros beneficios, por ejemplo, este mineral se estudio , con el propósito de retener el amonio proveniente de un residual de la Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados de Cienfuegos el cual contaminaba la bahía de esa localidad. Una vez enriquecida con nitrógeno resultaba efectiva como fuente de liberación lenta de ese nutriente para los cultivos (Arzola et al. 1991a, 1991b; Sobrepera et al., 1991; Yera y Arzola, 2007).

3.7. Métodos utilizados para determinar la CIC de los suelos

Se utilizan diferentes soluciones extractivas con el propósito de determinar la CIC, esas soluciones, poseen cationes que reemplazan los que se encuentran en el complejo de cambio y pueden ser indicadores del valor de la CIC, como son: NH_4^+ , K^+ , Na^+ ó Ba^{++} . Algunas de las soluciones mas utilizadas son acetato de amonio, cloruro de potasio, cloruro de amonio, cloruro de bario-trietanolamina a pH 8,2 (BaCl_2 -TEA) y acetato de sodio. Esta diversidad de métodos esta asociada con las dificultades existentes para precisar el valor real de esta propiedad del suelo (Schefer y Schachtschabel, 1966).

El acetato de amonio 1N a pH 7, presenta varias dificultades debido a que el amonio, puede formar complejos en la superficie del interior de las arcillas 2:1, lo cual ocasiona imprecisión en los resultados. En segundo lugar, incrementa la carga variable de los suelos ácidos y por tanto aumenta su CIC. Por otro lado, en los suelos con presencia de carbonatos, disuelve estos con lo cual, se sobrestiman los valores de las bases cambiables. El acetato de sodio a pH 8,2 también presenta estos inconvenientes. En suelos ácidos, al utilizar soluciones no tamponadas, por ejemplo cloruro de potasio 1N, o cloruro de amonio, la CIC obtenida tiene un valor comparativamente menor que el que se obtiene con soluciones tamponadas a pH superior al del suelo. A la determinación de la CIC mediante la sumatoria de cationes extraídos con KCl se le ha denominado CIC efectiva o CICE.

El cloruro de amonio se comporta como una sal neutra, la cual no modifica el pH natural del suelo, no modifica las cargas variables, razón por la cual, se propone como extractante de los cationes por Rodríguez (1998), pues la CIC determinada en el laboratorio, debería ser aquella que opera en el suelo, bajo las condiciones de campo. Idealmente, el método a utilizar sería el que pudiera medir la capacidad de los suelos de adsorber cationes de una solución acuosa con el mismo pH, fuerza iónica, constante dieléctrica y composición como la que presentan los suelos en el campo, debido a que la CIC varía (sobre todo en suelos tropicales) con estos parámetros (Reeve y Sumner, 1971; Bohn, 1993).

3.8. Resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico según Puga (1997) son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan en forma de esferas o perlas de 0.3 a 1.2 mm. de tamaño, aunque también las hay en forma de polvo. Están compuestas de una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz de un polímero sintético (resinas estirénicas, resinas acrílicas, etc.) y actúan tomando iones de las soluciones (generalmente agua) y cediendo cantidades equivalentes de otros iones.

La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante. Las resinas de intercambio iónico poseen un radical fijo y un ión móvil o ión de sustitución. El ión móvil es el ión que es intercambiado por iones que desean eliminarse de la solución y este intercambio sólo funciona entre iones de igual carga eléctrica: cationes por cationes y aniones por aniones. En general las resinas de intercambio iónico operan en columnas, para favorecer el proceso de intercambio, parecido a la destilación o la destilación en bandejas. La reacción de intercambio se desplaza en el lecho de resina, generalmente hacia los niveles inferiores.

Al producirse el intercambio iónico, la capacidad de la resina comienza a decrecer, debido a que posee una capacidad limitada para la remoción de iones de las soluciones y debido a esto, en un momento dado habrá cedido la mayoría de sus iones de sustitución y se producirá un cierto pase de iones no deseados en el agua producida y se dice que esta resina está "agotada" o saturada de los iones que ha atrapado. Por este motivo, cuando se diseña una columna de intercambio iónico, se establece a priori la concentración máxima admisible de iones indeseables en la salida del proceso. Cuando se llega a la concentración preestablecida, se debe proceder a regenerar la resina, para poderla utilizar en un nuevo ciclo.

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el proceso inverso del proceso de intercambio iónico y tiene por finalidad devolverle a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de intercambio. Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contengan el ión móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

3.9. La absorción y traslado de nutrientes en las plantas

El contacto de los nutrientes con la superficie de la raíz es un requisito para que se produzca su absorción, ello se puede producir de dos formas: i) en forma directa por el crecimiento de las raíces y ii) por movimiento de los nutrientes por difusión o flujo masal desde el suelo hasta la superficie de las raíces.

a) Intercepción directa por la raíz. A medida que la raíz crece, se ubica en estratos de suelo en los que encuentra los nutrientes disponibles para la planta. La cantidad de nutrientes que intercepta en forma directa la raíz se encuentra relacionada con la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo ocupado por la raíz y el % de suelo explorado por la raíz. En general solo un pequeño % del total de nutrientes absorbido por la raíz llega por esta vía (Cuadro 3.4).

b) Movimiento por difusión y flujo masal de los nutrientes. La cantidad de nutrientes transportados por difusión va a estar relacionado con el gradiente de concentración y con el coeficiente de difusión del nutriente (que varía con el tipo de suelo y la movilidad del nutriente en el suelo). El % de nutrientes (respecto del total absorbido) que llegan hasta la superficie de la raíz por los diferentes mecanismos varía de acuerdo al nutriente en cuestión (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4: Distintos mecanismos de llegada de los nutrientes hasta la cercanía de las raíces en un cultivo de maíz con un rendimiento de 9,5 t. ha⁻¹. Valores en kg ha⁻¹ para cada nutriente (Barber, 1984).

Nutriente	Cantidad absorbida	Intercepción directa	Flujo masal	Difusión
nitrógeno	190	2	150	38
fósforo	40	1	2	37
potasio	195	4	35	156
calcio	40	60	150	0
magnesio	45	15	100	0
azufre	22	1	65	0

El flujo masal es el movimiento de agua y de nutrientes que se encuentra disuelto en la masa líquida que llega hasta las raíces como resultado del proceso de transpiración de la planta. La cantidad de nutrientes que llega por este movimiento está relacionada con la concentración del mismo en la solución del suelo y con el volumen de agua que absorbe la planta. La difusión carece de importancia para el calcio, magnesio y potasio, mientras casi todo el fósforo que llega a la raíz es por ese mecanismo, ello indica, que dada la casi inmovilidad de este nutriente en el suelo y llegar el mismo a la raíz solo por difusión a través del agua que se encuentra en la cercanía de la raíz, la aplicación del fertilizante fosfórico cerca del sistema radical es imprescindible para garantizar la nutrición con ese nutriente. En el Cuadro 3.5, aparece la cantidad de nutrientes que llega por difusión, se puede apreciar que a pesar de que el mecanismo de difusión es de decisiva importancia para la nutrición fosfórica (Cuadro 3.4), su valor absoluto es pequeño, lo que reitera la necesidad de colocar el fertilizante fosfórico cerca de la raíz para alcanzar una adecuada nutrición con este nutriente.

Cuadro 3.5: Valores para el coeficiente de difusión ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) de diferentes iones para distintos suelos (Clarkson, 1981).

Ion	Coeficiente difusión
NO_3^-	$1,0.10^{-10}$
K^+	$1 - 28.10^{-12}$
Cl^-	$2,0 - 29,0.10^{-10}$
H_2PO_4^-	$0,3 - 3,3.10^{-13}$
SO_4	$2- 1,0 - 2,0.10^{-10}$

Por flujo masal y difusión llegan los iones hasta el exterior de la célula, pero para que estos penetren en el citoplasma se requiere de un gasto de energía, pues la concentración iónica interna de la célula es en condiciones normales superior a la existente en el exterior, por ello, para trasladarse los iones, en contra de un gradiente de concentración a través de la membrana celular se requiere de un gasto energético. La célula vegetal posee una estructura exterior que garantiza el sostenimiento de grandes árboles sometidos a los embates de los vientos y a las diferencias de presiones que se originan en las células, a ella se le nombre pared celular, abunda en su formación la celulosa y aparece la lignina, esta pared no existe en las células animales.

La pared celular se forma a partir de una membrana celular, que rodea la célula, define su tamaño y las relaciones del protoplasma con el exterior y está presente tanto en las células vegetales como animales. La molécula orgánica que está presente en la constitución de esta membrana, se caracteriza por tener una cabeza hidrófila en el exterior de dicha membrana e hidrófoba en su interior. Las membranas celulares están formadas por una bicapa lipídica, en cuyo interior confluyen las colas hidrofóbicas de las moléculas de lípidos. Este mar lipídico interior es una barrera formidable para los iones y la mayoría de las moléculas hidrofílicas, pero permite el pasaje fácil de moléculas hidrofóbicas, tales como las hormonas esteroideas. Así, la composición físico-química de la membrana celular es la que determina qué moléculas pueden atravesarla libremente y qué moléculas no.

Diferentes sustancias poseen gran afección por el agua (Hidrofilia) y son solubles en ella, cuando estas se encuentran en el interior de las células, atraen el agua y originan que por osmosis pase agua del exterior al interior de la célula. Como ejemplos pueden citarse iones minerales solubles en agua, sales de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, y sus alcoholes y ácidos derivados (Glicerina, sorbitol, ácido glucurónico) (Campbell, 1996).

Como las colas hidrofóbicas de ambas capas lipídicas, se encuentran en la parte central de esta membrana y las cabezas hidrófilas se orientan hacia el exterior y el interior de la célula, las sustancias polares como el agua y los iones (rodeados por moléculas de agua), pueden abundar donde se presentan esas cabezas, pero no donde están presente las colas hidrofóbicas de los lípidos que conforman el interior de dicha membrana.

Para que cualquier sustancia pueda formar parte de la planta, debe atravesar esa membrana, están capacitadas para hacerlo sin dificultad:

- las moléculas no polares pequeñas.
- el agua y otras moléculas polares pequeñas y sin carga.

Debido al interior hidrofóbico, no pueden atravesar libremente dicha membrana, las moléculas polares relativamente grandes sin carga, ni los pequeños iones (con carga).

La mayoría de las moléculas orgánicas de importancia biológica tienen grupos funcionales polares y, por lo tanto, son hidrofílicas; a diferencia del dióxido de carbono, el oxígeno y el agua, ellas no pueden atravesar libremente la barrera lipídica por difusión simple. De modo similar, los iones que son de importancia crucial en la vida de la célula no pueden difundir a través de la membrana, pues aunque los iones individuales, como el sodio (Na^+) y el cloruro (Cl^-), son bastante pequeños, en solución acuosa se encuentran rodeados por moléculas de agua, lo que le confiere un gran volumen hidrodinámico y, tanto el tamaño como las cargas de los agregados resultantes, impiden que estos iones se deslicen a través de las aberturas momentáneas que sí permiten el pasaje de las moléculas de agua. El transporte de estos agregados y de todas las moléculas hidrofílicas, excepto las muy pequeñas, depende de proteínas integrales de membrana que actúan como transportadores, transfiriendo a las moléculas hacia uno y otro lado de la membrana sin que entren en contacto con su interior hidrofóbico.

El cruce a través de la membrana celular, con o sin ayuda de proteínas de transporte, es uno de los principales modos en que las sustancias entran y salen de la célula, pero no es el único. Hay otro tipo de proceso de transporte que involucra vesículas o vacuolas que se forman a partir de la membrana celular o se fusionan con ella. Por ejemplo, las vesículas se mueven desde los complejos de Golgi a la superficie de la célula. Cuando una vesícula alcanza la superficie celular, su membrana se fusiona con la membrana citoplasmática y expulsa su contenido al exterior. Este proceso es conocido como exocitosis. El transporte por medio de vesículas o vacuolas también puede operar en sentido contrario. En la endocitosis, el material que se incorporará a la célula induce una invaginación de la membrana, produciéndose una vesícula que encierra a la sustancia. Esta vesícula es liberada en el citoplasma. Se conocen tres formas distintas de endocitosis: la fagocitosis ("células comiendo"), la pinocitosis ("células bebiendo") y la endocitosis mediada por receptor; todas ellas requieren energía (Campbell, 1996).

El hecho de que la concentración iónica del jugo celular sea regularmente más elevada que la del medio que rodea a las células radicales, ha demostrado que los iones tienen que ser acumulados por las plantas en contra de un gradiente de concentración. Esta alta acumulación de iones no puede ser explicada por ningún mecanismo pasivo. Se pueden distinguir dos tipos principales de proteínas de transporte: las llamadas proteínas transportadoras o "carrier" y las proteínas formadoras de canales (canales iónicos). Los mecanismos de absorción activa principales son los siguientes:

- *Bombas*: requieren energía en forma de ATP o luminosa para producir el transporte primario. Velocidad de transporte lenta.
- *Transportadores o carrier*: son enzimas de transporte específicas para cada ión y utilizan el gradiente electro-químico.
- *Canales iónicos*: proteínas que forman un canal de un lado a otro de la membrana y son específicas para algunos solutos.

Incrementar el mecanismo de absorción de nutrientes por las plantas, significaría reducir la necesidad de fertilizantes de los cultivos, dirección en la cual se investiga en la actualidad, por ejemplo, en la palma de aceite africana, se han aislado los genes que intervienen en el sistema transportador de fosfatos, lo que resulta alentador con este propósito (Raush y Bucher, 2002; Mariyam et al., 2009).

El proceso de absorción y traslación de los nutrientes hasta los órganos en que son utilizados se puede agrupar en tres etapas:

Etapas 1 (llegada al espacio exterior de la célula): los iones que la planta debe tomar del suelo, se acercan al sistema radical mediante un transporte sin gasto energético, mediante difusión, flujo de masa originado por la transpiración o por el intercambio iónico que poseen las células radicales.

Etapas 2 (atravesar la membrana celular): le realiza mediante un gasto energético, pues deben penetrar en contra de un gradiente de concentración por alguno de los tres mecanismos explicados.

Etapas 3 (Transporte hasta los lugares donde son utilizados): Los iones para llegar al xilema y ser transportados a través del tallo hasta las hojas deben atravesar una segunda barrera de selección que impide la penetración de compuestos no deseados por la planta, es la banda de Caspary.

Las raíces jóvenes tienen una capa externa de epidermis y, a lo sumo, una cutícula muy delgada. Prolongaciones de las células epidérmicas forman los pelos radicales, que incrementan en sumo grado la superficie absorbente de la raíz. Debajo de la epidermis está el tejido fundamental de la raíz, la corteza, compuesta principalmente por células parenquimatosas, frecuentemente especializadas en el almacenamiento. La capa más interna de la corteza es la endodermis, una sola capa de células especializadas cuyas paredes contiguas, en las que se ha depositado suberina, conforman la banda de Caspary (Campbell, 1996).

3.10. La extracción de nutrientes por las plantas

Los niveles de extracción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en los diferentes órganos cosechables para rendimientos crecientes de tomate, lechuga, cebolla, zanahoria, papa y palmito aumentan cuando lo hace el rendimiento del cultivo y son muy variables entre especies (Ciampitti y García, 2007).

La absorción está afectada por un gran número de factores que varían con las condiciones del medio en que se desarrolla y crece el cultivo y por los mecanismos de la especie de planta, los cuales deben ser conocidos y controlados por el hombre para emplear las medidas que resulten beneficiosas. La fertilización con un

nutriente, por ejemplo, puede favorecer la asimilación de otro "sinergismo" o disminuirla "antagonismo", esto último se puede ilustrar con resultados obtenidos con la palma de aceite africana al norte de Sumatra, donde se encontró que la aplicación de nitrógeno disminuía el contenido de cobre y cinc en la hoja, mientras la de fósforo y potasio el de cinc (Tohiruddin, 2009).

La absorción total de nutrientes por unidad de producto formado difiere entre cultivos (Cuadro 3.6 y 3.7), razón por la cual, la especie de planta y el nivel de rendimiento son factores a tener presente en cualquier sistema de recomendación de fertilizantes.

Cuadro 3.6. Absorción total de nutrientes para producir una tonelada de producto por diferentes cultivos en India (Tiwari, 2005)

Cultivo	Kg de nutriente por t de producto		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Mango	6.7	1.7	6.7
Banano	5.6	1.3	20.3
Cítricos	9.0	2.0	11.7
Manzano	3.3	1.5	6.0
Guayaba	6.0	2.5	7.5
Piña	1.8	0.5	6.3
Mamey	1.6	0.6	2.1
Uva	8.0	2.0	9.0
Fruta de la pasión	4.0	1.0	5.0

Cuadro 3.7: Absorción total de N, P₂O₅, K₂O, Mg y S por toda la parte aérea (frutos, hojas, tallos, semillas) de la planta según un rendimiento dado (INPOFOS, 2010).

CULTIVO	N kg/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	K ₂ O kg/ha	Mg kg/ha	S kg/ha
Maíz (12 t/ha)	298	128	298	73	37
Frijol soya (3.9 t/ha)	353	65	230	27	22
Algodón(1.6 t/ha)	202	71	168	39	34
Trigo(5.3 t/ha)	186	60	206	19	22
Cacahuete (4.4 t/ha)	269	44	207	28	23
Avena(3.5 t/ha)	129	45	162	22	21
Sorgo(grano)(8 t/ha)	267	94	269	45	43
Arroz(7.8 t/ha)	125	67	188	16	13
Cebada(6.4 t/ha)	202	74	202	22	27
Girasol(3.3 t/ha)	169	67	123	40	16
P. Aceitera(245 t/ha)	193	83	300	62	n.d.
Jitomate(99 t/ha)	260	97	519	40	60
Pimiento(22.5 t/ha)	153	58	243	48	n.d.
Pepino(25 t/ha)	101	31	195	28	n.d.
Melón(22 t/ha)	73	23	131	13	n.d.
Piña (44 t/ha)	171	140	668	72	16
Uva (30 t/ha)	114	39	175	20	n.d.
Naranja(67.5 t/ha)	297	62	370	43	31
Manzana(31 t/ha)	112	57	202	27	n.d.
Durazno(31.7 t/ha)	106	45	134	25	n.d.
Cacao(992 kg/ha)	466	121	821	133	n.d.
Plátano(2,900 plantas/ha)	448	448	1681	175	n.d.
Lechuga(50 t/ha)	101	34	207	n.d.	n.d.
Chícharo(3.1 t/ha)	184	39	118	20	11
Papa(62 t/ha)	301	101	612	56	25
Camote (24 t/ha)	115	45	235	12	n.d.
Col(88 t/ha)	302	71	279	40	72

Bibliografía Consultada

Arzola, N.: Aprovechamiento de residuos de origen orgánico en la agricultura. Curso de postgrado. Ciego de Ávila. Junio de 1989.

Arzola, N.; Melián, G.: Relaciones entre algunas características de varios suelos de la provincia de las Villas, Revista Centro agrícola, 1975:17-28pp.

Arzola, N.; Machado, J.; Hernández, L.B.: Comparación de la zeolita cargada y sin cargar con fertilizante nitrogenado mineral. Comisión 4:Agricultura.A-32.ZEOLITES 91.Program-Abstract.3rd.International Conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites.Havana, 1991 a

Arzola, N.; Machado, J.; Vázquez, A.: Selección de la granulometría y carga de la zeolita para uso agrícola Comisión 4:Agricultura.A-33.ZEOLITES 91.Program-Abstract.3rd.International Conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites.Havana, 1991 b.

Barber, S.A.: Soil Nutrient Bioavailability. Wiley, New York, 1984:105pp.

Black, C.A.: Soil-Plant Relationships. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, London, Sydney.1968: 792 pp.

Bohn, N.; McNeal, B.; O'Connor, G. :Química del Suelo. Editorial Limusa, S.A., México, 1993.

Campbell, N.A: Biology. 4th edition. The Benjamin/Cumming Publishing Company, Inc. California(1996): 1205 pp.

Chapman, H.D.: Cation exchange capacity Agronomy 9(1965):891-901pp.

Chapman, H.D.: Total exchange bases. Agronomy 9(1965 a):902-904pp.

Ciampitti, I.; García, F.: Requerimientos Nutricionales. Absorción y Extracción de Macronutrientes y nutrientes secundarios. II. Hortalizas, frutales y forrajeras,2007.[http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/3971CBCC1D02F416032573FB0063A](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/3971CBCC1D02F416032573FB0063A)

Clarkson, D.T.: Nutrient interception and transport by roots sytem. In: "Physiological factors limiting plant productivity. C: B: Johnson (ed). Butterworths, London, 1981: 307-314 pp.

INPOFOS: Internacional Plant Nutrition Institute. Absorción aproximada de nutrientesporlasplantas(parte1)2010:[http://www.inpofos.org/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/C341802D8B22A67D06256B5A00656E2B](http://www.inpofos.org/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/C341802D8B22A67D06256B5A00656E2B)

INTA: Contribución del limo a la capacidad de intercambio catiónico en el material parental de los suelos del norte de la Región Pampeana. Buenos Aires, Argentina, 2002.

Mariyam Ljab, S.; Nor Akmar Abdullab, S.; Abdul Rahman, Z.; Sharul Rabiah Syed Alwee, S.: Oil palm high affinity phosphate transporter gene isolation. Proceedings of Agriculture, biotechnology & sustainability Conference. Malaysian Palm Oil Board. PIPOC, Volume 3(2009):1079-1086pp.

Mejía, L.: Génesis y características de los Oxisoles y suelos óxicos de los llanos orientales de Colombia y su relación con la fertilidad. Suelos Ecuatoriales, 26(1) (1996): 7-32pp.

Puga, J.: Resinas de intercambio iónico. Monografías de Química. Internet, 1997. <http://www.monografias.com/trabajos51/intercambio-ionico/intercambio-ionico.shtml>.

Raush, C.; Bucher, M.: Molecular mechanism of phosphate transport in plants. Planta (216) (2002):23-37pp.

Reeve, N.; Sumner, M. E.: Cation exchange capacity and exchangeable aluminum in Natal Oxisols, Soil Soc. Am. Proc. 35(1971): 38-42pp.

Rodríguez, A.: Determinación de los cationes extraíbles mediante saturación con cloruro de amonio. Tesis de grado, Técnico. Superior Agropecuario. UCLA, Decanato de Veterinaria. Núcleo Juan de la Torre. 1998.

Scheffer, F.; Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart, 1966.

Sobrepera, R.; López, D.; Arzola, N.; Morales, M. C.; López, T.; Sánchez, M. C.; Bravo, T.; Lau, Y.; Maya, H.: Carga de zeolita con soluciones nitrogenadas para su uso en la agricultura como fertilizante de liberación lenta. Comisión 4 :Agricultura. A-41. ZEOLITES 91. Program-Abstract. 3rd. International Conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites. Havana, 199

Tiwari, K.: Diagnosis Potassium Deficiency and Maximizing Fruit Crop Productivity. Fruit Crop Productivity Better Crops. Vol. 89 No. 4 (2005):1-31pp.

Tohiruddin; Tandiono, J.; Silalahi, A.; Prawobo, N. P.; Foster, H.: Effects of N, P and K fertilizers on trace element status of oil palm in Sumatra

Universidad de Extremadura: Edafología Ciencias Ambientales .Lección 4. Componentes del suelo. Fase sólida. Componentes minerales. Complejo de alteración, 2006: <http://www.webmii.es/Result.aspx?f=El&l=Suelo&r=es>

Yera, B.; Arzola, N.: Manejo agronómico de los factores que influyen en la capacidad de intercambio cationico del suelo. Memorias del 60 Aniversario de la Estación Experimental de la caña de azúcar "Antonio Mesa". ISSN 1028-6527. Jovellanos, 2007 (CD con ponencias).

“Los nutrientes minerales, o simplemente nutrientes, entran a la planta en general en forma de iones inorgánicos disueltos en el agua que absorben las raíces. Algunos de ellos se acumulan en la planta en cantidades considerables son los macronutrientes: N, P, K, Mg, Ca, y S”.

F. Pérez y J.B. Martínez –Laborde

CAPITULO 4. ELEMENTOS MAYORES PRIMARIOS

4.1. Estudio del nitrógeno

4.1.1. Generalidades

Los fertilizantes químicos nitrogenados se sintetizan a partir del nitrógeno atmosférico, proceso que requiere de altas temperaturas y presiones que se alcanzan a partir del uso de combustibles derivados del petróleo, lo que ocasiona que posean un elevado costo y que su elaboración contribuya a la destrucción de un recurso natural no renovable, el petróleo. Por otra parte, si bien estos fertilizantes suelen incrementar con más frecuencia que cualquier otro los rendimientos de los cultivos, en exceso afectan la calidad de los productos agrícolas. Por estas razones, es necesario aplicar el nitrógeno en la cantidad adecuada pues tanto una insuficiencia como un exceso son perjudiciales.

Se debe añadir a lo antes expuesto que, como principio deberá buscarse que exista un máximo aprovechamiento del fertilizante nitrogenado por el cultivo y un mínimo de "residuo" en el suelo, debido a los elevados costos de estos fertilizantes y a los daños que para la salud y bienestar del hombre origina el nitrógeno perdido de los agrosistemas por diferentes vías.

El conocimiento sobre el nitrógeno, elemento que se destaca por la elevada frecuencia con que los cultivos responden a su aplicación, complejidad de su comportamiento, elevados costos e incidencia sobre el medio ambiente, es una necesidad para conjugar en una explotación agrícola cantidad, calidad, economía y protección ambiental.

4.1.2. Nitrógeno en la planta

4.1.2.1. Formas de ser absorbido. Funciones

El nitrógeno se absorbe por las raíces de la planta, sobre todo, en forma de los iones NH_4^+ y NO_3^- aunque también las hojas, están capacitadas para este proceso. Compuestos nitrogenados de bajo peso molecular, no ionizables y compuestos orgánicos pueden servir eventualmente de fuente del elemento.

El medio condiciona la relación cuantitativa $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^-$ y esto determina que en condiciones naturales la nutrición sea principalmente a partir de uno u otro ión; existen evidencias de que el crecimiento de las plantas mejora cuando son nutridas con una combinación de ambas formas y no exclusivamente con una de las dos formas, pero esto no es determinante a la hora de seleccionar un fertilizante nitrogenado.

La incorporación del nitrógeno absorbido a la materia orgánica ocurre siempre en la forma reducida, es decir el nitrógeno amoniacal se utiliza directamente en la síntesis de aminoácidos pero el nítrico necesita ser reducido antes a la forma amoniacal. A través del proceso llamado aminación directa surgen aminoácidos por la unión del amoníaco con los grupos cetónicos de ácidos orgánicos.

El nitrógeno es parte esencial de compuestos como los aminoácidos y por lo tanto de las proteínas, de los ácidos nucleídos, nucleótidos que forman el ADN y el RNA, de la clorofila y de otros compuestos como los alcaloides. El **genoma** es el conjunto de genes y secuencias de ADN de un organismo.

Forma parte del protoplasma, cromosomas, genes y ribosomas, por lo que este es un elemento fundamental de la sustancia portadora de la vida y de la herencia. Asimismo, por ser componente esencial de las enzimas y hormonas es determinante en el metabolismo vegetal.

4.1.2.2. Insuficiencia

Si falta nitrógeno se reduce la producción de proteína, lo cual conduce a la inhibición del crecimiento de la planta. Si la insuficiencia aparece temprano sufre todo el crecimiento del sistema es decir, la formación de órganos; si la carencia aparece en un estadio de crecimiento tardío se reduce la acumulación de productos sintetizados (Bergmann y Neubert, 1976).

La insuficiencia de nitrógeno reduce el desarrollo vegetativo y acelera la fase de desarrollo reproductiva, con una disminución drástica del rendimiento. Por la importancia de las funciones del nitrógeno la insuficiencia reduce las dimensiones de la planta, el área foliar, el crecimiento de los brotes, el grosor de los tallos, el número y dimensiones de frutos y semillas así como el ahijamiento en las gramíneas. El nitrógeno es el elemento que determina en mayor grado la cantidad de producto agrícola. Las raíces no se acortan pero se ramifican menos.

La insuficiencia conduce a un proceso de descomposición de la proteína. La simultánea descomposición de los plastidios y la inhibición de la síntesis de clorofila son la causa de los síntomas visuales de la insuficiencia.

A diferencia de las plantas bien nutridas con nitrógeno, las cuales son vigorosas y de un verde intenso las que sufren insuficiencias, además de manifestar un pobre desarrollo, presentan una coloración de verde clara a amarilla, más pronunciada en las hojas viejas, ya que el nitrógeno movilizado en ellas va hacia las partes jóvenes del vegetal. La planta puede presentarse verde y sufrir la insuficiencia, ya que los síntomas se presentan, generalmente cuando esta es aguda.

Cuando la insuficiencia progresa la clorosis gana en amarillez e incluso puede presentarse desecación y necrosis a partir del ápice y bordes de las hojas con coloraciones de amarillo-parduscas a pardas.

Al acumularse carbohidratos en exceso no es raro que la formación de antocianina en algunas especies aumente por insuficiencia de nitrógeno, lo cual trae como consecuencia coloraciones rojo-anaranjadas, rojas o rojo-púrpuras; también características de la insuficiencia de otros nutrimentos; si bien la de nitrógeno, a diferencia de otras, se acompaña de tonalidades de verde - pálidas a amarillentas.

Al ser el nitrógeno un elemento fácilmente movilizable, los síntomas de la insuficiencia aparecen primero en las hojas más viejas.

4.1.2.3. Exceso

Desde el punto de vista económico puede haber exceso de nitrógeno sin que la planta se vea afectada en su crecimiento es decir sin que muestre ningún síntoma por ello. Si aumentara el exceso, la planta mostraría una intensificación del crecimiento vegetativo y en los cereales un aumento del ahijamiento, lo cual en casos extremos puede ser perjudicial para la formación de espigas y granos (Bergmann y Neubert, 1976).

Un exceso de nitrógeno disminuye las reservas de carbohidratos ya que el nitrógeno promueve el desarrollo de tejidos adicionales en los cuales se emplean los carbohidratos producidos.

Para la formación de estos tejidos adicionales se emplean aminoácidos que surgen de la unión del amoníaco con los alfa - cetoácidos formados en el proceso de respiración a partir de los carbohidratos.

Como el protoplasma es en gran parte proteína y agua, un exceso de nitrógeno hace a las células grandes y de paredes delgadas, por disminuir la cantidad de carbohidratos acumulados como celulosa para ser depositada en la pared celular. A costa del tejido esclerenquimatoso se refuerza la formación de células parenquimatosas, por lo que el tejido adquiere una estructura esponjosa blanda. Las plantas con exceso de nitrógeno son por esas razones suculentas, es decir de alto contenido en agua y bajas en materia seca. Las plantas con esas características son más susceptibles al ataque de enfermedades; los tejidos tiernos son más vulnerables a los parásitos (Laske, 1972).

Las plantas con exceso de nitrógeno son de color verde oscuro muy intenso con hojas anchas y jugosas, su crecimiento vegetativo se alarga y la cosecha de la planta total es grande pero la de los órganos se reduce.

Al aumentar el peso, la altura y el área foliar por exceso de nitrógeno en plantas como el arroz y otros cereales sin que a la vez aumente la resistencia basal de los tallos, como para contrarrestar el momento de inercia de la planta respecto a la base, aumenta la susceptibilidad del vegetal al acamado o caída inelástica de las plantas, ya que la resistencia a la ruptura a veces disminuye; pues tanto el diámetro de los tallos como las paredes celulares de los mismos se hacen más delgados. El acamado limita la cosecha que pudiera obtenerse.

En las plantas productoras de fibras como el algodón, al disminuir el porcentaje de celulosa, las células son alargadas y de paredes delgadas, por lo que se producen fibras de poca resistencia, perjudicando la calidad del producto.

Si el suministro de nitrógeno a los cultivos productores de azúcar como la caña de azúcar y remolacha es excesivo, los carbohidratos se emplearán en la formación de nuevos tejidos y por lo tanto su acumulación como azúcar disminuye. En los cultivos mencionados la máxima cosecha de azúcar se alcanza con menos nitrógeno que la máxima cosecha de la planta en su totalidad.

Es necesario un adecuado suministro de nitrógeno para obtener en épocas tempranas un rápido crecimiento del vegetal. Sin esto la capacidad total de fotosintetizar disminuye y como consecuencia lo mismo ocurre a las posibilidades de almacenar almidón por los cultivos de raíces y tubérculos como la yuca y la papa; pero el desarrollo foliar no puede tampoco ser muy prolongado, pues el tiempo disponible para el crecimiento del órgano de almacenamiento decrece con el aumento del tiempo en que los carbohidratos se usan principalmente para el crecimiento de la parte aérea.

Esto explica que el exceso de nitrógeno y las aplicaciones tardías aumenten la parte aérea en detrimento de las raíces y tubérculos.

La mayor cosecha de frutos se obtiene con un suministro de nitrógeno menor que el que se necesita para la máxima producción de la parte vegetativa, una insuficiencia de nitrógeno produce, naturalmente, fructificación por debajo del óptimo, pero un exceso también. Los frutos cítricos con exceso de nitrógeno son pequeños y de cáscara gruesa entre otras características indeseables.

La calidad de las frutas y hortalizas decrece al haber exceso de nitrógeno por enriquecimiento de amidas acompañado de perjuicios al sabor. Un exceso de este elemento suele producir acumulación de NO_3^- en algunas hortalizas, frutas y tubérculos, lo cual es perjudicial a la salud humana.

El exceso de NO_3^- ó NH_4^+ conduce a clorosis y necrosis típicas del borde de las hojas. La necrosis debida a NO_3^- es de color pardo más oscuro que la debida a NH_4^+ . Al principio existen franjas cloróticas entre las zonas necróticas y los tejidos se mantienen todavía verdes.

La necrosis marginal alcanza finalmente, las zonas internervales de todo el ancho de la hoja. El borde necrótico se arquea hacia abajo, mientras que el resto de la hoja sigue creciendo con aspecto alambrado.

El exceso de nitrógeno ocurre sólo cuando se aplican cantidades excesivas de abonos nitrogenados generalmente acompañados de suministros de otros elementos.

4.1.3. Balance del nitrógeno

Las vías de pérdidas y ganancias de nitrógeno son varias y están influenciadas por muchos factores, razón por la cual, se hace difícil determinar el balance de dicho nutrimento en los diferentes agrosistemas y poder cuantificar la necesidad de fertilizante nitrogenado de los cultivos. A pesar de ello, este conocimiento resulta útil, con el propósito de encauzar los esfuerzos hacia un manejo del ciclo del nitrógeno que permite conjugar la obtención de beneficios económicos con la protección del medio ambiente.

4.1.3.1. Ganancias

La vía de aportar el hombre nitrógeno a los cultivos es mediante el empleo de fertilizantes minerales y orgánicos, en tanto que de forma natural se aporta nitrógeno en pequeña cantidad a los agrosistemas con la lluvia y con partículas presentes en la atmósfera que se depositan en el suelo.

Las ganancias naturales de nitrógeno de mayor cuantía se atribuyen a la fijación biológica del nitrógeno (FBN). Esta se realiza por dos sistemas microbianos a partir del dinitrógeno atmosférico.

1. Fijadores asimbióticos y asociativos
2. Fijadores simbióticos.

La FBN es realizada por gran variedad de microorganismos de vida libre como bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Clostridium*, asociativos como

Azospirillum, Acetobacter diazotrophicus, Herbaspirillum, Cianobacterias como Anabaena y simbióticos como Rhizobium y Brady rhizobium.

La fijación simbiótica es conocida y utilizada por el hombre desde hace décadas y se considera la vía más productiva, variando entre 73 y 865 Kg de N. ha⁻¹ al año. Nitrogenasa es el nombre dado al sistema enzimático responsable de la fijación del nitrógeno, mediante la reducción del dinitrógeno atmosférico o amonio. El sustrato natural de esta enzima (dinitrógeno atmosférico) es reducido mediante una reacción irreversible que siempre va acompañada de la liberación de dihidrógeno (H₂).



Existen diferentes sustratos que pueden ser reducidos por la nitrogenasa, uno de ellos el acetileno es reducido a etileno, el cual puede ser fácilmente detectado por cromatografía de gases. De ello, ha derivado una técnica basada en la reducción del acetileno (ARA) que es ampliamente utilizada para evaluar de forma indirecta la actividad de la nitrogenasa.

Se calcula que para obtener la fijación de nitrógeno atmosférico equivalente a 100 Kg de N. ha⁻¹, los organismos fijadores requieren metabolizar aproximadamente 10 000 Kg. de compuestos carbonatados. La rizosfera es un ambiente favorable para el desarrollo de estos microorganismos, debido a la presencia de fuentes de carbono y energía las cuales se pueden originar por los exudados radicales y por los residuos de vegetales que se depositan en el suelo. Algunos géneros de bacterias dentro de este grupo no sólo tienen efecto benéfico sobre las plantas por la fijación de nitrógeno, sino, además por la producción de sustancias estimuladoras del crecimiento como las auxinas y dentro de ellas el ácido indolacético (AIA), las giberelinas y citoquininas, las cuales producen un reconocido efecto estimulador del crecimiento y desarrollo de los vegetales. También estos microorganismos son capaces de sintetizar y excretar sustancias fungistáticas inhibiendo el desarrollo de hongos fitopatógenos y favoreciéndose el crecimiento de los cultivos.

En la India la inoculación de cultivos como trigo, arroz y tomate con cepas de Azotobacter en diferentes condiciones agroclimáticas mostraron aumentos significativos en los rendimientos de hasta un 60 %, así como aumentos en la tasa de germinación, sin dejar de apuntar que estos resultados estuvieron en dependencia de la cepa utilizada, aún dentro del mismo género bacteriano.

4.1.3.2. Pérdidas

Las pérdidas de nitrógeno en un agrosistema se deben a: exportación de N por la cosecha, quema de los restos de la cosecha en algunos cultivos, desnitrificación biológica, volatilización, lavado y erosión.

– Exportación

En cualquier cultivo, parte del total de nutrientes extraído por la plantación, es exportado con la cosecha, lo que origina que con el transcurso del tiempo los suelos se empobrezcan, sino se reponen las pérdidas mediante la fertilización. La relación entre extracción y exportación es para un cultivo en particular relativamente constante

y de tal importancia, que se utilizan fórmulas que toma ello como base para recomendar la dosis de nitrógeno a emplear.

En frutales como el mango, algunos indicadores son de utilidad para establecer la dosis de nitrógeno a emplear. Se estima que los nutrimentos exportados por los frutos de mango son un tercio o más de las necesidades totales de la planta, que la eficiencia de la producción nitrogenada es de un 70 % y que el nivel de producción se relaciona con la edad de la plantación.

Una plantación de mangos Haden de 10 años de edad que produzca 22.0 Kg./planta, exportara con esos frutos alrededor de 0.264 Kg. de N/planta (1.2 Kg de N. t^{-1} de frutos), lo que significa que la planta extraería en su totalidad 0.792 Kg. de N y que se necesitarían unos 1 133 g de N/árbol.

– Quema de los residuos

Con el cultivo continuado disminuye la reserva de carbono orgánico del suelo y consecuentemente el de nitrógeno, particularmente cuando no se emplean abonos orgánicos y se queman los restos de la cosecha (Arzola, 2005).

Cuando los restos de cosecha, como la paja de arroz o de la caña de azúcar se quema, desaparece con la combustión, el carácter orgánico de estos materiales, pues el C y el N pasan a la atmósfera. Esto origina que en agrosistemas con similares características, pero diferentes en lo referente al empleo de la quema, sea mayor la necesidad de nitrógeno en aquellos casos en que parte de la biomasa es combustionada.

Lozano et al. (2001) comprobaron que con la quema de los cañaverales, se pierde como promedio bajo las condiciones de este estudio realizado en México, 86 Kg. de N/ha, valor tan elevado, que constituye una prueba fehaciente de la necesidad de suprimir las quemas durante la cosecha.

– Desnitrificación biológica

Estas pérdidas pueden variar entre 0 y 40 % del N aplicado con los fertilizantes en los cultivos anuales, de un 25 a 35 % en pastizales y de 20 a 50 % en arrozales. Se considera que esta es la principal vía de pérdida de nitrógeno del fertilizante en el arroz bajo aniego

– Lavado

Estas pérdidas son mayores en suelos de textura gruesa, en regiones con un elevado régimen de precipitación pluvial y cuando se hacen grandes aplicaciones de nitrógeno en forma nítrica.

El uso indiscriminado de fertilizantes solubles vía fertirrigación durante varios años, tal y como suele tener lugar en las producciones intensivas, origina concentraciones muy altas de nitratos en el suelo, y consecuentemente, eleva de forma notable el riesgo de lixiviación de nitratos (Anónimo 1, 2004).

El problema ambiental más importante relativo al ciclo del N, es la acumulación de nitratos en el subsuelo que, por lixiviación, pueden incorporarse a las aguas subterráneas o bien ser arrastrados hacia los cauces y reservorios superficiales. En estos medios los nitratos también actúan de fertilizantes de la vegetación acuática, de

tal manera que, si se concentran, puede originarse la eutrofización del medio. En un medio eutrofizado, se produce la proliferación de especies como algas y otras plantas verdes que cubren la superficie. Esto trae como consecuencia un elevado consumo de oxígeno y su reducción en el medio acuático, así mismo dificulta la incidencia de la radiación solar por debajo de la superficie. Estos dos fenómenos producen una disminución de la capacidad autodepuradora del medio y una merma en la capacidad fotosintética de los organismos acuáticos. (Anónimo 2., 2004)

La contaminación por nitratos de los principales acuíferos de la provincia de Villa Clara en Cuba, fue debido al indiscriminado uso de fertilizantes nitrogenados y vertimiento de residuos en la década del 80, aparejado de una intensa explotación de las aguas subterráneas. Sabido es, que cuando la contaminación ha sido continua, aún cuando se detenga, la recuperación del acuífero resulta lenta y durante algunos años la contaminación de las aguas seguirá incrementándose, razón por la cual, a pesar de que, a partir de 1990 la aplicación de fertilizantes nitrogenados disminuyó drásticamente y la explotación de las aguas disminuyó considerablemente, los tenores de nitrato siguieron aumentando hasta 1995 (Fundora y Moya, 2004).

Un exceso de nitrato en el suelo ocasiona acumulación del mismo en la planta, se forman nitritos, los que posteriormente se transforman en nitrosaminas, que son agentes cancerígenos para el hombre. El peligro de consumir productos vegetales donde se emplean excesivas dosis de nitrógeno incrementa cuando existen sinergismos entre el nitrato y otras sustancias, como ocurre con el carbaryl, que al combinarse con los nitratos forma nitrosocarbaryl que es un potente cancerígeno.

Porta Casanella et al. (1999) proponen una serie de medidas “preventivas” para el control de nitrato en el medio:

- Ordenar el uso del territorio para proteger la cuenca de bombeo.
- Establecer zonas de protección.
- Orientar el uso de fertilizantes para evitar pérdidas innecesarias de nitrato por lavado. Así el Reino Unido ha limitado la aportación anual a 250 Kg. de nitrato por hectárea.
- Ordenar los cultivos que presentan menos exigencias al nitrógeno.
- Relimitar las áreas sensibles a los nitratos (ASN), en ellas los agricultores deben tener una compensación por la adopción voluntaria de restricciones al uso de fertilizantes, lo que influirá en la producción.

– Volatilización

Se reportan pérdidas entre un 20 y 30 % del N aplicado por esta vía, pero se conoce que dicha magnitud es muy variable ya que muchos factores influyen en las pérdidas por volatilización.

Se considera es sustancial cuando una fuente amoniacal se aplica en dosis elevada a voleo sobre la superficie de un suelo de baja capacidad amortiguadora de H^+ . En arroz anegado Phongpan (1990) reporta pérdidas de un 12 % del nitrógeno aplicado con sulfato de amonio.

Recientemente se ha descubierto un nuevo tipo de bacterias quimiolitotrofos, que acoplan en anaerobiosis la oxidación del amoniaco con la reducción de los nitritos, produciendo nitrógeno molecular y agua ($NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2 H_2O$). Este proceso ha recibido el nombre de oxidación anaerobia del amoniaco (anammox en su abreviatura inglesa).

El descubrimiento de este proceso ha supuesto una revisión de nuestras ideas tradicionales sobre el ciclo del nitrógeno en la naturaleza, ya que antes se pensaba que el amoníaco era estable en anaerobiosis y que no estaba expuesto a pérdidas gaseosas en esas condiciones.

4.1.4. Suministro de N del suelo y demanda del cultivo

En la transformación del nitrógeno orgánico (representa más del 95% de N total del suelo) en nitrógeno mineral; está involucrado un sistema biológico (microorganismos) y en la asimilación del nitrógeno mineral por los cultivos está involucrado otro sistema biológico (la planta) lo cual origina que sea muy complejo predecir la disponibilidad del nitrógeno del suelo y que frecuentemente el análisis de suelo por sí solo, no permita diagnosticar la necesidad de nitrógeno del cultivo por no abarcar la gran cantidad de factores que intervienen en este proceso (aireación, temperatura, humedad, etc.).

Esta dificultad y la complejidad del ciclo del N explican que a pesar de que existen técnicas analíticas que pretenden simular el suministro de nitrógeno del suelo (ej. Por incubación), aún en la práctica no es posible sincronizar, el suministro y la demanda de N del cultivo. La hipótesis de sincronía depende de la igualación del grado de liberación de nutrientes con su grado de extracción

Bartholomew (1965) señala que en general las tasas de mineralización del nitrógeno orgánico en un suelo, oscilan entre 2-10% al año.

Carmen Infante (1988) encontró en Venezuela con el cultivo de la caña de azúcar, que la fracción orgánica representaba el 72% del nitrógeno total (5610 Kg. de N.ha⁻¹), siendo la tasa de mineralización de 343 Kg. de N.ha⁻¹ por año, lo que indica que aproximadamente un 9% del nitrógeno orgánico (equivale a un 6% del total) fue mineralizado.

Las amplias variaciones en la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico del suelo, pueden originar diferencias apreciables, en los requerimientos de fertilizantes nitrogenados de un cultivo, veamos un ejemplo hipotético, asumiendo que existe sincronización entre el suministro de N de un suelo y la demanda de un cultivo.

En este caso se trata de un cultivo con un ciclo anual, con un rendimiento esperado de 50 t de producto por ha. En este caso la exportación de nitrógeno con la cosecha se estima en 1.2Kg. de N por t. de producto cosechado. Atendiendo a estos datos la demanda del cultivo en un año sería:

$$\text{Kg. de N. ha}^{-1} = 1.2 \times 50 = 60$$

Si el suelo contiene un 2% de materia orgánica de la cual un 5% es nitrógeno, el peso de la ha-surco es 2240000 Kg. y la mineralización del N-orgánico es de un 6% anual, el suministro anual de nitrógeno del suelo sería:

$$\text{Kg. de M.O.ha}^{-1} = \frac{2240000 \times 2}{100} = 44800$$

$$\text{Kg. de N total. ha}^{-1} = \frac{44800 \times 5}{100} = 2240$$

$$\text{Suministro anual en Kg. de N.ha}^{-1} = \frac{2240 \times 6}{100} = 134.4$$

En este caso el suministro del suelo, es más del doble de la demanda y por tanto no sería necesario aplicar fertilizante nitrogenado, siempre que el porcentaje de aprovechamiento del N mineralizado del suelo fuera superior a un 45%.

Suponiendo que la mineralización del nitrógeno fuera de un 2% anual, entonces el suministro en un año sería:

$$\text{Kg. de N.ha}^{-1} = \frac{2240 \times 2}{100} = 44.8$$

En este último ejemplo faltan por suministrarle al cultivo aún asumiendo una eficiencia en la absorción de N mineralizado del suelo del 100 por ciento, $60 - 44.8 = 15.2 \text{ kg de N.ha}^{-1}$ durante el año, lo que deberá complementarse mediante la aplicación de fertilizante nitrogenado. Si se conoce que el coeficiente de aprovechamiento real del nitrógeno procedente del fertilizante en esas condiciones es de un 40% entonces la dosis necesaria a aplicar para aportar $15.2 \text{ Kg. de N.ha}^{-1}$ sería:

$$\text{Kg. de N.ha}^{-1} = \frac{15.2 \times 100}{40} = 38$$

La absorción del nitrógeno del fertilizante nitrogenado varía con muchos factores, puede determinarse con N^{15} y por el método de las diferencias. Por el método de N^{15} la cantidad de fertilizante nitrogenado absorbido en experimentos realizados por Yamaguchi y Tanaka (1990), siguió el orden: remolacha azucarera > trigo > papa > arroz > maíz y soja. Por el método de las diferencias, los valores son similares para la papa, el arroz y la remolacha azucarera. Se destaca además en ese estudio que los cultivos que más nitrógeno han extraído del suelo (soja y maíz) son los que menos han aprovechado el fertilizante nitrogenado (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1: Absorción del N del suelo y del fertilizante nitrogenado por diferentes cultivos económicos (Yamaguchi y Tanaka ,1990).

Cultivo	Nitrógeno absorbido (Kg de N.ha ⁻¹)				% de absorción del nitrógeno del fertilizante	
	Sin aplicar nitrógeno	Con N ¹⁵			Método de N ¹⁵	Método de las Diferencias
		N-suelo	N-fertilizante.	N-total		
Arroz	69	68	54	123	36	39
Trigo	135	153	57	209	45	58
Maíz	175	151	48	199	33	16
Soja	191	155	45	200	33	6
Papa	76	81	56	136	38	39
Remolacha azucarera	142	152	76	228	49	53

Las especies de planta varían como se ha visto en su necesidad de nitrógeno, además existen gran número de factores externos y de manejo agrícola que influyen en el aprovechamiento y los requerimientos de fertilizante nitrogenado de los cultivos. Se puede destacar, que los cultivos apenas aprovechan entre la tercera parte y la mitad del nitrógeno aplicado lo que evidencia la importancia de aumentar la eficiencia de la fertilización nitrogenada.

4.1.5. Diagnóstico de los requerimientos de fertilizantes nitrogenados de los cultivos

El análisis químico de suelo ha sido el método masivamente utilizado, con el propósito de detectar, insuficiencias y excesos nutricionales en los cultivos, sin embargo, su predictibilidad ha sido "dudosa" en el caso del nitrógeno, ya que son numerosas las vías de pérdidas y ganancias de este nutrimento y una gran cantidad de factores del medio (temperatura, humedad, luz, etc.) influyen en la transformación por los microorganismos del suelo del nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral asimilable para las plantas, en tanto que las formas iónicas como el NH_4^+ y el NO_3^- , son susceptibles de transformarse con rapidez ó de perderse por diferentes vías, en dependencia de las condiciones del medio (Arzola y Marín, 1985 y 1990; Arzola y Pablo, 2008).

En Pensylvania entre 1983 y 1993 se realizaron 250 experimentos de campo para evaluar varios métodos rápidos de predicción de la asimilabilidad del nitrógeno del suelo y los requerimientos de fertilizantes nitrogenados del maíz. Estos métodos fueron: la concentración de nitratos, 200 nm de absorbancia con un extracto de NaHCO_3 0.01 M (UV 200), la absorbancia cercana al infrarrojo en muestras de suelo de 0-20 cm. tomadas al plantar (NIRS), la concentración de nitratos en los 30 cm. superficiales de suelo, cuando las plantas de maíz tenían de 20-40 cm. de altura (PSNT) y la lectura del contenido de clorofila de la plantas de maíz en diferentes estadios de desarrollo. El uso de estos métodos incrementó la eficiencia de la fertilización nitrogenada pues fue posible eliminar la aplicación de este nutrimento en los campos sin respuesta. Sin embargo se concluyó en que eran necesarias posteriores investigaciones para desarrollar un método o combinación de estos que permitiera predecir con seguridad la dosis óptima de nitrógeno en los campos donde existía respuesta (Fox et al, 1994).

Según Delgado (1994) la cosecha de maíz tiene una inconsistente respuesta a la aplicación de nitrógeno, por lo que no existe un mecanismo para establecer las dosis de nitrógeno requeridas.

Zambello et al. (1983) reportan que la respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada depende de un gran número de factores, no siendo suficientes los análisis químicos y físicos del perfil del suelo para explicar éste fenómeno ya que otras características tales como los contenidos de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , porosidad, estructura, etc. deberán ser seleccionadas con ese propósito.

Otro procedimiento utilizado para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de los cultivos, ha consistido en emplear formulas en que se asume, un suministro de nitrógeno asimilable por el suelo, una reserva de nitrógeno mineral del suelo, una demanda del cultivo y un factor de eficiencia del fertilizante. Stanford (1971) propuso para el maíz, lo siguiente:

$$\text{Nd} = \frac{\text{R.C.} - (\text{Nm} + \text{Nr})}{\text{E}} \times 100$$

Donde:

Nd = Dosis de N a aplicar con el fertilizante.

R.C. = Requerimiento de N de la cosecha.

Nm = N mineralizado de la materia orgánica del suelo

Nr = N mineral residual ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$)

E.= Factor de eficiencia en porciento.

Este procedimiento, tiene como limitación que asume desde etapas iniciales del cultivo un valor fijo de R.C., término éste cuya magnitud podrá variar con el rendimiento que se alcance en la cosecha y por tanto con condiciones ambientales no predecibles. Lo mismo sucede con la mineralización del nitrógeno (Nm) y con el factor de eficiencia (E).

El análisis foliar, ha tenido mayor aceptación que el de suelo como método para el diagnóstico de las necesidades de fertilizante nitrogenados en diferentes cultivos (caña de azúcar, cítricos, etc) ya que en esos casos es la propia planta, la que como integración de todas las condiciones que han existido, extraerá un contenido de nitrógeno. A pesar de ello, como limitaciones se la han señalado a este método lo siguiente:

a) Desde el momento de la toma de la muestra foliar hasta la cosecha, transcurrirá un tiempo, durante el cual la planta continuará creciendo y extrayendo nitrógeno en cantidad impredecible dada la infinidad de factores ambientales que modifican su absorción por la planta, no obstante, esta limitación se atenúa o desaparece cuando se utilizan métodos en que se efectúan muestreos periódicos pero ello es trabajoso y costoso y en la práctica no se deben realizar aplicaciones tardías del fertilizante nitrogenado.

b) El análisis foliar ha presentado baja sensibilidad para apreciar el estado nutricional en el caso de la caña de azúcar (Zambello y Francisco, 1980)

c) En el momento en que se realiza la determinación, ha transcurrido un tiempo que la planta ha vivido bajo condiciones de insuficiencia, cuyos efectos detrimentales, podrían no ser eliminados. Además en ocasiones la fertilización, resulta tardía.

De todos los métodos, el que mayor aceptación ha tenido, ha pesar de su elevado costo y el tiempo requerido para obtener resultados, es el experimento de campo. Una limitación del mismo radica en que con frecuencia no se pueden conocer o cuantificar la influencia de todos los factores que influyen en la respuesta a este elemento, por tanto, no es posible predecir con certeza la necesidad este nutrimento.

La determinación de la clorofila ha sido un método estudiado en los últimos años para diagnosticar la necesidad de fertilizantes nitrogenados (Peltonen et al., 2005). Ferraris et al. (2009) encontraron que la lectura del clorofilómetro N-tester fue sensible a cambios en la intensidad de verdor originada por variaciones en las dosis de N, o diferencias varietales en el cultivo del maíz. Se observó una clara relación entre el rendimiento y la lectura de Ntester, en todos los estadios de cultivo

Es frecuente en estudios con nitrógeno no poder definir las causas por las cuales, existe incremento de rendimiento con la aplicación de fertilizante nitrogenado en unas cosechas o localidades y en otras no. Esto origina que deberá decidirse bien por aplicar este nutrimento en campos que no lo necesitan o por dejar de aplicarlo en algunos que lo requieran, al menos, hasta tanto se conozcan las causas de ello y se introduzcan dentro del sistema de recomendación aquellos factores que influyeron en la variable necesidad de este nutrimento por el cultivo.

Experimentos conducidos durante 7 años con diferentes cultivos han mostrado que el nivel óptimo de nitrógeno se encuentra generalmente alrededor de 100 Kg. de N.ha⁻¹ en arroz y remolacha azucarera, 100 - 200 Kg. de N.ha⁻¹ en trigo y maíz y 200 - 300 Kg. de N.ha⁻¹ en soja y papa. La extracción de nitrógeno siguió el orden soja > remolacha azucarera, maíz y trigo > papa y arroz y que las producciones por Kg. de N extraído se ordenaba de la forma siguiente: remolacha azucarera > papa > arroz > maíz > trigo > soja (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Rendimiento y extracción de N por algunos cultivos (Yamaguchi y Tanaka, 1994).

Cultivo	Rendimiento (t/ha)		Extracción (Kg. de N. ha ⁻¹)		Kg. de producto/Kg. de N extraído	
	Con el nivel óptimo de N	Sin nitrógeno	Con el nivel óptimo de N	Sin nitrógeno	Con el nivel óptimo de N	Sin nitrógeno
Arroz	4.71	2.83	122	74	38	38
Trigo	5.78	4.71	221	142	26	33
Maíz	6.53	5.42	204	152	32	36
Soja	2.96	2.57	207	181	14	14
Papa	9.72	6.28	196	91	50	69
Remolacha azucarera	12.72	11.00	217	155	59	71

Es lógico que como esos resultados se obtuvieron en determinadas condiciones, no deben ser extrapolados a otras y que por tanto se requiere de una abundante base experimental para definir la influencia de cada factor y su interacción con otros y lograr crear un sistema para el uso racional de los fertilizantes nitrogenados.

Los métodos utilizados para diagnosticar los requerimientos de nitrógeno de los cultivos, han permitido avanzar en el uso cada vez más eficiente de este nutrimento; sin embargo, es aún largo el camino por recorrer para quizás lograr un día sincronizar el suministro de este elemento por el suelo y la demanda del cultivo, cuantificar dicha diferencia y aportar exactamente el fertilizante nitrogenado necesario para cubrir dicho déficit. Esto significaría modelar la nutrición nitrogenada de los cultivos, como sucede en un reactor.

4.1.6. Consideraciones para el empleo de los fertilizantes nitrogenados

De las fuentes de nitrógeno utilizadas tradicionalmente (sulfato de amonio, nitrato de amonio, urea, nitrato de sodio, nitrato de calcio, cianamida cálcica, fosfatos de amonio y otros) en la década de los ochenta la urea pasó a ocupar el primer lugar en el consumo en los E.E.U.U. De esos fertilizantes, unos están expuestos principalmente a pérdidas por desnitrificación y lavado de los nitratos (fuentes nítricas) y otras a pérdidas por volatilización del amoniaco (fuentes amoniacaes o que se comportan como tales, ejemplo: urea) debiendo tomarse esto en consideración para seleccionar el portador más eficiente.

Aunque los abonos minerales más utilizados son aquellos que tienen un alto contenido de nitrógeno amoniacal, los iones amonio se fijan en las posiciones de intercambio catiónico de las arcillas o de la materia orgánica y posteriormente sufren el proceso de nitrificación, convirtiéndose en iones nitrato (Bañuls et al., 2000)

Las pérdidas por volatilización se han asociado con un pH del suelo por encima de la neutralidad, suelos calcáreos, baja CIC y baja humedad del suelo.

Las pérdidas por volatilización son mayores con aplicaciones superficiales de altas dosis de nitrógeno en forma amoniacal y cuando el suelo posee una baja capacidad amortiguadora de H^+ , como suele ocurrir en suelos calcáreos. Esto sucede debido a que la pérdida de NH_3 ocurre cuando el NH_4^+ pierde un hidrógeno ($NH_4^+ \rightarrow NH_3 + H^+$), por tanto la reacción se desplaza a la derecha en suelos alcalinos (OH^-). Otros factores influyen en este tipo de pérdidas, pero siempre que la misma sea considerable deberá emplearse una fuente nítrica o tomar medidas para reducirlas, como son: enterrar el fertilizante o aplicar soluciones ácidas (NO_3H , PO_4H_3) conjuntamente con el fertilizante.

Las pérdidas por desnitrificación biológica de los nitrato se asocian a la falta de aireación del suelo, a pesar de ello este proceso no es exclusivo de los suelos mal drenados e hidromórficos, sino que ocurre en todos los suelos en pequeñas cavidades diseminadas en su masa donde imperan las condiciones anaeróbicas o casi anaeróbicas y los microorganismos al no disponer de oxígeno para la respiración utilizan el de los nitratos, reduciéndolos a formas gaseosas (N_2O , NO , N_2). En condiciones donde estas pérdidas son apreciables, como en arroz bajo aniego, deberá preferirse una fuente amoniacal a una nítrica.

Para incrementar la eficiencia de la fertilización nitrogenada, es necesario no sólo la selección de la fuente menos expuesta a pérdidas, sino también la aplicación del fertilizante enterrado cerca del sistema radical del cultivo y sincronizar el suministro de este elemento con la demanda del cultivo. Con ese último propósito lo más sencillo ha consistido en fraccionar en determinados cultivos y condiciones la dosis de nitrógeno aplicada, habiendo surgido en los últimos tiempos otras variantes como son: inhibir la actividad de la ureasa en el caso de la urea, emplear inhibidores de la nitrificación, hacer variar el tamaño del gránulo de fertilizante o envolver este de forma tal que se regule la liberación de nitrógeno.

La planta de arroz presenta la mayor necesidad de nitrógeno durante el macollamiento y el inicio de la formación de la panícula, lo que está en correspondencia con los momentos en que se debe aplicar el fertilizante nitrogenado para alcanzar su mayor eficiencia.

4.2. Estudio del fósforo

4.2.1. Generalidades

De los tres nutrimentos mayores primarios (N-P-K), es el fósforo el que las plantas extraen en menor cantidad; sin embargo, es frecuente que se presente insuficiencia de este elemento en regiones agrícolas del mundo, debido a un pobre contenido de su forma asimilable en el suelo.

El fósforo se pierde de los agrosistemas por la extracción que realizan las cosechas y por erosión, ya que las pérdidas por lavado generalmente se consideran despreciables debido a que este forma compuestos de muy baja solubilidad en los

suelos. Las reacciones que originan la formación de compuestos de fósforo no asimilables en el suelo, explican la necesidad de emplear fertilizantes fosfóricos, en regiones donde el contenido total de este elemento resultaría suficiente para abastecer varias cosechas sucesivas de cualquier cultivo. En otros casos las insuficiencias de fósforo se presentan en suelos que por su origen (Ej. Suelos muy evolucionados, originados a partir de rocas ácidas) no poseen reservas o que un manejo inadecuado del hombre los ha empobrecido.

Los grandes yacimientos de este elemento se localizan en algunos países, mientras otros que apenas poseen reservas deben importarlo a un elevado costo, debiendo realizar un óptimo empleo de este recurso natural no renovable cuya valor se incrementara en la medida que se agoten sus reservas.

4.2.2. El fósforo en la planta

4.2.2.1. Formas de ser absorbido. Funciones

El fósforo se absorbe por la planta como los iones del ácido orto fosfórico; sobre todo como H_2PO_4^- y en segundo lugar como HPO_4^{2-} . En la planta el fósforo existe en un máximo grado de oxidación: como orto fosfato o como pirofosfato. Las plantas jóvenes requieren de un mayor contenido de fósforo en la solución del suelo que las de mayor edad, porque su sistema radical es limitado y porque por su activo crecimiento tienen una gran demanda de fósforo. Las semillas pequeñas con menores reservas de fósforo que las de mayor tamaño dan plántulas que necesitan una concentración mayor del elemento en forma asimilable en el suelo, ya que las reservas de la semilla se agotan con rapidez.

Forma parte de importantes compuestos en las plantas y es indispensable en aquellas reacciones, donde existe intercambio de energía de ahí, que es esencial para el crecimiento y rendimiento.

Los iones fosfato forman parte del ácido ribonucleico (RNA) y del desoxirribonucleico (DNA), compuestos esenciales en el vegetal, que dirigen los procesos vitales y transfieren la información genética.

El fósforo es componente imprescindible del trifosfato de adenosina (ATP); la energía que se capta durante la fotosíntesis que se libera en la respiración se utiliza en la síntesis del enlace pirofosfato en el ATP, el cual permite la transferencia de esa energía para aquellos procesos que la requieren. El ATP por sus propiedades controla el almacenamiento y liberaciones de energía imprescindibles para el funcionamiento metabólico celular y para el metabolismo de los carbohidratos, grasas y proteínas.

Otros trifosfatos nucleótidos análogos del ATP como son el trifosfato de guanosina (GTP), trifosfato de citidina (CTP) y trifosfato de uridina (UTP) también poseen enlaces piro fosfato que permiten la transferencia de energía para formar compuestos tales como celulosa, fosfolípidos, sacarosa y ácido ribonucleico. Coenzimas NAP y NADP intervienen en procesos metabólicos tan importantes como la fotosíntesis, glucólisis, respiración y síntesis de ácidos grasos entre otros.

El fósforo forma parte de grupos funcionales de coenzimas como la co-dehidrasa, coenzima A, fermentos de la respiración, co-carboxilasa, etc. Por medio de la formación de ésteres fosforados, los compuestos orgánicos, por ejemplo, azúcares, alcanzan un nivel energético más alto, lo que activa para reacciones subsiguientes como son la formación de almidón, respiración, etc. (Bergmann y Neubert, 1976).

Los fosfolípidos son importantes constituyentes de las membranas celulares: plasmalema, membrana cloro plástica, tonoplasto, etc.; la lecitina, por ejemplo, gracias a su liposolubilidad posee especial significado para el transporte a través de plasmalema.

En la semilla puede almacenarse como fitina hasta 80% de todo el fósforo contenido en la planta. Esta reserva fosfórica está constituida por la sal calcico-magnesica del "ácido fítico" (éster hexafosforico de inositol). Después de la polinización ocurre un creciente transporte de fósforo hacia la semilla en formación, acumulándose como fitina. Durante la germinación de las semillas la fitina se descompone rápidamente en otras formas de fósforo, las cuales quedan a disposición de las reacciones enzimáticas y de elaboración de sustrato en el metabolismo celular de la plántula emergente. De ahí que si hay insuficiencia de fósforo el poder germinativo de las semillas y el crecimiento de la plántula se inhiben. En los tejidos meristematicos, sede de un activo crecimiento, se encuentran altas concentraciones de fósforo, el cual interviene en la síntesis de nucleoproteínas. En los tejidos vegetativos las reservas de fósforo están constituidas por fosfatos inorgánicos. Estas reservas suministran fósforo al citoplasma; si esta transferencia es insuficiente, el crecimiento disminuye y por debajo de determinado nivel se inhibe (Mengel y Kirkby, 1987).

El fósforo es de importancia tanto para el rendimiento como para la calidad del producto agrícola, interviene en el crecimiento de la planta y ahijamiento, es de especial importancia para el desarrollo reproductivo del vegetal: floración, fructificación y formación de semillas; así por ejemplo, los cereales como el arroz y el trigo tienen una gran demanda de fósforo en la floración y formación de espigas, al igual que otras plantas en la formación de frutos y semillas.

El efecto del fósforo sobre la sanidad de la planta, parece no ser muy evidente, un exceso puede reducir la disponibilidad de Fe, Mn y Zn, lo que puede afectar indirectamente la sanidad de las plantas (Yamada, 1995).

El fósforo es esencial para una buena fructificación y debe estar disponible desde las primeras etapas de desarrollo. De ahí que la fertilización P_2O_5 deba ser aplicada en su totalidad en la siembra. Niveles satisfactorios de fósforo disponibles a través de las raíces son esenciales para su rápido desarrollo y para una buena utilización del agua y otros nutrimentos por la planta (Gómez et al., 2000).

Las funciones del fósforo y del nitrógeno están interrelacionadas de varias maneras; los compuestos inorgánicos del nitrógeno son rápidamente absorbidos y acumulados en los tejidos de la planta cuando los fosfatos "aprovechables" son bajos, pero si estos son abundantes, la absorción de compuestos inorgánicos de nitrógeno se reduce (Ramos, 1998).

4.2.2.2. Insuficiencia

La insuficiencia de fósforo se asocia con el raquitismo, la maduración tardía, el retardo de la floración, la caída de flores y frutos y los tallos delgados.

En general los síntomas visuales de la insuficiencia de fósforo no son muy pronunciados ni específicos. Si no se tiene en cuenta la inhibición del crecimiento, la insuficiencia de fósforo da la impresión de una nutrición nitrogenada óptima, ya que las hojas viejas que han perdido fósforo para trasladarlo a las nuevas, adquieren una coloración verde oscura a verde azulosa, sobre todo al inicio de la insuficiencia. Este fenómeno se debe a que por una parte se acorta el crecimiento de las hojas y por otra

la producción de clorofila apenas es influida por la insuficiencia en su inicio, lo que da lugar a un aumento de concentración clorofílica en la hoja con el consiguiente aumento de la intensidad de su coloración verde. Además, ocurre un aumento de clorofila a (verde azulada), en relación con la clorofila b (verde amarillenta) (Bergmann y Neubert, 1976).

Asociados a esa intensa coloración verde pueden aparecer tintes rojizos, morados o purpúreos; por ejemplo, en los tallos y vainas de los cereales, que alcanzan también las hojas en el caso del maíz. Al faltar fósforo se inhibe la formación de almidón y celulosa, lo cual conduce a una acumulación de azúcar y esto a su vez da lugar a un enriquecimiento de antocianina, la que aporta los mencionados tintes. La antocianina puede acumularse también por otras causas. En otras plantas pueden aparecer coloraciones bronceadas en las hojas más viejas por la formación de pequeñas manchas necróticas. Si la insuficiencia se mantiene pueden aparecer manchas necróticas en los márgenes de las hojas que conducen a la muerte de las mismas. La floración y por lo tanto la fructificación, se hacen tardías si hay insuficiencia de fósforo. Las flores son pequeñas y contrariamente a la insuficiencia de otros elementos la de fósforo permite a la planta existir durante mucho tiempo sin que aparezcan daños en los órganos vegetativos ni señales de muerte, las cuales comienzan por las hojas más viejas. La planta sólo manifiesta, aparte de los síntomas descritos en cuanto a coloración, una inhibición en el crecimiento. Este comportamiento se debe a que cuando baja la concentración de fósforo en la planta, aumenta la actividad de la fosfatasa en la planta, lo que ocasiona que se libere mayor cantidad de iones fosfato de los compuestos orgánicos, los que de nuevo se involucran en el metabolismo del vegetal, así se mantienen temporalmente los procesos vitales, pero como el fósforo interviene en la división celular, el crecimiento de la planta se afecta.

4.2.2.3. Exceso

Solo puede manifestarse por la aplicación abundante de fertilizantes fosfóricos durante muchos años hasta acumularse en tal grado que llegue a afectar a otros nutrimentos como los microelementos Fe, Cu y Zn, por la formación de fosfatos muy poco solubles de estos elementos. En estos casos se habla de enfosfatamiento de los suelos. Otros nutrimentos que pueden ser perjudicados por el exceso de fósforo son Ca, B y Mn.

El fósforo aplicado como fertilizantes en gran parte se absorbe y fija en los coloides del suelo, por ello se mueve muy poco del lugar donde se aplica (Fundora y Arzola, 1981). Una fertilización acorde con los requerimientos del vegetal deja un residuo que va acumulándose en el suelo, sin que generalmente tenga consecuencias adversas sobre la nutrición vegetal. Sin embargo un abonado fosfórico innecesariamente intenso puede al cabo de varias décadas transformar un suelo normal en enfosfatado, sobre todo si el suelo no tiene un gran poder fijador para el elemento.

4.2.3. Fósforo en el suelo

4.2.3.1. Formas de fósforo en el suelo

El contenido total de fósforo en la capa arable de los suelos varía de 0.01 a 0.15%; orgánico entre un 30 y 80% de ese total y el resto inorgánico (Corey, 1968; Garavito, 1979).

Del total de fósforo del suelo, la fracción inorgánica, está constituida predominantemente en los suelos neutrales y calcáreos por fosfatos cálcicos, los cuales disminuyen con el intemperismo del suelo, debido a la pérdida de calcio, originando esto la formación de fosfatos de aluminio y de hierro. Posteriormente los P-Al se transforman en P-Fe que son más estables y aparecen fosfatos ocluidos y unidos a los sesquióxidos (Fassbender, 1980).

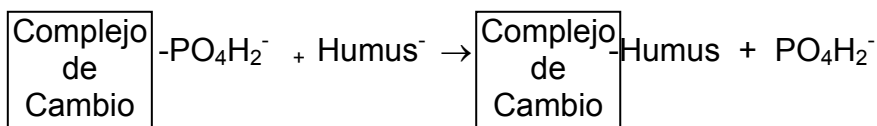
Las fracciones de fósforo del suelo varían con el pH y la génesis del suelo. En caso de reacción neutra o alcalina y suelos poco desarrollados predominan los P-Ca, mientras que en suelos ácidos muy evolucionados predominan los P-Al y P-Fe.

Aunque generalmente los fosfatos forman compuestos muy poco solubles con iones Fe^{+3} y Al^{+3} en medio ácido y con Ca^{++} en medio alcalino, existe un rango de pH (alrededor de 6,5) en el que los fosfatos son más solubles, que es la situación en la que se puede presentar cierto riesgo de lixiviación. (Anónimo 3, 2004). Estas pérdidas fluctúan entre 0.05 y 0.72 Kg.ha^{-1} para suelos arables.

Dentro de los métodos que han sido propuestos para cuantificar las fracciones de fósforo de los suelos, el más generalizado ha sido el de Chang y Jackson (1957), aunque no se considera muy precisa la separación entre fosfatos de aluminio y de hierro (Fassbender, 1980).

El fósforo presente en forma orgánica o inorgánica en la fase sólida del suelo se mantiene en equilibrio con el de la solución del suelo, por ello cuando esta última se empobrece en fósforo, pasa al mismo fósforo de la fase sólida o viceversa. Cuando se aplican fertilizantes fosfóricos solubles $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ con vistas a enriquecer el contenido de fósforo de la solución del suelo, generalmente la mayor porción pasa a formas menos solubles, quedando retenido o fijado en el suelo, haciéndose poco aprovechable por la planta. Este fenómeno varía entre los diferentes suelos y regiones en el mundo pero donde es intenso deberán aplicarse dosis de fósforo suficientemente elevadas como para saturar los puntos de fijación de ese nutrimento en el suelo y mantener una concentración adecuada del mismo en la solución del suelo o emplear enmiendas que disminuyan la capacidad de fijación de fósforo.

Los abonos orgánicos, además de aportar fósforo, forman humus compuesto este que por poseer cargas negativas, compite por las mismas posiciones donde es retenido este nutrimento en el suelo, disminuyendo por ello, con el abonado orgánico la capacidad de retención de fósforo del suelo y quedando parte del que se encontraba retenido en forma disponible para las plantas (Arzola, 1981), como se ilustra a continuación:



El frecuente efecto beneficioso de la materia orgánica sobre la asimilabilidad del fósforo del suelo (Arzola y Melián, 1975; Arzola, 1981; Arzola y Rivera, 1990), no se aprecia en Andisoles. En Ecuador se reporta un incremento proporcional de la capacidad de fijación de fósforo del suelo con el aumento del contenido de C orgánico del suelo (Espinosa, 1996). Esto se atribuye a que la fracción húmica en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al, entonces los grupos hidróxilo combinados con el Al acomplexado entran en reacciones de intercambio de ligandos con $\text{HPO}_4^{=}$ y H_2PO_4^- , como se observa a continuación.

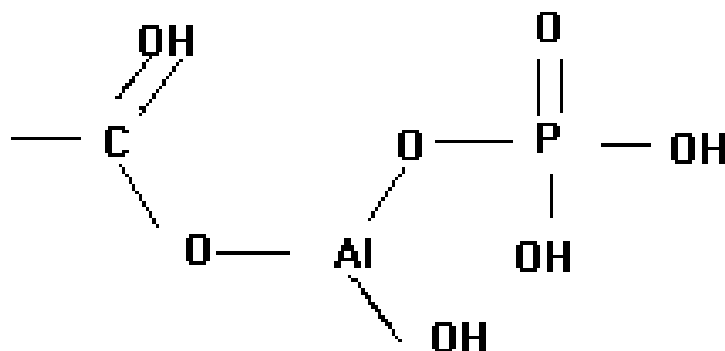


Figura 4.1: Representación esquemática de la fijación de P en la superficie de los complejos humus - Al (Sollins, 1991).

4.2.3.2. Fósforo asimilable

Del total de fósforo del suelo, una fracción insignificante, se encuentra en la solución del suelo como formas iónicas del ácido orto fosfórico (H_3PO_4), de donde es tomado este anión por las raíces de las plantas. Del reemplazamiento del fósforo en solución por las reservas de ese elemento en la fase sólida del suelo, dependerá en gran medida la nutrición fosfórica de los cultivos, por ello se han desarrollado métodos analíticos que valoran no sólo el contenido de fósforo en la solución del suelo (factor intensidad), sino también el factor capacidad que no es más que la cantidad de fósforo que se requiere en la fase sólida para mantener un contenido determinado de fósforo en la solución del suelo.

En el caso del fósforo son conocidas las isotermas de sorción de fósforo. Los términos sorción, absorción y fijación son empleados con frecuencia indistintamente en la bibliografía, debiendo precisarse que en este caso, el término sorción se refiere a un fenómeno en el cual están incluidas la absorción y la fijación de fósforo, entendiéndose por absorción a aquel proceso en el cual el fosfato es retenido por las partículas de suelo, pero se puede intercambiar o pasar fácilmente a la solución del suelo y por fijación a aquel proceso químico en el cual, el fosfato reacciona con los cationes, aluminio, hierro ó calcio haciéndose insoluble o de muy difícil acceso a las plantas.

Para conocer la sorción de fósforo, se agitan diferentes porciones de suelo, procedentes de una misma muestra, con soluciones que varían en su concentración de fósforo. Después que se agitó y estuvo en contacto cada solución fosfórica con el suelo, durante un tiempo determinado, se determina el fósforo que aún permanece en la solución sobrenadante. Ese valor se resta del fósforo inicialmente añadido, lo que equivaldrá a aquella cantidad de fósforo que fue sorbida por el suelo.

Estos datos se plotean en un gráfico en que aparecerá la concentración de fósforo de la solución sobrenadante en el eje de las abscisas y la sorción de fósforo por el suelo en el de las ordenadas. Esta curva es ajustada a, modelos matemáticos elaborados para la adsorción de gases sobre superficies sólidas y se conoce como "isoterma de sorción de fósforo" (Machado, 1980; Villegas et al., 1981).

Las curvas obtenidas para cada suelo, se caracterizan por determinados indicadores, por ejemplo, la ecuación de Freundlich puede escribirse de la forma siguiente:

$$Y=ax^b$$

Donde:

Y= concentración de fósforo sorbida (mg P/g.s.).

X= concentración de fósforo en solución de equilibrio o sobrenadante (mg P/ml).

a= constante que gobierna la posición de la curva.

b= constante que gobierna la forma de la curva.

Para comparar el comportamiento de diferentes suelos puede calcularse el fósforo sorbido, cuando existen 0.2 ppm de P en la solución sobrenadante y mientras mayor resulte el valor encontrado, mayor será el contenido de fósforo que deberá sorber el suelo para mantener una determinada concentración de fósforo en la solución de forma asequible para la planta, aunque también podrá ser mayor su poder amortiguador o capacidad de mantener determinado suministro de este nutrimento para el cultivo

4.2.4. Diagnóstico de la necesidad de fertilizantes fosfóricos de los cultivos

Según Tunney (1997), existe el hecho de que cosechas óptimas pueden lograrse a niveles más bajos de fósforo en el suelo que lo recomendado corrientemente.

Al comienzo de la química agrícola se pretendió evaluar la fertilidad de los suelos, mediante la determinación del contenido total del elemento en el suelo, sin embargo, en breve se encontró que existía poca relación entre dicho contenido y su asimilabilidad para las plantas, excepto en suelos muy pobres en el contenido total del elemento (Viets, 1980).

Una solución extractiva para análisis del suelo, debe extraer una porción representativa de la forma asimilable para la planta. En el caso del fósforo, esta debe incluir el soluble en agua y fracciones representativas de la asimilabilidad para las plantas de los fosfatos de calcio, aluminio e hierro. Ampliamente usadas son las soluciones extractivas por los métodos de Bray no. 1 (0.025 N HCl-0.03N NH_4F), Olsen et al. (0.5N NaHCO_3 a pH 8.5) y la de Mehlich (0.05N HCl-0.025N H_2SO_4) (Mehlich, 1980).

Una solución extractiva será tanto mejor, mientras más estrecha relación guarde la porción que extrae, con el rendimiento y con la absorción de fósforo que del mismo realice el cultivo. En otras palabras, mientras mayor sea la cantidad de fósforo extraído por la solución, mayor será el rendimiento, mayor la extracción de fósforo del cultivo y menor el incremento de rendimiento que se obtiene con la fertilización fosfórica. Mediante experimentos de campo, donde se evalúan los efectos sobre el rendimiento de diferentes dosis de fertilizantes fosfóricos y se analizan los suelos, se establecen las relaciones anteriormente mencionadas y se calibran las técnicas analíticas de fósforo asimilable del suelo (Fundora et al., 1981). Un ejemplo sencillo

para ilustrar el uso del análisis químico de suelo para la recomendación de fertilizantes fosfóricos aparece en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3: Recomendación de fertilizantes fosfóricos para la caña de azúcar (en Kg de P_2O_5 .ha⁻¹).

Grado de abastecimiento	mg.kg ⁻¹ P_2O_5 asim.)	Rendimiento esperado en t. ha ⁻¹			
		<40	>=40 y <=70	> 70 y <=100	> 100
I. Alto	> 40.0	0	0	0	0
II. Medio	20.5-40.0	15	25	35	45
III. Bajo	< 20.5	40	50	60	70

Las categorías de abastecimiento de fósforo establecidas implican una elevada probabilidad de respuesta a la aplicación de fertilizante fosfórico cuando el contenido de fósforo asimilable del suelo es "bajo", dudosa respuesta cuando es "medio" y muy poca probabilidad de respuesta cuando es "alto".

Las dosis de aplicación varían dentro de las categorías "medio" y "bajo", en función del rendimiento que se espera alcanzar. Con esa recomendación se logra un balance nutricional fosfórico de elevado valor positivo (ganancias>pérdidas) en la categoría de "bajo", ligeramente positivo en "medio" y negativo en "alto".

El cálculo de dicho balance resulta simple en el caso de este nutriente, en que prácticamente las ganancias se derivan del abono añadido y las pérdidas principalmente de la exportación por la cosecha (Frissel, 1978).

El sistema propuesto (Cuadro 4.3) origina que con el transcurso de su empleo los suelos bajos en fósforo asimilable avancen con gran rapidez a la categoría de "medio", que es el valor deseado, en tanto que los que se encuentran en la categoría de "alto", tiendan a disminuir su contenido hasta el límite superior del valor medio (4 mg. de P_2O_5 /100 g. de suelo).

La aplicación prolongada de éste sistema (Cuadro 2.3), permitiría que los suelos de bajo contenido de fósforo se enriquezcan en este nutriente, mientras que los suelos altos en el mismo se empobrezcan (Cuadro 4.4), hasta alcanzar todos un contenido óptimo.

Cuadro 4.4. Balance del fósforo en un sistema de recomendación de fertilizante fosfórico al variar el contenido de fósforo asimilable del suelo.

Grado de Abastecimiento	mg. de P_2O_5 .kg ⁻¹	Cociente Aplicación/ Exportación*
I. Alto	> 40.0	0
II. Medio	20.5-40.0	1.1
III. Bajo	< 20.5	2.0

*Exportación de 0.4 kg. de P_2O_5 por t de tallo producido

4.2.5. Consideraciones para el uso de los fertilizantes fosfóricos

Los depósitos naturales de este elemento, presentan un mineral denominado apatita o roca fosfórica, de estos yacimientos los más valiosos, son los de la variedad llamada fosforita, de consistencia terrosa y fácil de moler con 27 a 41 % de P_2O_5 .

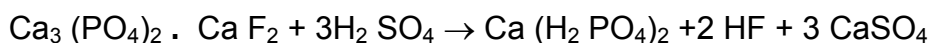
La roca fosfórica es básicamente un fosfato tricálcico, poco soluble en ácido cítrico (5 - 17 % de su P total) y nada soluble en agua, por lo que requiere para su empleo directo como fertilizante de condiciones que permitan la solubilización del fósforo que contiene (molerla finamente, incorporarla con la capa arable y suelos ácidos) y de un cultivo que permanezca suficiente tiempo sobre el suelo como para poder absorber el fósforo que se solubiliza paulatinamente (ejemplo pastos, frutales, caña de azúcar).

La necesidad de aplicar fósforo en las diferentes condiciones edafoclimáticas y cultivos, originó la necesidad de transformar la roca fosfórica en un producto más soluble y que surgiera la industria de elaboración de los fertilizantes fosfóricos.

Los fertilizantes fosfóricos elaborados por el hombre, más antiguos y conocidos son los superfosfatos, cuyo proceso de obtención y características generales son las siguientes:

- Superfosfato simple

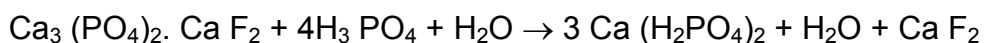
El superfosfato simple, ordinario o normal se obtiene al hacerse reaccionar la roca fosfórica con ácido sulfúrico:



El producto resultante es principalmente fosfato monocálcico y sulfato de calcio, con un 16 a 22 % de P_2O_5 del cual un 90 % es acuosoluble y prácticamente todo asimilable (acuoso + citroso).

- Superfosfato triple

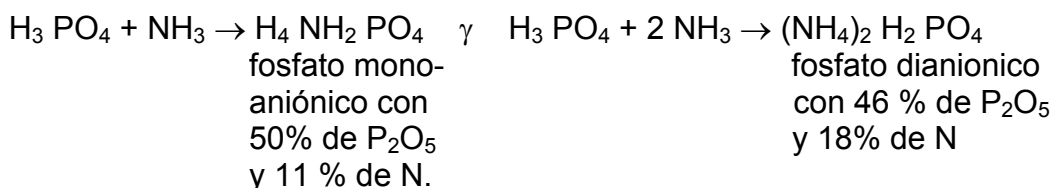
El superfosfato doble, triple o concentrado se prepara haciendo reaccionar la roca fosfórica con ácido fosfórico.



El producto resultante es fosfato monocálcico, con un 45-52 % de P_2O_5 del cual más del 95 % es acuosoluble y prácticamente todo asimilable.

El superfosfato triple es más concentrado que el simple pero no contiene azufre, por ello de encontrarse a igualdad de dosis de fósforo aplicada una diferencia a favor de esta última fuente, ello debe atribuirse a su contenido de azufre.

En la actualidad fuentes de fósforo y nitrógeno muy solubles, son los fosfatos de amonio.



El fósforo es un elemento, que es retenido en los suelos, formando diferentes compuestos inorgánicos, por ello, este elemento se mueve muy poco en el suelo, lo que ocasiona que el fertilizante fosfórico soluble (superfosfatos, fosfatos amónicos) deban colocarse cerca del sistema radical de las plantas, contrariamente la roca fosfórica debido a su escasa solubilidad generalmente prefiere incorporarse con toda la masa de suelo durante la preparación del terreno.

En la actualidad se buscan procedimientos que hagan posible ampliar las condiciones de suelo y los cultivos en que se pueda aplicar la roca con buenos resultados, ya que es mas barata que los fertilizantes solubles que se fabrican a partir de ella.

La roca fosfórica (RF) como fuente de fósforo para aplicación directa ha demostrado ser una alternativa económicamente viable; algunas prácticas incrementan su eficiencia, como: acidulación parcial con ácido fosfórico o sulfúrico, mezcla con estiércol en proceso de fermentación, adición de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, inoculación con micorrizas y utilización de microorganismos que promueven un medio ácido, algunas plantas como *Lupinus arboreus* además de autoabastecerse de fósforo, dejan disponible una fracción para otros cultivos que se encuentren en asociación con ellas. Por otra parte, evaluaciones con RF de Carolina del Norte demostraron que *L. albus* y *L. angustifolius* disolvieron cantidades considerables debido probablemente a la excreción de protones en las raíces que provocaron un decrecimiento del pH de la rizosfera (Rosas et al., 2001).

4.3. Estudio del potasio

4.3.1. Generalidades

De los tres nutrimentos mayores primarios es el potasio el que las plantas extraen en mayor cantidad, habiéndose reportado en ocasiones en cultivos como el plátano y la caña de azúcar, cifras que superan los 1000 Kg. de K_2O por ha. por cosecha, aunque afortunadamente, las reservas de los suelos en potasio total generalmente también son elevadas, variando de 1 a 3% (Garavito, 1979). No obstante, la forma en que este elemento se encuentra en el suelo y el equilibrio entre las mismas, juega un importante papel en la nutrición potásica de los cultivos.

Principalmente, los suelos fuertemente meteorizados de los trópicos húmedos, son pobres en potasio total y asimilable, pudiendo obtenerse en esos casos un notable aumento de los rendimientos con una adecuada fertilización potásica (Fundora et al., 1988).

El potasio, no se encuentra formando parte de la estructura de la célula del vegetal, siendo sus funciones más bien catalíticas. La insuficiencia de potasio no sólo afecta el rendimiento sino también la calidad de muchos productos agrícolas.

4.3.2. El potasio en la planta

4.3.2.1. Formas de ser absorbido. Funciones

El potasio asimilable del suelo se encuentra como K^+ y así lo toma la planta de la solución del suelo. Las membranas celulares muestran una gran permeabilidad para el potasio. La absorción pasiva está dirigida por la actividad de la ATPasa (Mengel y Kirkby, 1987).

Si la concentración potásica de la solución del suelo es menor que la del jugo celular, la planta también absorbe K^+ , este paso al interior de la célula contra un gradiente de concentración que supone un proceso de absorción activa, para el cual se ha propuesto, que existen péptidos cálcicos aptos para unirse al potasio y que desempeñarían el papel de transportadores a través del plasmalema.

El potasio a diferencia del nitrógeno y fósforo, que son componentes estructurales de la biomasa, tiene una función metabólica, catalítica. Casi todo el potasio en el vegetal se encuentra como iones K^+ en el jugo celular, su importancia radica en su actividad iónica así como en su alta movilidad acrópeta y basípeta. Generalmente es el potasio el ión con más alta concentración en la planta. Es el catión más importante en la fisiología de la planta por sus funciones.

Solo una pequeña porción del potasio de la planta se encuentra unido a coloides de la célula y otra menor aún como parte de compuestos estructurales de la misma.

Los tejidos meristemáticos, las hojas metabólicamente activas y los frutos jugosos son ricos en potasio, ya que son órganos especialmente abastecidos con savia del floema y esta es muy rica en potasio, lo que posibilita que se traslade con mucha facilidad a grandes distancias en la planta.

A causa de su gran movilidad, el potasio tiene gran significado dondequiera que sea necesario un rápido cambio de la presión osmótica, por ejemplo, en las células de las estomas; si las células toman K^+ su presión osmótica aumenta y con ello se efectúa la apertura de los mismos; si por el contrario, las células pierden potasio, la presión osmótica disminuye y los estomas se cierran.

Si falta potasio este mecanismo se daña, con lo que el cierre de los estomas se hace más lento, disminuyendo la protección contra una excesiva transpiración, aumentan las pérdidas de agua y la planta se hace más susceptible a la marchitez.

Una planta bien nutrida con potasio tiene tanto una capacidad mayor para tomar agua como para conservarla y puede aprovechar mejor el agua del suelo, pues la mayor presión osmótica celular favorece su entrada en las células de las raíces y protege mejor el agua existente en las hojas contra la transpiración. Si la planta se encuentra bien abastecida de potasio gasta una menor cantidad de agua en la producción de una unidad en peso de materia seca. La cantidad de agua perdida por evapotranspiración por unidad de peso de la planta disminuye con un aumento en la producción de tejido vegetal causado por las funciones que al respecto tiene el potasio y que más adelante se discutirán. Todo ello redundará en una regulación positiva del régimen hídrico de la planta.

El potasio interviene en la transformación de energía luminosa en energía química, ya que activa la reacción entre el difosfato de adenosina (A D P) y un fosfato inorgánico para formar trifosfato de adenosina (ATP) con captación de energía luminosa. La síntesis de compuestos de alto peso molecular exige energía la cual estará disponible en forma de A T P. También interviene el potasio a través de su influencia en la formación de A T P en la liberación de energía de los carbohidratos, la cual se emplea en el metabolismo.

Este elemento favorece la síntesis de la enzima ribulosa- difosfato-carboxilasa, además de estimular su actividad manteniendo un pH óptimo para la misma, lo que resulta en una gran tasa de asimilación de CO_2 (Demming y Glimmer, 1983, citados por Mengel y Kirkby, 1987); además el potasio disminuye la resistencia a la difusión

de CO₂ en el mesófilo, con lo que aumenta su asimilación. El potasio también influye en el transporte de electrones en la cadena fosintética.

Si falta potasio aumenta la respiración, con un gasto excesivo de carbohidratos, ya que este elemento activa enzimas que la inhiben.

Si este elemento es insuficiente disminuye el área foliar por menor formación de tejidos y por la muerte prematura de las hojas viejas que pierden su potasio para trasladarlo a las nuevas; con la consecuente reducción en la fotosíntesis.

Otra consecuencia de la insuficiencia de potasio es que aumenta la actividad de las hidrolasas que descomponen sustancias de alto peso molecular como son la amilasa, sacarasa y proteasa, lo que ocasiona una menor acumulación de compuestos tales como almidón, sacarosa, celulosa, proteína, acompañados de un enriquecimiento de compuestos carbonáceos y nitrogenados de bajo peso molecular.

La menor acumulación de carbohidratos como celulosa y hemicelulosa conduce a la formación de paredes celulares estrechas y con ello a la producción de fibras de mala calidad en plantas como el algodón y a mayor susceptibilidad al acamado en cereales como el arroz y el trigo, ya que las células fibrosas forman parte del esclerénquima, el cual constituye el principal elemento de sostén en la planta; también favorece al acamado el daño de los tejidos conductores en la planta por insuficiencia de potasio. La falta de potasio disminuye la actividad del cambium y con ello la formación de tejido del xilema y floema.

La insuficiencia favorece el ataque de hongos, al haber una pared celular más delgada, menos resistente a la penetración de las hifas. Por otra parte, aumenta el ataque de parásitos al haber mayor cantidad de azúcares solubles que sirven directamente a su nutrición.

La deficiencia de potasio provoca acumulación de aminoácidos que contribuyen a la degradación de los fenoles y de azúcares solubles que son nutrimentos de los patógenos, lo que explica que con la aplicación de este nutriente se produzca un mejoramiento significativo en la calidad de la semilla, en la reducción de la infección por *Phomopsis* sp y en la reducción del daño por chinche en la soya.

Los frutos como la piña y el tomate, así como los tubérculos con insuficiencia de potasio tienen una consistencia blanda y por tanto empeoran sus cualidades de almacenamiento y resistencia durante la transportación.

De todos los nutrimentos es el potasio el que más influye en la calidad del producto agrícola. Si falta, se perjudica la coloración y sabor de los frutos, disminuye el contenido de aceite en oleaginosas, empeora la combustibilidad del tabaco, etc. El potasio favorece el transporte de compuestos orgánicos. La importancia de este elemento en los cultivos productores de azúcar y en los que acumulan almidón en raíces y tubérculos no es sólo por su importancia en la formación de carbohidratos, sino en su transporte desde las hojas hasta los órganos de reserva.

El potasio regula la apertura y el cierre de los estomas, lo primero permite la entrada de anhídrido carbónico y por ende el proceso de fotosíntesis. Al existir una elevada asimilación de CO₂ se necesita que los productos asimilados en las hojas sean evacuados de éstas hacia los demás órganos de la planta, sobre todo hacia las raíces y los tejidos de almacenamiento como lo son los tubérculos, los frutos y las semillas, existiendo mayor flujo de savia por el floema, en las plantas con altas cantidades de K que en plantas con bajas cantidades de K (Inpofos;s/a).

Según Gómez et al. (2000) la nutrición potásica ejerce una fuerte influencia en el metabolismo ácido del fruto del tomate. Los frutos bien nutridos con potasio,

presentan mayores contenidos de sólidos, azúcares, ácidos, carotenos, licopeno que los que están mal nutridos. Un número de desordenes fisiológicos y de madurez, están relacionados con un aporte inadecuado de potasio.

Después que el potasio ha reducido el crecimiento del vegetal, entre otras consecuencias indeseables, ocurre la reducción de la síntesis de proteína, conjuntamente con la acumulación de compuestos nitrogenados como los aminoácidos libres y otros de bajo peso molecular.

Al faltar potasio falta la energía necesaria que debiera aportar el ATP para la síntesis de las proteínas a partir de aminoácidos. Un retardo en la síntesis de proteína conduce a perjuicios en la actividad enzimática, por la carencia de proteínas enzimáticas. Este elemento es el catión más importante en la activación de varios sistemas enzimáticos (Mengel y Kirkby, 1987).

El potasio influye tanto en la formación de ácidos orgánicos como en su neutralización, manteniendo un adecuado pH en la planta.

4.3.2.2. Insuficiencia

Al inicio de la insuficiencia, el crecimiento de la planta se retrasa, después se alcanza un estado estacionario durante el cual la movilización del potasio desde las hojas más viejas no es suficiente para cubrir las necesidades de los meristemos y hojas más jóvenes. Las hojas más jóvenes son menores cuando existe insuficiencia de este elemento.

Por la gran movilidad que tiene el potasio, los síntomas visuales de su insuficiencia comienzan por las hojas más viejas al perder potasio, aunque los primeros síntomas también pueden observarse en las hojas más jóvenes si el crecimiento es rápido.

Al faltar potasio se activan las hidrolasas que descomponen sustancias de alto peso molecular como las proteínas, dando lugar, entre otros compuestos a la putrescina y la agmatina, sustancias tóxicas, las cuales dan lugar a coloraciones pardas debidas a necrosis en forma de puntos o pequeñas áreas necróticas que comienzan en el ápice de las hojas y a lo largo de los márgenes. Estas necrosis forman lesiones pardas, pardoamarillentas a blanca, pequeñas como cabeza de alfileres (en unos casos por ejemplo, en la alfalfa y el trébol) manchas mayores en otras especies como la papa, tabaco, frijoles, algodón, remolacha y cítricos (Bergmann y Neubert, 1976). El tejido necrótico puede limitar con áreas de tejido sano. Si la insuficiencia progresa las manchas o puntos necróticos se extienden desde el ápice y borde de las hojas hasta las zonas de intervalos del medio de la hoja. Los limbos foliares se curvan ya que la detención del crecimiento comienza en los márgenes de las hojas en la mayor parte de las especies hacia abajo, en otras, también en parte, hacia arriba.

La planta con insuficiencia de potasio tiende a adquirir un aspecto marchito por la influencia positiva del potasio en el régimen hídrico de la planta.

Las plantas, afectadas en su crecimiento, muestran acortamiento de las extremidades y el diámetro de los tallos se reduce.

Una disminución de la actividad de la enzima nitratorreductasa, a causa de la insuficiencia potásica, provoca la acumulación de NO_3^- indeseable tanto para humanos como animales.

Si los animales consumen pasto con acumulación de aminoácidos libres, que pueden ser ocasionados por la insuficiencia potásica, ocurre en el rumen un desprendimiento

de amoníaco compuesto tóxico producido porque la fracción no proteica se desamina fácilmente.

El potasio, es un elemento no sólo necesario para las plantas, sino también para el hombre, principalmente en el período que sigue un ejercicio físico agotador, pues entonces el riesgo de arritmia cardíaca es mayor y se ha demostrado el papel del potasio para reducir el riesgo de que se presenten problemas cardíacos en el período vulnerable del cuerpo después de haberse sometido a un ejercicio agotador (Young, 1999). De acuerdo a esto, para los deportistas el consumo de alimentos ricos en potasio (plátano, papa) antes del período agotador, puede prevenir el problema, debido a que el cuerpo humano no puede almacenar suficiente potasio para usar en los períodos de gran demanda.

4.3.2.3. Exceso

Los daños directos a la planta por exceso de potasio prácticamente no existen; únicamente podrían citarse las afectaciones provocadas por exceso de abonado lo que se traduce en "daños salinos" aunque estos perjuicios son atribuibles sobre todo al Cl^- de las sales potásicas (Bergmann y Neubert, 1976).

Los perjuicios provocados por el exceso de potasio son indirectos; entre los más frecuentes se cita la insuficiencia de magnesio, seguida de la de calcio (Guiner et al., 2003).

También el exceso de potasio puede favorecer las insuficiencias de hierro, manganeso, zinc y boro. La absorción de NH_4^+ disminuye con un exceso de potasio.

Se denomina consumo de lujo de K a la absorción excesiva sin que ocasiona daños, lo cual no es raro.

4.3.2.4. Interacción N-K

El exceso de nitrógeno puede atenuarse mediante la fertilización potásica, por ello el balance N/K reviste una gran importancia en el rendimiento y calidad de los cultivos.

La palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq) se cultiva en las tierras bajas de los trópicos húmedos (15°N a 15°S) con precipitaciones que varían de 1800 a 5000 mm distribuidas uniformemente durante el año, se adapta a un amplio rango de suelos, pero es sensible a los pH altos (> 7.5) y al exceso de agua en el suelo. Esta planta ha alcanzado producciones record de hasta 10.6 t.ha^{-1} de aceite crudo de palma (ACP) en Malasia, lo que es más del doble de los record de producción reportados en otros cultivos como el Girasol, Olivo, Colza y Soja (Mutert, 1998). Según este autor el rendimiento de la palma aceitera depende básicamente de la eficiencia de las etapas sucesivas de conversión de energía solar en un producto económico que es el aceite, proceso este en que participa el potasio y el nitrógeno, al influir en la intersección de la luz por las hojas de las palmas (Figura 4.2).



Figura 4.2. Cultivo de palma aceitera en La Hacienda Surucua, provincia Guayas, Ecuador (Arzola, 2006).

Un efecto sinérgico típico de una interacción positiva entre N y K se presenta en las palmas, donde en suelos insuficientes en ambos nutrientes, aplicados individualmente no incrementa la producción de fruta, mientras que la interacción lleva a un mejoramiento muy interesante de la producción de racimo de fruta fresca y de materia seca de la parte vegetativa.

4.3.3. El potasio en el suelo

El potasio total de suelo, no es de naturaleza uniforme, consiste de diversas formas, que se distinguen más de otras por las diferentes maneras de "enlace" en que el elemento se encuentra. El potasio del suelo se clasifica en:

Potasio acuosoluble: Es el que se encuentra como ión casi exclusivamente en la solución del suelo.

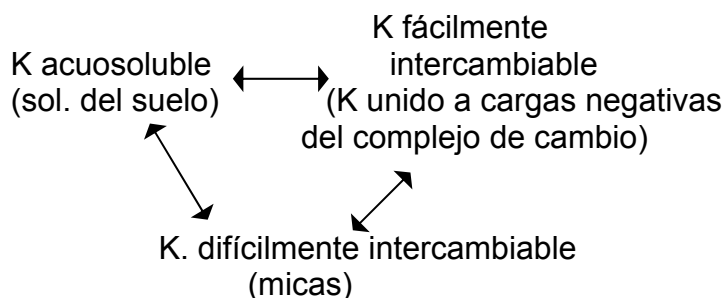
Potasio fácilmente intercambiable: Corresponde con el desplazable con acetato de amonio normal. Este potasio se encuentra en forma iónica unido a las cargas negativas del complejo de cambio del suelo.

Potasio difícilmente intercambiable: Es el que forma parte de los minerales micáceos, encontrándose en planos entre sus capas aluminosilicatados, de donde puede ser reemplazado por cationes isomórficas o menores que él. Esto origina que las micas se transformen gradualmente en illita, vermiculita, montomorillonita y otros minerales.

Potasio no intercambiable: Se corresponde con los feldespatos (ortoclasa, microclina). El potasio se encuentra encerrado en una estructura cristalina aluminosilicatada, en la que cada átomo de potasio está rodeado por átomos de oxígeno y unido a ellos de forma tal que no hay contacto con el medio exterior.

El potasio que forma parte de la materia orgánica del suelo es de tan poca magnitud en los suelos minerales (Dinchev, 1972) que sólo es de interés académico él mencionarla.

Reitmeier (1951) considera que existe un equilibrio dinámico entre el potasio acuosoluble, el fácilmente intercambiable y el difícilmente intercambiable (de reserva)



Entre el potasio acuosoluble y el fácilmente intercambiable, existe un constante equilibrio y cuando ambas formas existen en elevada concentración, garantizan la nutrición potásica de las plantas. Cuando el contenido de estas formas disminuye, parte del potasio que se encuentra formando parte de los minerales micáceos (difícilmente intercambiable) se "libera" y pasa a las formas inicialmente mencionadas. Los contenidos de potasio acuosoluble y fácilmente intercambiable, disminuyen con el desarrollo y crecimiento de las plantas hasta llegar a disminuir por debajo de cierto valor crítico, a partir del cual comienza la liberación del potasio de reserva; por ello, mientras las plantas se desarrollan, el potasio desaparece de los minerales con rapidez pero dicha liberación casi cesa en ausencia de plantas (Black, 1968).

El proceso contrario a la liberación es la fijación de potasio, consiste en la transformación del potasio acuosoluble y fácilmente intercambiable a potasio difícilmente intercambiable. Como en ambos procesos el potasio ocupa los huecos hexagonales que forman los tetraedros que se encuentran en la lámina de sílice de las arcillas 2:1, no es sorprendente que la capacidad de fijación de potasio de los suelos incremente con su liberación (Mengel, 1972; Grimme, 1977). La fijación de potasio tiene lugar en arcillas del tipo 2:1 como la vermiculita e illita expandible.

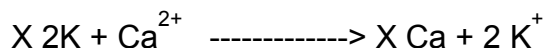
4.3.4. Diagnóstico de la necesidad de fertilizantes potásicos

El balance del potasio, es principalmente dependiente de las pérdidas por la exportación que de este nutriente realiza la cosecha, del lavado y de la erosión hídrica y las ganancias de lo que se aporta con la fertilización.

Como el balance de este nutriente, es relativamente sencillo y el análisis químico de suelo generalmente se ha relacionado con la necesidad de fertilizantes potásicos de los cultivos, los métodos basados en la determinación del contenido de potasio del suelo están ampliamente difundidos para el diagnóstico, reportándose generalmente

niveles críticos de potasio cambiabile de los suelos mediante extracción con acetato de amonio 1N entre 0.3-0.4cmol⁺.kg⁻¹(Fundora, 1979; Fundora et al., 1988).

En el caso del potasio tiene mayor importancia el equilibrio físico-químico en el suelo que las reacciones de precipitación y liberación que caracterizan la dinámica del fósforo en el suelo. Si un ión monovalente como el potasio (K⁺) se encuentra en un intercambiador (X), de presentarse un ión divalente en la solución del suelo (Ca²⁺ y/o Mg²⁺) ocurrirá el siguiente intercambio.



Siendo la constante de intercambio.

$$K_i = \frac{(X \ Ca)}{(X \ K)^2} \left(\frac{K^{+}}{Ca^{2+}} \right)^2$$

Lo anterior indica que de determinarse la relación $\frac{(K)^2}{(Ca^{2+})}$

o la denominada "razón de actividad" de la solución del suelo: $AR = \frac{(K^{+})}{\sqrt{Ca^{2+}}}$

y el contenido de potasio cambiabile en el complejo de cambio, podrían establecerse curvas que informen sobre las posibilidades del suelo de mantener el abastecimiento potásico de la planta en mayor o menor medida en oposición a las pérdidas y el antagonismo con el calcio a que este nutrimento es sometido.

Las isotermas de fósforo y los potenciales potásico, brindan una valiosa información para el diagnostico de los requerimientos de fertilizantes fosfóricos y potásicos del cultivo, pero requieren de mucho trabajo y de personal especializado para su confección e interpretación.

4.3.5. Consideraciones para el uso de los fertilizantes potásicos

Las mayores reservas de potasio conocidas en el mundo, se encuentran en la provincia de Saskatchewan en Canadá, en varias regiones de EE.UU., en territorio de la extinta URSS en el Mar Muerto y en varios países de Europa.

A partir de las sales potásicas de esos yacimientos, se elabora el cloruro o muriato de potasio (KCl) con 60-62% de K₂O, el sulfato de potasio (K₂SO₄) con 50-53% de K₂O, el nitrato de potasio (KNO₃) con 40-46% de K₂O, el sulfato de potasio y magnesio (K₂SO₄.MgSO₄) con 22% de K₂O y otros fertilizantes potásicos.

Los fertilizantes potásicos más comúnmente utilizados son el cloruro y el sulfato de potasio, de ellos el primero es más barato y debe preferirse siempre que el ión cloruro no perjudique la calidad, como ocurre en el caso del tabaco y la papa, cultivos estos donde se prefiere emplear el sulfato de potasio.

Debido a que este elemento no posee gran movilidad en el suelo (más que el fósforo y menos que el nitrógeno) debe aplicarse cerca del sistema radical del cultivo y en una sola aplicación basal para una cosecha, excepto en suelos arenosos donde se reporta en ocasiones ventajas con el fraccionamiento de la dosis total.

Se ha demostrado que el fósforo se mueve muy poco en el suelo, pudiendo llegar, aproximadamente, entre 4 y 16 cm según la textura de los suelos; en cambio, el

potasio puede moverse a distancias algo mayores. Debido al comportamiento de estos elementos en el suelo, su colocación en el centro del sistema radical, donde la disponibilidad de agua es relativamente alta y estable en el tiempo, garantizaría una mayor disponibilidad de dichos nutrimentos por la planta. La absorción del fósforo y el potasio será mayor cuando la humedad del suelo sea permanente y exista una alta densidad radical, de tal manera que se garantice el movimiento de los iones hacia las superficies activas de las raíces, por difusión o en la masa del agua del suelo (Ramírez et al., 2004).

Aplicaciones foliares con soluciones de N y K al inicio de la floración del algodón, a intervalos semanales o quincenales, durante 3 ó 4 ocasiones, a razón de 6 a 11 kg de N.ha⁻¹ y/o 5kg de K₂O.ha⁻¹, incrementan la producción al prevenir las pérdidas de rendimiento asociadas con deficiencias de N ó K. Estas aplicaciones foliares se consideran un complemento de la fertilización al suelo, que resulta adecuado cuando el cultivo se muestra saludable, los insectos bajo control, la humedad del suelo es adecuada y el potencial de rendimiento aparece bueno (Snyder, 1999).

4.4. Factores que influyen en la recomendación de fertilización con NPK

Si se considera que un cultivo requiere una composición determinada para alcanzar el nivel de rendimiento que el hombre considera que le ofrece los mayores beneficios, entonces, el fertilizante necesario a emplear será el que permite alcanzar ese propósito. Si con los nutrientes disponibles en el suelo, ello se logra, se puede prescindir de los fertilizantes, en caso contrario se requiere de su empleo en una cantidad tanto mayor mientras menos pueda tomar dicho cultivo del suelo y menos eficiente resulte la utilización de los fertilizantes aplicados.

Existen diferencias en los requerimientos nutricionales y en los sistemas radicales de los diferentes cultivos y variedades, lo que representa una diferencia genética (factor interno) que origina que lo que resulta óptimo para uno no lo sea para otro.

Los factores externos bióticos y abióticos que influyen en el rendimiento y la extracción de nutrientes por los cultivos son muy numerosos, lo que complica tanto el diagnostico de la necesidad de fertilizantes de los cultivos, como la aplicación de las medidas que permiten optimizar su aprovechamiento y alcanzar los resultados económicos y ecológicos deseados.

Desde el punto de vista de la ley del mínimo, cualquiera de los factores ambientales que actúe como limitante, impedirá que otro factor modifique favorablemente el rendimiento. En correspondencia con ello el efecto de la fertilización mineral sobre el rendimiento será tanto mayor si se seleccionan variedades de elevado potencial de rendimiento y se emplea un óptimo manejo agronómico. Para lograr ese propósito una gran cantidad de factores presentes en cualquier localidad, deben ser evaluados y categorizados y recomendar en correspondencia con ello, medidas para mejorar todos aquellos factores que son modificables e incluir dentro del diagnostico de la necesidad de fertilizantes aquellos factores que no son modificables por el hombre e influyen en los resultados que de ellos se esperan. Algunos de estos factores, sus consecuencias y medidas para atenuar su efecto negativo serán comentados.

-Las rocas, piedras, gravas y concreciones disminuyen el área total útil para el cultivo, pues en la medida que aumentan, disminuye el espacio ocupado por las raíces, por lo que se requiere del empleo de mayor dosis de fertilizantes.

-La compactación provoca que disminuyan los macroporos en el suelo, lo que es de poca trascendencia en aquellas condiciones en que abunden espacios porosos (ejemplo suelos arenosos), pero no donde estos sean reducidos (ejemplo suelos arcillosos pesados). En estas condiciones se limita el crecimiento del sistema radical y se acumula exceso de humedad en época de lluvia, lo que puede disminuir la aireación hasta valores, que afectan la absorción de nutrimentos por el cultivo disminuye por ello la tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo y aumenta la desnitrificación biológica de los nitratos. Para atenuar este efecto debe descompactarse el suelo mediante adecuadas labores de cultivo, empleo de abonos orgánicos e incrementar la dosis de fertilización mineral de acuerdo a la intensidad de esta limitación.

-La condición de hidromorfia se presenta en suelos llanos con mal drenaje, donde el suelo se satura de agua, bien sea de lluvia o procedente de un manto freático cerca de la superficie. El exceso de humedad ocasiona, la muerte de las raíces y su mal funcionamiento, afecta la absorción de nutrientes y agua, por otra parte, se pierde mayor cantidad de nitrógeno del suelo por desnitrificación y se aporta menos en forma asimilable por disminuir la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico del suelo. A este efecto negativo debe sumársele las consecuencias de la falta de energía, producto de la falta de oxígeno para la respiración, lo que afecta la absorción de nutrientes por las raíces, particularmente potasio, por lo que se requiere de adecuadas medidas de drenaje o del empleo de mayores dosis de fertilizante.

-El exceso de carbonatos suele encontrarse en las partes altas de pendientes erosionadas en suelos sobre calizas suaves y donde el proceso de formación ha facilitado la acumulación de carbonatos de calcio finamente dividido. En estos suelos pueden ocurrir cuando se aplica superficialmente una forma amoniacal de nitrógeno, grandes pérdidas de N por volatilización, también es frecuente la clorosis férrica. Se afecta la asimilabilidad del fósforo cuando se forman fosfatos de calcio insolubles, la del potasio por ser antagónico con el calcio y para atenuar las pérdidas de nitrógeno en forma amoniacal deben preferirse en este caso fertilizantes nitrogenados en que el nitrógeno no se presente en forma amoniacal.

-En aquellos terrenos con pendiente, en los cuales la erosión causa pérdidas de la capa arable (principalmente se pierden las partículas que más influyen en su fertilidad, arcilla y materia orgánica), se debe evitar o atenuar ese proceso, para conservar la profundidad efectiva del suelo, pues en la medida que esta es menor, también lo es el sistema radical de la planta y su capacidad de absorber nutrientes. En caso de no poder eliminarse la causa de la poca profundidad efectiva (por ejemplo labores profundas que rompan una capa endurecida), para compensar este efecto deben emplearse abonos orgánicos, riego y mayor dosis de fertilizante mineral

-En aquellos terrenos con mal drenaje, la falta de aireación afecta por varias razones como se explico anteriormente la asimilación de nutrientes. En contraposición se presentan áreas con drenaje excesivo, como suelos arenosos donde las pérdidas por lavado de nitrógeno pueden ser elevadas, además la sequía causa menor solubilidad y absorción de nutrientes por la planta.

-La salinidad, se relacionan con la acumulación de sales solubles en el perfil de suelo que pueden ser ocasionadas por la acción del hombre con el riego con aguas de baja calidad, sin normas apropiadas de entrega ni sistemas de drenaje adecuados, por la presencia del manto freático cercano a la superficie o por problemas de drenaje con acumulaciones de agua por períodos prolongados que favorecen las condiciones de hidromorfía. El efecto principal asociado a la presencia de altos contenidos de sales en la solución del suelo o de sodio cambiante (sodicidad), es que se dificulta la absorción de agua, hay un efecto tóxico, muerte de las raíces y despoblación del campo.

La eliminación de la salinidad resulta en extremo costosa, es necesaria la construcción de sistemas de drenaje desde el nivel parcelario hasta el de cuencas, por lo que se recomienda considerar el desuso de estas tierras para el cultivo o en caso de contar con los medios, establecer las obras de drenaje, lavado de sales y medidas fitotecnias apropiadas. En caso de sodicidad se requiere además de la aplicación de yeso para eliminar el sodio cambiante. En estos casos la aplicación de fertilizantes minerales no solo resulta sin efecto sobre el rendimiento y con pérdidas económicas hasta tanto se elimine el factor limitante (salinidad o sodicidad), sino que puede incrementar el contenido salino del suelo y agravar la situación.

-La textura, afecta diferentes propiedades del suelo, cuando es arcillosa, con presencia de arcillas del tipo 2:1 disminuye la percolación del agua y la aireación, se afecta la respiración radical y son mayores las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación, en tanto que en suelos arenosos son mayores las pérdidas particularmente de nitrógeno por lavado y la falta humedad afecta el crecimiento de la planta y la absorción de agua.

-La reacción del suelo, afecta en sus dos casos extremos, en suelos alcalinos: el exceso de carbonatos, la salinidad y la sodicidad suelen ser los factores limitantes. Mientras que en suelos ácidos, suele ser mayor la fijación del fósforo, menor la mineralización de la materia orgánica, aparece insuficiencia de bases como calcio y magnesio y valores tóxicos de aluminio que afectan el desarrollo del sistema radical, la absorción de nutrientes y agua y el rendimiento del cultivo.

Para ilustrar con un ejemplo como se podría elaborar un sistema de recomendación de fertilizantes minerales, se expone a continuación un ejemplo esquemático para el cultivo de la caña de azúcar. Ese ejemplo no significa en modo alguno que sea general para dicho cultivo o localidad donde el mismo se encuentre, pues en cualquier caso deberá fundamentarse en los resultados de experimentos de campo realizados en diferentes condiciones ambientales, de manejo agrícola y de variedades empleadas. Por esa razón, solo debe interpretarse a modo de orientación sobre el aspecto que ha sido objeto de atención en este epígrafe. En el Cuadro 4.4 se exponen las bases para elaborar una recomendación para el nitrógeno.

Cuadro 4.4. Recomendación de nitrógeno para caña de azúcar

Caña planta		Retoños	
Suelos sin limitaciones	Suelos con Limitaciones	Suelos sin limitaciones	Suelos con limitaciones
(TCH)(0.5kgN/t caña)	(TCH)(1.0kgN/t caña)	(TCH)(1.6kgN/t caña)	(TCH)(2.00.5kgN/t de caña)

Suelos con limitaciones: presentan alguna de las características siguientes: hidromorfia, compactación (4.-Muy compactado, 5.-Extremadamente compacto), mal drenaje (6.-Pobrementemente Drenado, 7.- Muy Pobrementemente Drenado), < 20 cm. de profundidad efectiva, excesivo contenido de piedras, gravas o concreciones (5.- Muchas de 15-40%, 6.-Abundantes 40-80%, 7.-Dominantes>80%), <1 % de materia orgánica. En el Cuadro 4.5 se exponen las bases para elaborar una recomendación para el fósforo

Cuadro 4.5. Recomendación de fósforo para caña de azúcar

CATEGORÍA	Intervalo (mg de P_2O_5 . kg^{-1} de suelo)	Intervalo (mg de P_2O_5 100g)	Dosis en Kg. de P_2O_5 /ha	Valores de C
ALTO	> 30.0	> 3.0	(TCH)(C_1)	$C_1 = 0$
MEDIO	15-30	1.5-3.0	(TCH)(C_2)	$C_2 = 0.80$
BAJO	< 15	< 1.5	(TCH)(C_3)	$C_3 = 1.00$

El valor de C (kg de P_2O_5 /t de caña) está por encima de la exportación de fósforo de la cosecha en los suelos de contenido BAJO o MEDIO y por debajo en los de contenido ALTO (para mantener sin variar el contenido de fósforo del suelo, se considera una exportación de 0.5 Kg. de P_2O_5 / t de caña).

En el Cuadro 4.6 se exponen las bases para elaborar una recomendación para el potasio

Cuadro 4.6. Recomendación de potasio para caña de azúcar.

Categorías	K Intercambiable ($cmol^{(+)} \cdot kg^{-1}$)	Dosis en Kg. de K_2O /ha	Valores de (caña planta)	Valores de C (retoños)
Muy Alto	> 0.70	(TCH)(C_1)	$C_1 = 0$	$C_1 = 0$
Alto	0.41 – 0.70	(TCH)(C_2)	$C_2 = 1.00$	$C_2 = 1.50$
Medio	0.20 – 0.40	(TCH)(C_3)	$C_3 = 2.25$	$C_3 = 2.40$
Bajo	< 0.20	(TCH)(C_4)	$C_4 = 2.75$	$C_4 = 3.00$

C=kg de K_2O /t de caña. Valor que está por encima de la exportación de potasio de la cosecha en los suelos de contenido BAJO o MEDIO y por debajo en los de contenido ALTO o MUY ALTO (para mantener sin variar el contenido de potasio del suelo se considera 2.15 Kg de K_2O / t de caña).

4.5. Implementación de las recomendaciones de fertilizantes

4.5.1. Generalidades

Al área que representa una muestra de suelo a partir de la cual se realizara la recomendación y aplicación de fertilizante, se le denomina unidad de muestreo. En la medida en que es menor la variabilidad espacial de la característica objeto de estudio y que disminuya el tamaño de la unidad de muestreo, se lograra mayor representatividad de la muestra y mayor exactitud en la recomendación de fertilizante. La composición y características de los suelos, el clima, factores bióticos y el manejo agrícola, hacen que los requerimientos de fertilizantes minerales sea muy variable y que para lograr precisar cada vez mas lo requerido, el área que representa una muestra de suelo (a partir de la cual se definirá la dosis y formula de fertilizante mineral) debe ser lo más homogénea. En la medida que la recomendación de fertilizante se elabore con información proveniente de un área más homogénea, disminuirá el error proveniente de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y será más precisa la recomendación de fertilizantes minerales. Siguiendo ese principio y disponiendo de la tecnología moderna la agricultura en los EE.UU., ha introducido, principalmente en cultivos de cereales, un procedimiento que permite aplicar prácticamente lo que se requiere en cada metro lineal de suelo, surgiendo con ello el término "agricultura de precisión" o "por sitio específico".

Esta tendencia actual es contraria a la de agrupar áreas con una formula de fertilizante, por ello siempre que existan condiciones y recursos para la inversión inicial que esto requiere, la agricultura por sitio específico, posibilitara mayores ganancias, rendimientos y protección ambiental.

4.5.2. Formulas de fertilizante

Los elementos que resultan esenciales para el desarrollo y crecimiento de los cultivos, no están disponibles en forma pura para ser aplicados por el hombre en las plantaciones, si no formando parte de compuestos naturales o sintéticos que se conocen bajo la denominación de fertilizantes o abonos.

Una vez que se ha determinado la dosis de nutrimento que deben ser utilizados por unidad de superficie agrícola; cuestión esta que comúnmente se realiza para el nitrógeno, fósforo y potasio, se requiere calcular la equivalencia de las mismas en la forma de aquellos fertilizantes disponibles en la unidad agrícola.

Puede suceder que se disponga de portadores simples o sea de fertilizantes que aportan sólo uno de los nutrimentos y que se necesite conocer la dosis individual de estos a aplicar.

Si sólo existe respuesta al nitrógeno y se dispone de nitrato de amonio, con 34% de N, bastara con transformar los Kg de N.ha⁻¹ a Kg de NO₃NH₄.ha⁻¹, lo mismo ocurrirá de requerirse de la aplicación de 2 o 3 nutrimentos, disponerse de portadores simples para cada uno de ellos y contarse con un equipo para la fertilización que pueda regular la dosis de aplicación de cada uno de ellos.

De pretenderse aplicar varios nutrimentos de una vez, con un solo portador, deberá calcularse la formula de fertilizante a emplear y como se elaborara. Esto es común para los macroelementos primarios, los que aparecen comúnmente en dichas fórmulas expresados en porciento de: N- P₂O₅- K₂O.

Puede resultar provechoso elaborar una fórmula de fertilizante completo con el propósito de realizar una aplicación que incluya los tres nutrimentos, siendo necesario para ello, calcular previamente la cantidad de portadores que se requieren para su elaboración.

Las variantes que se pueden utilizar para aplicar los nutrientes requeridos en una unidad mínima de manejo agrícola mediante formulas o mezclas de fertilizantes se pueden resumir en tres, cada una con sus ventajas y desventajas, que serán comentadas a continuación:

1.-*Elaboración de formulas de fertilizante en una fábrica:* Solo se pueden elaborar un grupo limitado de formulas y no se cumplen con exactitud los requerimientos nutricionales de cada unidad mínima de manejo de agrícola, además se requiere del empleo de un material inerte, sin valor como fertilizante para completar las formulas (relleno).

2.-Mezclar en la propia unidad de producción los tres portadores simples requeridos para cada unidad mínima de manejo agrícola y el peso total de estos aplicarlo en la unidad mínima de manejo agrícola (UMMA). Este procedimiento hace posible aplicar la cantidad exacta de nutrientes sin emplear relleno, pero se elaboran un número infinito de combinaciones, la cantidad de fertilizante a emplear varía prácticamente para cada UMMA, por ello requiere de cambios constantes en la regulación de la fertilizadora (esto también ocurre cuando se emplean los portadores simples por separado). Esto requiere de una supervisión constante al operador de la fertilizadora, lo que es prácticamente imposible (excepto si dicho operador tiene sentido de pertenencia y autodisciplina en la labor que realiza).

3.-Empleo de dos portadores con concentraciones diferentes para aplicar un nutriente (ejemplo para el nitrógeno utilizar urea 46% N y sulfato de amonio con 20% de N) y de un solo portador para aplicar los elementos restantes (fósforo y potasio), aunque los portadores de alguno de estos dos elementos podrían contener también nitrógeno. Este procedimiento hace posible aplicar la dosis exacta en cada cantero sin necesidad de relleno y reduce considerablemente el número de regulaciones de la fertilizadora al cambiar de UMMA. La única desventaja de este procedimiento es que existe un portador poco concentrado (en este caso el sulfato de amonio), lo que encarece esta actividad, aunque ello se compensa en este caso porque se aplica azufre, nutriente que apenas se le aporta a los cultivos en la actualidad.

Dado que este procedimiento es el más ventajoso y a su vez el más complicado para el cálculo se ilustrara con un ejemplo.

En esta variante se fija la dosis de aplicación por hectárea (por ejemplo 500kg/ha) y en caso de obtenerse valores negativos en los cálculos, que indiquen que esta dosis es insuficiente se establece otra dosis 600 kg/ha y así sucesivamente; lógicamente este proceso se realiza con gran rapidez y precisión si se programa para un sistema automatizado.

En este ejemplo se incluirá además de los tres elementos mayores primarios un micro elemento (Zn).

Se dispone de los portadores simples siguientes:

N: Sulfato de amonio 20% de N

N: Urea 46% de N

P: DPA 18 % N y 46 % de P_2O_5

K: KCl 60% de K_2O

Zn: $SO_4Zn \cdot 7H_2O$ (22% Zn)

Los requerimientos de nutrientes son:

N: 115kg de N/ha

P: 50 Kg. de P_2O_5 /ha

K: 75 Kg. de K_2O /ha

Zn: 5 Kg. de Zn/ha

Para este cálculo se comienza con aquellos elementos que en su totalidad se aportan con un portador (Zn, K, P), después si alguno de ellos suministra nitrógeno se calcula cuanto aporta de ese nutriente (DAP para N), esto se resta de la necesidad total de nitrógeno y finalmente se calcula aquel nutriente que dispone de dos portadores con concentración diferente (urea y sulfato de amonio). La necesidad de cada portador simple seria:

$$SO_4 Zn \cdot 7H_2O = 5 \times 100 / 22 = 22.7 \text{ kg}$$

$$KCl = 75 \times 100 / 60 = 125.0 \text{ kg}$$

$$DPA = 50 \times 100 / 46 = 108.7 \text{ kg}$$

$$\text{Total} = 256.4 \text{ kg}$$

De los 500kg totales de portadores falta por aportar

$$\text{Portadores que faltan} = 500 - 256.4 = 243.6 \text{ kg}$$

En ese volumen de mezcla (243.6kg) se debe aportar el nitrógeno que aun falta utilizando el $SO_4 (NH_4)_2$ y la Urea. Pero ya parte de los 115 kg de N se aportaron con el DAP

$$DAP(N) = 108.7 \times 18 / 100 = 19.6 \text{ kg de N}$$

Es decir lo que falta por aplicar de N, seria la diferencia:

$$N \text{ que falta} = 115 - 19.6 = 95.4 \text{ Kg. de N}$$

Entonces se pueden realizar dos igualdades:

Primera igualdad: 243.6kg de portadores = Portador de urea (kg) + Portador de sulfato de amonio (kg)

X = portador de urea

Y = portador de sulfato de amonio

Segunda igualdad:

$$95.4 \text{ kg de N} = \text{Kg de N del sulfato de amonio} + \text{kg de N de la Urea}$$

Para calcular el sulfato de amonio, se debe tener presente que de acuerdo a la primera igualdad la cantidad de ese portador seria:

$$y = 243.6 \text{ kg} - x$$

Por tanto, el N a aportar con el sulfato de amonio seria:

$$\text{Kg de N del sulfato de amonio} = 20 (243.6 - x) / 100 = 48.72 - 20x / 100 = 48.72 - 0.2x;$$

Kg de N del sulfato de amonio= $48.72 - 0.2x$

Veamos ahora cuanto se debe aplicar con la urea:

Kg de N de la urea= $46x/100$, ahora podemos sustituir en la segunda igualdad:

$$95.4.6 \text{ kg de N} = (48.72 - 0.2x) + (0.46 x)$$

$$95.4 \text{ kg de N} = 48.72 + 0.26 x$$

$$x = 179.54 \text{ kg de urea}$$

$$y = 243.6 - 179.54 = 64.06 \text{ kg de sulfato de amonio}$$

Comprobación

$$\text{Kg de N de la urea} = 179.54 \times 46 / 100 = 82.6$$

$$\text{Kg de N del sulfato de amonio} = 64.06 \times 20 / 100 = 12.81$$

Total de aporte de nitrógeno (kg)

$$\text{DAP} = 19.6$$

$$\text{Urea} = 82.6$$

$$\text{Sulfato de amônio} = 12.8$$

$$\text{Total} = 115$$

Como puede apreciarse se aplicaron exactamente los 115kg de N, sin necesidad de relleno, además se aportó azufre y Zn.

No es posible reducir con este método todas las variantes de necesidades nutricionales a una sola dosis de aplicación de la mezcla de portadores, pero se reduce enormemente el número de combinaciones, digamos a 500, 600 y 700kg/ha.

Elaboración de la mezcla

Debe tenerse presente que esta es una mezcladora pequeña (similar a una concretara) con capacidad limitada, asumiendo que esta sea de 4 sacos de 50 kg (200kg), como se conoce la relación entre los portadores que se mezclarán se puede calcular para una operación de mezclado la necesidad de cada portador en kg (Cuadro 4.7)

Cuadro 4.7: Elaboración de mezclas de portadores simples en la unidad de producción agrícola

PORTADOR	PARA 1ha	PARA UNA MEZCLA
$\text{SO}_4 \text{ Zn.7H}_2\text{O}$	= 22.7 kg	9.1 kg
KCl	=125.0kg	50.0 kg
DPA	=108.7kg	43.5 kg
UREA	=188.0kg	75.2 kg
$\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$	=55.6kg	22.2 kg
Total	=500 kg	200 kg

Para agilizar el añadir esos portadores cuando la cantidad no sea un saco entero es necesario tener vasijas taradas para cada portador, pues cada portador tiene una densidad diferente.

Bibliografía Consultada

Anónimo 1. : Fuentes de contaminación de nitratos y otros compuestos nitrogenados. Miliarium Aureum, S.L. (en línea). Marzo de 2001. (Fecha de acceso: 7 de febrero de 2004) URL disponible en: www.miliarium.com/Monografias/Nitratos/Fuentes.asp.

Anónimo 2.: Contaminación del suelo. Tema 14. Contaminación por fertilizantes nitrogenado(Enlínea)2004.URLdisponibleen:edafologia.ugr.es/conta/tema14/nitrog.ht.

Anónimo 3.: Contaminación del suelo. Tema 14. Contaminación por fertilizantes fosfóricos.(Enlínea)2004.URLdisponibleen:edafologia.ugr.es/conta/tema13/fósforo.htm

Arzola, N.: Capacidad de de retención del fósforo en algunos perfiles de suelos cubanos, Revista Centro agrícola, Año 8, No. 1, 1981:47-60pp.

Arzola, N.; Melián, G.: Relaciones entre algunas características de varios suelos de la provincia de las Villas, Revista Centro agrícola, 1975:17-28pp.

Arzola, N.; Marín, R.; Justiz, A.: El análisis químico del suelo como guía para la fertilización nitrogenada y potásica de la caña de azúcar, Boletín INICA, No. 4(1985) 42-45 pp

Arzola, N.; Marín, R.; Justiz, A.: Diagnóstico de la necesidad de nitrógeno y potasio en la caña de azúcar mediante el análisis químico de los suelos, Revista Centro Azúcar, 3/90(1990) 3-11 pp.

Arzola, N.; Rivera, O.: Influencia del cultivo intensivo de la caña de azúcar sobre algunas características de un suelo Fersialítico, Revista Centro Azúcar, 2/90(1990) 67-76 pp.

Arzola, N.: Influencia del cultivo continuado de la caña de azúcar sobre el contenido total de carbono orgánico del suelo. Revista ATAC,Nº2,2005:49-54pp.

Arzola, N.: Foto tomada en La Hacienda Surucua, dedicada al cultivo de la palma africana, provincia Guayas, Ecuador., 2006.

Arzola, N.; Pablo, P.: Nuevo enfoque para el diagnostico de la necesidad de fertilizantes nitrogenados en caña de azúcar. Revista Cuba&Caña Nº 1,2008:17-23pp.

Bañuls, J.; Serna, M. D.; Quiñónez, A.; Martín, B.; Primo-Millo, E.; Llegaz, F.: Optimización de la fertilización nitrogenada con el inhibidor de al nitrificación (DMPP) con riego por goteo en cítricos. Levante Agrícola, 2000. 351: 117-121pp.

Bartolomew, W. V.: Mineralization and immobilization of nitrogen in the decomposition of plant and animal residues. pp. 285-306. In: M.V. Bartolomew and F.E. Clark (eds). Soil nitrogen. Am. Soc. Agron., Madison, W.I., 1965.

Bergmann, W.; Neubert, P.: Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. Gustav Fischer Verlag, Jena, 1976:475pp.

Black, C.A.: Soil-plant relationships. New York, John Wiley and Sons INC, 1968.792 pp.

Carmen Infante, G.: Ciclo del nitrógeno en un cultivo de caña de azúcar. (San Felipe, Edo. Yaracuy) Tesis Doctoral. Caracas 1988.

Chang, S.C.; Jackson, M.L.: Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84 (1957) 113-114 pp.

Corey, R.: Química de suelos. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Post-graduados. Chapingo México, 1968: 165pp.

Delgado, R.: Soil Mineral N and Organic Matter mineralization effect on maize response to N-fertilizer application on a Mollisol and Ultisol Soil in Venezuela.15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Volumen 5a (1994): 351-352 pp.
Dinchev, D.: Agroquímica. Ediciones Revolucionarias. La Habana, 1972:280pp.

Espinosa, J.: Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. Informaciones agronómicas. INPOFOS, No. 23 (1996): 1 – 5pp.

Fassbender, H.W.: Problems connected with soil testing for phosphorus and potassium. In: Soil and Plant testing and analysis. FAO Rome, 1980:93-108 pp.

Ferraris, G. N.; Lucrecia A. Couretot. : Predicción de la respuesta a nitrógeno en maíz utilizando el medidor de clorofila N-Tester proyecto regional agrícola, cerban. Área de Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino. 2009.

Fox, R.H.; Piekiel, W.P.; Macneal, K.E.; Shenk, J.S.; Toth J.D.; Quick Tests for Assessing Nitrogen Fertilizer Needs of Maize in Humid Regions. 15th.World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Volume 5 B (1994): 113-114 pp.

Frissel, M.J.:Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystems. Elsevier, Amsterdam (1978):356 pp.

Fundora, O.; Arzola, N.; Lamadrid, R.: Movimiento del fósforo en suelos cubanos, Revista Centro agrícola, Año 2, No. 2, 1975.

Fundora ,O.:Untersuchungen uber den Kalium Haushalt wichtiger Boden Kubas.Karl-Marx Universitat .Leipzig Diss.,1980

Fundora, O.; Arzola, N.: Comparación de varios métodos de determinación de fósforo asimilable en el suelo ferralítico rojo, Revista Centro agrícola, Año 7, No. 3, 1981.

Fundora, O.; Valdés, M.; Rubio, R.; Cuéllar, I.; Brunet, R.: El potasio en el suelo y la fertilización potásica. Monografía. Impreso en CENIC. U.C.L.V., 1988:124pp.

Fundora, A.; Moya, M.: Informe sobre la situación de los nitratos en las aguas subterráneas del tramo hidrogeológico Manacas – Cascajal. GEARH, 2004, 2pp.

Garavito, F.: Propiedades Químicas de los Suelos. Editorial Andes. Bogotá, Colombia, 1979.321pp.

Gómez, O.; Casanova, A.; Laterro, H.; Anais, G.: Mejora genética del tomate para la producción en el Caribe. IIH "Liliana Dimitrova", 2000, 101-104 pp.

Grimme, H.: Beziehungen zwischen Kalium-Freisetzung und Pflanzenproduktion. Kalibriefe 1/4, 1977: 1-8pp.

Guiner González, G.; Franca, J.; Araniaga, F.: La fertilización potásica en cultivos hortícolas. Agrícola Vergel. XXII (256), 2004:12-15pp.

Inpofos: Porque el potasio ayuda a la movilización de azúcares en la planta.[http://www.inpofos.org/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/707D4E47C3BDFD4A86256CF000022C2B?opendocument&navigator=home+page](http://www.inpofos.org/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/707D4E47C3BDFD4A86256CF000022C2B?opendocument&navigator=home+page)

Laske, P.: Abonamiento de las hortalizas. Actualidades de Ingeniería Agronómica. (1972) 31-32 pp.

Lozano F.; Milanés, N.; Castillo, A.: Pérdidas de nitrógeno total, por la quema de la caña de azúcar en el ingenio San José de Abajo S.A. de C.V. Córdoba, Veracruz, México. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes V-24. Varadero, Cuba. 2001,

Machado, J.: Untersuchungen über den phosphat Haushalt wichtiger Boden Kubas. Karl-Marx Universität .Leipzig Diss., 1980

Mengel K.: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag. Jena, 1972, 384 pp.

Mengel, K.; Kirkby, E.A.: Principles of plant nutrition. Int. Potash Institute. Berna, 1987: 265 pp.

Mehlich, A.: The operation of soil and plant testing service in the USA. Soil and plant testing and analysis. FAO SOILS BULLETIN. Rome, 1980: 37-45pp

Mutert, E.W.: El potasio en la palma aceitera. Informaciones agronómicas No. 30 (1998): 1-6pp.

- Peltonen, J.; A.; Heggen. E.: Using a chlorophyll meter to optimise nitrogen fertilizer application of intensively- managed small grain cereals. *Journal Agronomy and Crop Science* 174 (1995):309-318.
- Porta Casanella, J.; López Acevedo Reguerín, M.; Roquero de Laburo, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundo-Prensa. Madrid, 1999: 849 pp.
- Ramírez, R.; Morales, D; Álvarez, E.: Uso eficiente del fósforo y potasio por el tomate. *Agronomía Trop.* (en línea). Septiembre 2 1991. (Fecha de acceso: 7 de febrero de 2004) URL disponible en: www.redpav-fpolar.info.ve/agrotrop/v41_1-2/v411a030.html. 2004.
- Ramos, C.;Domingo, R.; Oliver, J.: Nitrate Leaching under two Nitrogen Managements. In: "Management systems to reduce impact of nitrates". Elsevier Appl. Science. London, 1998: 99-109 pp.
- Stanford, G.: Nitrogen fertilizer use for corn. Presented at Hearing of the Illinois Pollution Control Board Urbana. Illinois, 1971.
- Sollins, P.: Effects of soil microstructure on phosphorus sorption in soils of the humid tropics. In H. Tielsen, D. Hernández López and L. Salcedo (Eds), *Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems*. Saa Katchewan Institute of Pedology Saskatoon, Canadá, 1991.
- Smith, J.; Stanford, G.: Evaluation of a chemical index of soil nitrogen availability. *Soil Sci.* 114 (4) (1971) 228-232pp.
- Snyder, C. S.: Fertilización foliar con nitrógeno y potasio en algodón. *Informaciones agronómicas*. N° 34 (1999): 6-10 pp.
- Tunney, R.: Phosphorus loss from soil water CAB. International. 1997, 416-420 pp.
- Viets, F.G.: Presented status of soil and plant analysis for fertilizer recommendations and improvement of soil fertility. In: *Soil and plant testing and analysis*. FAO SOILS BULLEIN. Rome, 1980: 9-20pp.
- Villegas, R.; López, M.; Cabrera, A.: Sorption isotherm as a diagnostic criterion for P fertilizer requirement for sugarcane. *Proc. 19th ISSCT Cong. Indonesia*, 1981:140-148pp.
- Yamada, T.:A nutricao mineral e a resistencia das plantas as doencas. *Informaciones Agronômicas*. Potafos 72 (1995): 1-3pp.
- Yamaguchi, J.; Tanaka, A.: Nitrogen response and root system of various field crops. 14th International Congress of Soil Science. Comission IV. Kyoto .Volume IV (1990):.249-245pp.

Young, D.B.: La importancia del potasio en los programas de ejercicio agotador. Informaciones agronómicas No. 34 (1999): 11-12 pp.

Zambello, Jr. E.; Francisco, J.O.; Casagrande, J.O.: Sugar cane nitrogen fertilization correlated with some soil properties. Proceedings XVIII Congress of I.S.S.C.T. Volume I. La Habana (1983) 153-160 pp.

Zambello, Jr. E. ; Francisco, J.O.: Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) aplicado a caña planta com e sem irrigação, in Congresso Nacional de STAB. Maceio, STAB (1980) 353-356 pp.

CAPITULO 5.ELEMENTOS MAYORES SECUNDARIOS

5.1. Generalidades

El calcio, el magnesio y el azufre se denominan elementos mayores secundarios, a diferencia de los principales: nitrógeno, fósforo y potasio, porque sus insuficiencias son menos frecuentes que las de estos últimos, y por lo tanto se usan menos como fertilizantes. Por supuesto, que esto no significa que los secundarios sean menos necesarios para el vegetal, ni tampoco que la planta extraiga necesariamente menores cantidades de ellos a partir del suelo, que de los elementos mayores primarios.

Es cierto que el vegetal toma del suelo generalmente mayores cantidades de nitrógeno y potasio, que de macroelementos secundarios, pero respecto al fósforo no sucede así; si no que, las extracciones de este elemento se sitúan frecuentemente por debajo de las de calcio y muchas veces son similares a las de magnesio y azufre.

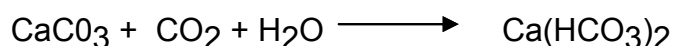
5.2. El Calcio

5.2.1. Calcio en el suelo

El calcio del suelo se origina de minerales tales como la calcita (carbonato de calcio), dolomita (carbonato doble de calcio y magnesio), apatita, feldespatos, anfíboles, yeso, etc. Estos minerales representan la mayor parte del calcio en los suelos calcáreos. La apatita (fosfato tricálcico) es otro mineral cálcico frecuente en los suelos poco meteorizados.

A medida que la intemperización y el lavado del suelo avanzan, con la acidificación de los mismos, esos minerales van transformándose y desapareciendo.

En los trópicos húmedos, incluso los suelos que tienen como material de origen la caliza, por estar muy meteorizados y lavados (como los ferralíticos rojos de Cuba, Oxisoles) han perdido sus minerales cálcicos. En estos la extraordinaria vida microbiana condiciona una elevada descomposición de la materia orgánica y una fuerte producción de CO₂, el cual tiene una eficaz influencia sobre la solubilidad de los carbonatos cálcicos:



Muy poco soluble

(soluble)

El bicarbonato de calcio así formado posee buena movilidad y puede ser lavado fácilmente del suelo.

El calcio generalmente constituye la base intercambiable más abundante en el complejo de cambio del suelo y esto es lo deseable. En los suelos de clima húmedo el calcio, junto con el magnesio, el hidrógeno y el aluminio forma la mayor parte de los cationes cambiables.

Es importante para la fertilidad del suelo que el complejo de cambio se encuentre saturado de calcio (50 a 80% de la capacidad de intercambio catiónico) así se condicionan buenas propiedades químicas y microbiológicas además de que los iones de Ca cambiable y los de la solución del suelo representan una buena fuente de

calcio de fácil acceso para las plantas.

La frecuente predominancia del calcio, dentro de las bases cambiables del suelo, puede explicarse por dos razones:

-Los iones divalentes como el calcio se retienen con mayor fuerza en el complejo de cambio que los monovalentes como potasio y sodio.

-A igualdad de carga se retiene con mas fuerza el ión que posea menor volumen hidrodinámico(es el ión mas el agua que lo acompaña) y es lo que sucede cuando se compara con el magnesio.

La mayor fuerza de retención del calcio en la superficie de los coloides, comprime la doble capa eléctrica (se acerca más a los coloides) y origina que predomine la atracción de las cargas negativas de un coloide sobre las positivas del enjambre catiónico de los coloides vecinos. Esta atracción provoca la agregación de las partículas y buena estabilidad estructural. En la medida que la fuerza de retención de un ión es menor que la del calcio (sodio, potasio, magnesio), aumenta el grosor de la doble capa eléctrica y por ello la distancia entre las cargas negativas de la micela y las positivas del enjambre catiónico de los coloides vecinos, disminuye por esa razón, la atracción entre coloides y estos se dispersan. Esto origina que disminuyan las fuerzas de atracción, en tanto, que aumenten las de repulsión de las cargas positivas, Por ello mientras el calcio aglutina las partículas del suelo y mejora la estructura, el magnesio y sobre todo el sodio, dispersan las mismas y afectan esta importante característica de los suelos(Figura 5.1).

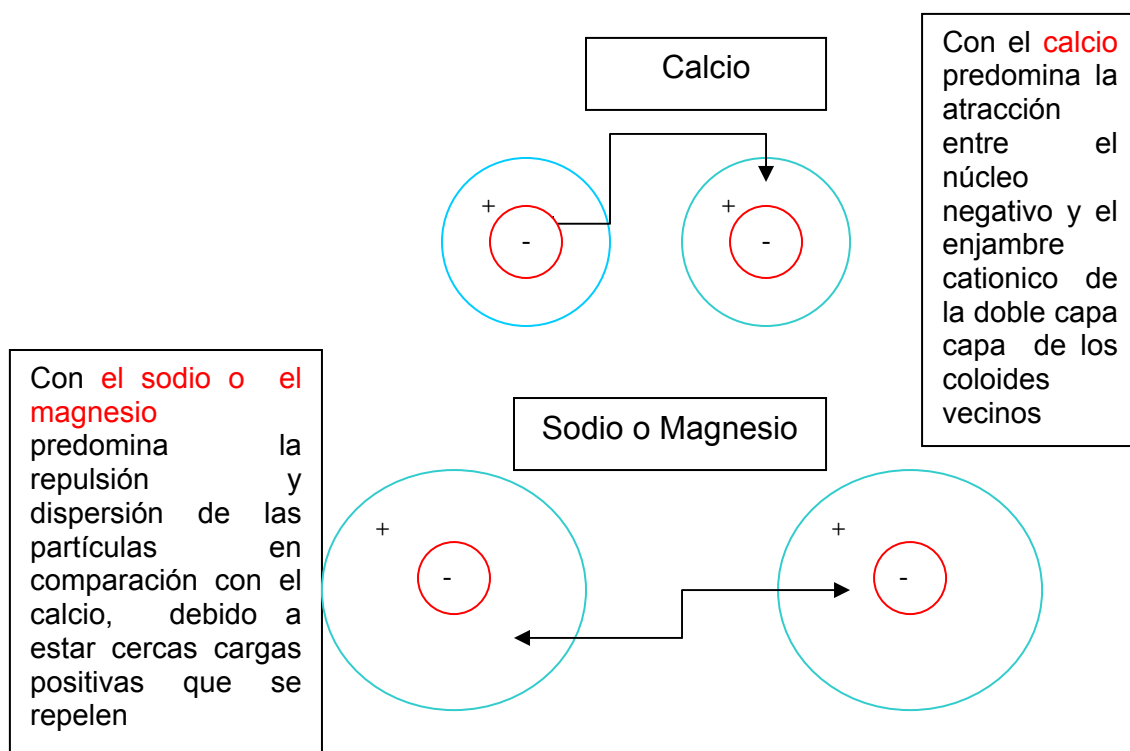


Figura 5.1.Comparación entre el calcio y otros cationes cambiables en la formación de agregados del suelo.

El efecto beneficioso del calcio en los suelos sódicos, resulta de su intercambio en el complejo de cambio con este elemento, lo que facilita el lavado del sodio y su

recuperación (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Correlación entre el contenido de sodio cambiables con otros cationes cambiables de los suelos de Agriflorsa, Ecuador (Arzola y Jessica Villa, 2010).

Valores de sodio	Ca cambiabile	K cambiabile	Mg cambiabile
Na cambiabile $\text{cmol}^{(+)}\text{Kg}^{-1}$	-0,51**	-0,10	-0,18
%Na	-0,68**	-0,05	-0.33*

En los suelos donde predominan las arcillas de tipo 2:1 como la montmorillonita, el calcio debe saturar la capacidad de intercambio catiónico del suelo en un alto grado, dada la fuerte retención cálcica propia de estas arcillas, que lo ceden, por tanto, con dificultad al medio y porque las propiedades físicas indeseables que ellas le aportan al suelo se atenúan con una abundante presencia de calcio; mientras que aquellos suelos en los cuales predominan arcillas de tipo 1:1 y de hidróxidos, que retienen poco el calcio y que confieren buenas propiedades físicas, bastan con una saturación mucho menor de la capacidad de intercambio catiónico ocupada por calcio.

En el suelo primero ocurre insuficiencia de calcio respecto a la acción reguladora del pH o de las propiedades físicas, como es la estabilidad estructural, que en relación con las necesidades del vegetal, por eso la aplicación de calcio al suelo es más frecuente como enmienda del mismo que como abonado.

5.2.2. El calcio en la planta

5.2.2.1. Disponibilidad para las plantas

En los suelos, sin abundancia de carbonato cálcico (no calcáreos) la disponibilidad de calcio para las plantas depende de varios factores. No sólo es importante la cantidad total de calcio intercambiable, sino el grado de saturación del complejo de cambio con calcio.

Si los suelos poseen igual cantidad de calcio intercambiable, este será más asimilable donde represente una mayor saturación de la capacidad de intercambio catiónico (menor valor T).

La presencia de otros cationes del complejo de cambio, influye en la absorción de calcio; así por ejemplo, el potasio es antagónico, pues como se retiene con menor energía de ligazón en el coloide, queda delante de el en la doble capa eléctrica y resulta un obstáculo para su paso a la solución del suelo, por otra parte la célula es eléctricamente neutra y la mayor abundancia de un catión en ella puede significar la disminución en la concentración de otro.

El tipo de coloide influye también en la disponibilidad de calcio. Las arcillas montmorilloníticas necesitan un 70% o más de saturación cálcica para que el elemento sea liberado en cantidades suficientes mientras que la caolinita requiere solamente un 40 - 50%.

La especie y aún la variedad de planta influye en la mayor o menor facilidad con que este elemento puede ser tomado del suelo, las leguminosas, por ejemplo, poseen bajo igualdad de condiciones, mayor contenido de calcio que las poáceas, esto también significa que la necesidad de aplicar este nutriente y la frecuencia de que se

presente su insuficiencia es mayor en las primeras.

Para el diagnóstico de la necesidad de aplicar calcio el análisis de suelo es de gran utilidad, pero debe tenerse presente que el valor crítico de este nutriente puede variar con diferentes factores, parte de los cuales han sido mencionados anteriormente.

5.2.2.2. Funciones en la planta

El calcio sólo tiene movilidad en dirección acrópeta; se desplaza principalmente en dirección de la corriente transpiratoria, son pocos los iones cálcicos que pueden pasar del xilema al floema.

El calcio se traslada rápidamente a través de las raíces y en tallos hasta las hojas, más jóvenes, un movimiento inverso, es decir, desde las hojas hacia otros órganos, no tiene lugar, lo que produce cierta acumulación de calcio en las hojas. Las hojas viejas, que han estado más tiempo bajo los efectos de la corriente cálcica, proveniente de las raíces, muestran, generalmente, un mayor contenido de calcio que las jóvenes.

El calcio existe en la planta como catión libre en el jugo celular, unido por sorción a algunos coloides del plasma, formando quelatos inorgánicos, como fosfato, carbonato y especialmente oxalato de calcio, en las vacuolas y como incrustaciones en la pared celular.

También aparece como compuestos orgánicos: acetato de calcio y la sal cálcico-magnésica del ácido inositolhexafosfórico (fitina).

Al pectato de calcio corresponde un importante papel como elemento estructural de la lámina media de la pared celular. Las funciones del calcio en la planta son tanto de naturaleza específica como no específicas.

El calcio influye en la elongación y diferenciación de la célula; de ahí la importancia del calcio para los tejidos meristemáticos. Además, controla la permeabilidad de la membrana celular de modo que su insuficiencia puede causar la absorción excesiva y por tanto efecto tóxico de elementos tales como el níquel, cromo, aluminio, cobre, zinc, manganeso y boro (Bergmann y Neubert, 1976).

El calcio es necesario en la estabilización de la pared y membrana celular, en el balance catión-anión y la osmoregulación, en el crecimiento de la planta a través de la extensión celular; en procesos de secreción celular y en su función como un segundo mensajero en la conducción de señal entre los factores ambientales y las respuestas en términos de crecimiento y desarrollo. Los ligamientos Ca-membrana protegen a la misma de los estreses ambientales causados por salinidad sódica, toxicidad aluminica, bajas temperaturas y por condiciones de anaerobiosis (Hanson, 1984).

Este elemento influye particularmente en el crecimiento de la raíz ya que favorece la elongación celular y la estabilidad y elasticidad de la pared celular, además de la actividad metabólica.

El calcio por sus propiedades deshidratantes tiene un efecto contrario al del potasio, por lo que ambos regulan la hidratación de la célula.

En forma de fosfatos de calcio este elemento ejerce un efecto amortiguador de los cambios del pH en el metabolismo celular.

El calcio tiene un efecto favorable en la estructura del núcleo celular y la estabilidad de los cromosomas. Una insuficiencia de calcio conduce a un trastorno del metabolismo respiratorio por destrucción y disminución de los mitocondrios, los cuales son especialmente ricos en calcio.

El calcio es esencial para la germinación y crecimiento del tubo polínico así como para el proceso germinativo de la semilla. En comparación con otros cationes, son pocas las enzimas activadas por el calcio, y frecuentemente de modo no específico, ya que el Mg y el Mn lo pueden sustituir (Bergmann y Neubert, 1976).

Para una buena nutrición de la planta son necesarias adecuadas relaciones Ca/K y Ca/Mg, ya que son antagónicos, por ello, mucho magnesio y potasio cambiables en el suelo pueden disminuir la absorción de calcio, mientras el exceso de calcio podría conllevar a insuficiencias de magnesio y potasio. También la concentración de calcio necesaria en la planta se relaciona con la de boro.

5.2.3. Insuficiencias

En condiciones de campo es poco frecuente la insuficiencia de calcio respecto a la fisiología de la planta.

Desde el punto de vista práctico, la mayor importancia del calcio es como mejorador del suelo para mantener a un nivel adecuado la vida microbiana, la estructura del suelo y los procesos de descomposición y formación del humus. Para todo esto son necesarias mayores cantidades de calcio en el suelo que las que la planta necesita para su normal metabolismo, por eso el encalado es en primer lugar una enmienda del suelo. Ahora bien, cuando se asegura con esta enmienda del suelo un adecuado nivel de calcio para mantener los procesos y características antes mencionados, obviamente se garantiza una buena nutrición cálcica de la planta.

En condiciones de invernadero, con una alta humedad relativa atmosférica, se ha detectado la insuficiencia por que la poca transpiración de la planta lleva muy pocos iones cálcicos a los tejidos jóvenes, dado el prácticamente único movimiento acrópeto del nutrimento, ya discutido.

La insuficiencia detiene el crecimiento de los tejidos meristemáticos y si continúa, mueren. Las hojas más jóvenes se tornan cloróticas. En las células jóvenes la pared celular se decolora y ablanda; más tarde se destruyen sus principales integrantes y se forman compuestos pardos, los que se acumulan en los espacios intercelulares y tuyen conductos.

En los suelos muy ácidos y por lo tanto pobres en calcio, primero se hacen visibles otros daños causados por la acidez que los síntomas de las insuficiencias de calcio, o son encubiertos por ellos.

Los frutos de tomate suelen presentar dos enfermedades fisiológicas, que son la pudrición húmeda o “mancha negra”, que causa la aparición de manchas oscuras externas en el fruto y el “corazón negro” lo que provoca un oscurecimiento interno de la pulpa. En ambos casos se trata de una deficiencia de Ca, debido a que en la transpiración (vehículo de transporte de Ca) la hoja gana más Ca^{+2} que el fruto, en consecuencia existe menor activación de la ATPasa (vía Ca colmodulina) de la membrana implicada en la acumulación iónica, menos puentes de calcio para dar rigidez a la pared celular, menos puentes lipídicos en la membrana, poca regulación de la poligacturonasa (inhibida por el Ca^{+2}), lo que acentúa la degeneración de la pared celular y al final la célula entra en senescencia..

Es relativamente común la pudrición del extremo floral de los frutos del tomate, la cual conduce a la destrucción del tejido del fruto, causada por una insuficiencia de calcio, bajo determinadas condiciones, lo que constituye una excepción a la poca frecuente aparición de esta carencia. En los días nublados, húmedos, relativamente fríos, la

transpiración de los frutos, normalmente baja, puede disminuir hasta tal grado que no llega suficiente calcio a los mismos por la corriente transpiratoria. Otras condiciones que limitan la absorción de calcio por la planta, favorecen la pudrición de los frutos, así puede mencionarse la alta relación K^+/Ca^{2+} o NH_4^+/Ca^{2+} en la solución del suelo. El contenido de calcio en las plantas deficitarias es muy bajo, la mayoría de las veces inferior a 0,5% en materia seca.

Con frecuencia se ha asociado la pudrición del extremo floral de los frutos del tomate, tanto verde como maduro a una disminución de la transpiración conjuntamente con un crecimiento intenso de la planta, lo que ocasiona una insuficiencia de calcio fisiológicamente condicionada. En el extremo floral del fruto aparecen sitios de aspecto vidrioso bajo la corteza, los cuales se tornan rápidamente en manchas pardas a pardo-negruzcas, secas, carióticas y hundidas.

La resistencia a este desorden fisiológico depende de la variedad. Una variedad susceptible, tiene una gran necesidad de calcio unida a una pequeña capacidad de absorción y transporte del elemento.

Bajo determinadas condiciones aparecen síntomas similares a los descritos para el tomate por insuficiencia de calcio, en la sandía o melón de agua, en el pimiento y en la berenjena. En la sandía aparte de los síntomas descritos aparecen en el extremo floral, daños en la carne o masa del fruto; aunque es de señalar que en esta especie también se han reportado la pudrición del extremo floral a temperaturas relativamente altas y aún en suelos ricos en calcio.

En el algodón se atribuyen los daños de insuficiencia, en parte, a una limitación en el transporte de carbohidratos. El calcio del fruto puede retornar a las ramas y hojas, probablemente a través del xilema, ya que el fruto transpira poco y la hoja mucho.

En condiciones de sequía existe un movimiento de agua arrastrando calcio desde los frutos a las hojas, como consecuencia aparecen manchas en los frutos.

En otras especies como el tabaco, la papa, la col y, algunas leguminosas, el manzano y el melocotón también se han observado síntomas de insuficiencia de calcio.

5.2.4. Fertilizantes cálcicos

Los materiales usados como enmienda calcárea pueden aplicarse como abonos cálcicos siempre que un aumento del pH no sea indeseable. Si no se desea cambiar el pH a la vez que se suministra calcio puede aplicarse yeso (sulfato cálcico, 23% de calcio), aunque debe hacerse notar que tales situaciones de falta de calcio y necesidad de no aumentar el pH son raras.

Las aspersiones de cloruro o nitrato de calcio pueden utilizarse foliarmente, generalmente varias aplicaciones en el transcurso de la vegetación son necesarias para obtener un resultado exitoso. En el tomate se han utilizado de forma preventiva. El superfosfato, sobre todo el simple (por su alto contenido de yeso) y la roca fosfórica también aportan calcio al suelo.

5.3. El Magnesio

5.3.1. El Mg en el suelo.

El magnesio es la base intercambiable que normalmente sigue al calcio en abundancia. Este elemento se retiene con menos energía de ligazón que el calcio al complejo de cambio del suelo, su buena movilidad hace que pueda ser lavado en

cantidades apreciables, por eso, los suelos de las regiones lluviosas, pobres en arcillas y fuertemente lavados y por lo tanto muy acidificados presentan, por lo general, un bajo contenido de magnesio, mientras que los suelos de las regiones áridas y semiáridas suelen ser muy ricos en magnesio, acumulándose como sulfato de magnesio. Asimismo suelen presentarse suelos magnésicos formados a partir de serpentina cuyo complejo de minerales ferromagnéticos (serpentina) es muy meteorizable, siempre que los mismos no sean muy lavados y por ello no hayan perdido gran parte de su magnesio. También sobre otras rocas ígneas ricas en Mg como la diorita, pueden hallarse suelos de este tipo.

Por otra parte, existen suelos influidos por el agua de mar, rica en magnesio, que constituyen suelos con exceso de este elemento.

El magnesio del suelo proviene de minerales tales como la serpentina, olivina, biotita y hornablenda, llamados ferromagnéticos, los cuales son de fácil meteorización. Además forma parte de la estructura cristalina de varios minerales secundarios, arcillosos: vermiculita, montmorillonita, illita y clorita. En algunos suelos los carbonatos magnésicos, magnesita (Mg CO_3) y dolomita ($\text{CaCO}_3 \text{ Mg CO}_3$), son importantes componentes.

5.3.2. El magnesio en la planta

5.3.2.1. Disponibilidad para las plantas

El magnesio de la solución del suelo más el intercambiable constituyen el magnesio asimilable para el vegetal.

El magnesio de la solución del suelo es el que la planta toma directamente por sus raíces; no obstante, por estar el magnesio intercambiable en equilibrio con el de la solución del suelo, se incluyen dentro del asimilable, del que realmente constituye la mayor parte. El magnesio que forma parte de la red cristalina de los minerales se libera, con relativa lentitud cuando estos se meteorizan; no obstante, cuando esta fracción es abundante en el suelo su contribución a la nutrición vegetal no es despreciable.

Los suelos arenosos muy lavados y por consiguiente muy acidificados suelen ser pobres en magnesio asimilable. Así en Cuba la insuficiencia de este elemento se ha encontrado, fundamentalmente en suelos con estas características, como los Ferralíticos cuarcíticos, además de algunos ferralíticos no cuarcíticos pero muy lavados. Entre las áreas insuficientes de magnesio reportadas en Cuba se encuentran suelos arenosos ácidos de Pinar del Río, de la Isla de la Juventud y de la Llanura de Manacas, además de algunos suelos ferralíticos amarillentos laterizados de ésta última, en cultivos tales como la caña de azúcar, tomate y gramíneas de pasto (Voronin, 1972; Vantour et al., 1985; Fundora y Carballe, 1989).

El Mg intercambiable en los suelos no magnésicos constituye la mayoría de las veces de 0.5 a 20% de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Si los suelos presentan 5% o más de la CIC saturada por Mg pueden evaluarse de bien provistos, siendo esto válido para un amplio rango de capacidades de intercambio catiónico. No obstante, algunos autores recomiendan aplicar abonado magnésico cuando la saturación de la CIC por este elemento sea inferior a 10%.

Además de la cantidad absoluta de magnesio intercambiable y del porcentaje de saturación, existen otros factores que influyen en la asimilabilidad del Mg, como

sucede debido al antagonismo con K y Ca, al igual que con el NH_4^+ , a diferencia del NO_3^- que le es sinérgico.

Según Bingham et al (citados por Fundora et al., 1979) si la relación K/Mg intercambiables es más de 0.4 – 0.5 puede presentarse la insuficiencia magnésica en cítricos, si estuviera por encima de 0.5 con seguridad hay que aplicar fertilizante magnésico y si es por debajo de 0.3 no hay insuficiencia. En los suelos muy ácidos, el Al^{3+} intercambiable parece disminuir la absorción del Mg por la planta.

El maracuyá (*Passiflora edulis* f. *Flavicarpa*) se ha cultivado comercialmente en Nueva Zelanda, África del Sur, Australia y Costa Rica, apreciándose sus frutos tanto para consumo fresco, como para concentrado de jugo. En Costa Rica en un suelo Typic Hapludult, arcilloso, insuficiente en magnesio, la aplicación de este nutriente incremento los rendimientos, obteniéndose los mejores resultados con la dosis de 100 kg de MgO/ha.

Los problemas respecto a la disponibilidad de magnesio no solo ocurren por insuficiencia, sino que también pueden ser originados por exceso. Cuando el Mg intercambiable represente 30% o más de la suma de las bases debe considerarse el suelo como magnésico, lo cual es indeseable.

La influencia del magnesio, comparada con la del calcio, sobre las propiedades físicas de suelo es poco conveniente por causar los siguientes efectos, entre otros: afectación de la estabilidad estructural, disminución de la permeabilidad y descenso del agua por los capilares, menos aireación, incremento de la cantidad de agua no disponible para las plantas, menor friabilidad y empeoramiento de la calidad de la labranza. Sin embargo esta influencia nociva es mucho menor que la causada por el sodio.

En áreas bajas, sobre todo costeras, existen suelos pesados, en las cuales las malas propiedades físicas (mala estructura, aireación y drenaje, excesiva plasticidad en época de lluvia y excesiva retención del agua por el suelo en sequía) debidas a la abundancia de montmorillonita se acentúan por la elevada presencia de Mg (30% o más de la suma de las bases con frecuencia). Esto ocurre en Cuba en Vertisoles, suelos de áreas bajas o depresiones, sobre todo en los costeros, donde parte del Mg parece provenir del agua de mar y del lavado proveniente de áreas más altas.

Aunque el Ministerio de la Agricultura de Cuba (Mesa y Naranjo, 1984) considera como correcta una relación Ca/Mg entre 2:1 y 6:1, la relación 2:1 para los suelos montmorilloníticos es todavía baja, pues se necesita más Ca respecto al Mg, por las indeseables características físicas de estos suelos.

En los suelos jóvenes derivados de dolomita y de algunas rocas ígneas como basalto, peridotita y serpentinita, al igual que en muchos suelos de cenizas volcánicas los niveles de Mg intercambiables son particularmente altos (Fassbender y Bornemisza, 1987).

En Cuba es notorio el caso de los suelos Fersialíticos Rojos parduscos ferromagnesiales sobre serpentinita donde el Mg puede representar hasta 90% de la suma de las bases intercambiables, a diferencia de los Ferralíticos púrpuras, que, aunque también provenientes del mismo material de origen, han perdido la mayor parte del Mg por el intenso lavado y meteorización que los ha llevado a la condición de suelos viejos o degradados. En los citados suelos Fersilíticos Rojo - parduscos ferromagnesiales se ha supuesto la toxicidad de Mg y la deficiencia de calcio en especies no adaptadas a estas condiciones.

La relación Ca/Mg toma importancia para el rendimiento de los cultivos. Normalmente el Ca intercambiable predomina sobre el Mg (lo cual es deseable); una de las causas principales es que el primero se retiene con mayor fortaleza por los coloides del suelo, por lo que se lava menos, de ahí la necesaria relación Ca/Mg intercambiable considerada como adecuada para la nutrición de los cultivos de 2:1 a 6:1 (Mesa y Naranjo, 1984)

Además de los trastornos derivados de esa mala relación en estos suelos magnésicos sobre serpentinita, puede haber otros problemas. Así por ejemplo, en Guatemala en un suelo sobre serpentinita se demostró la toxicidad por níquel en maíz y se ha supuesto la de cromo en suelos provenientes de tal material.

En Colombia se reporta que la acumulación de Mg causa dispersión y expansión de arcillas con la consiguiente oclusión de poros lo cual conduce al rápido deterioro de las condiciones físicas afectando negativamente la estabilidad estructural, disminuyendo la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración. Se considera que posiblemente puede existir un efecto indirecto al modificarse las propiedades físicas del suelo por la saturación de Mg, en las poblaciones biológicas presentes no en su número o actividad, sino en el tipo de organismos capaces de desarrollarse en los ambientes propiciados por los procesos físico-químicos dados en estos suelos (Correa et al., 2001).

5.3.2.2. Funciones en la planta

El Mg es esencial para la fotosíntesis, ya que es el átomo central de la molécula de clorofila, es fundamental para la fotorreducción y la descomposición fotoquímica del agua. El Mg de la clorofila representa del 15-20% del total en la planta; el resto aparece como ión libre, sorbido a coloides o como quelatos. Una pequeña fracción se encuentra conjuntamente con el calcio en la pectina, en la fitina y en parte como oxalato (Bergmann y Neubert, 1976).

Por sus propiedades hidratantes influye en la turgencia de los coloides del citoplasma y con ello en la eficacia de las enzimas y la economía hídrica de la planta. Este macroelemento es específico en la activación de numerosos sistemas enzimáticos como las fosfoquinasas, enolasas y deshidrogenasas. El Mg ejerce un papel fundamental como cofactor en la mayoría de las enzimas que activan los procesos de fosforilación. Este elemento forma un puente entre la estructura del pirofosfato del ATP y la molécula de la enzima (Mengel y Kirkby, 1987).

El favorable efecto de Mg^{2+} sobre la asimilación del CO_2 y procesos relacionados con éste, como son la producción de azúcares y almidón son probablemente, consecuencia de la activación de la ribulosa-bisfosfato- carboxilasa por el Mg, lo que favorece óptimas condiciones para la reacción de la carboxilasa.

El Mg favorece, en general, la síntesis de proteína. Algunos autores han encontrado que la síntesis de RNA y DNA se efectúa en presencia de Mg.

Este elemento favorece la absorción y transporte del fósforo y por lo tanto su contenido en la planta. El Mg influye favorablemente el contenido de proteína, azúcares, almidón y grasas en frutos y semillas.

Para las plantas en general de un 6-25% del total de magnesio se encuentra combinado a clorofila, de un 5-10% del Mg^{+2} foliar se encuentra firmemente combinado a pectato (como fosfato) y el resto 60-90% es soluble y extraíble con agua. A nivel celular el Mg^{+2} vacuolar al igual que para el fósforo, es la fuente principal

para la regulación metabólica y es importante para el balance catión-anión y la regulación del turgor celular (Marschner, 1995)

Las leguminosas presentan doble contenido de Mg que las poáceas, mientras que las oleaginosas lo contienen en concentraciones aún mayores (Bergmann y Neubert, 1976).

5.3.3. Insuficiencia

Los frutales en general, el cafeto, el tabaco y la papa se cuentan entre los cultivos más proclives a la insuficiencia de Mg.

Los iones Mg^{2+} se mueven con facilidad en la planta, sobre todo en dirección acrópeta por eso si hay una insuficiencia de Mg en la planta, estos iones se mueven desde las hojas viejas, donde primero se manifiestan los síntomas visuales, hasta los órganos jóvenes en crecimiento.

Si falta Mg ocurre una paulatina inhibición de las reacciones enzimáticas energéticas, las cuales mantienen un normal metabolismo lo que conduce a la destrucción de clorofila en las hojas más viejas. La movilización del magnesio es más lenta que la del nitrógeno; por eso, los síntomas visuales de la insuficiencia magnésica de ambos difieren.

Los iones Mg^{2+} en proceso de abandonar la hoja con relativa lentitud en su movimiento hacia las nervaduras vuelven, parcialmente, a ser involucrados en el metabolismo foliar por lo que permanece un ribete verde paralelo a los nervios o venas también verdes, principalmente respecto a los centrales o principales, sobre un fondo clorótico, correspondiente al resto de la hoja. En muchas dicotiledóneas esos ribetes verdes semejan los dedos extendidos y separados de una mano. Si el crecimiento de la planta es muy veloz, estos síntomas pueden aparecer en hojas jóvenes, ya que no se moviliza de las viejas con la velocidad requerida en este caso.

Si la insuficiencia produce una total destrucción de la clorofila en la hoja, entonces hay muerte de tejidos, apareciendo necrosis pardo-oscuras entre zonas cloróticas. Antes se observa también en algunas plantas coloraciones anaranjadas o tonalidades rojizas a purpúras (Bergmann y Neubert, 1976).

En las gramíneas y poáceas aparecen entre los nervios de las hojas más viejas primeramente moteaduras claras en forma de "sarta de perlas" sobre un fondo verde. A continuación aparece una clorosis entre los nervios en forma de rayas, hasta que se generaliza la clorosis en la hoja.

Si continua la insuficiencia, finalmente pueden aparecer coloraciones bronceado-rojizas a púrpuras en el ápice foliar, así como necrosis.

5.3.4. Magnesio y cáncer

Excesivas aplicaciones de potasio pueden conducir a insuficiencia de magnesio en el pasto y provocar la tetania de la hierba en el ganado. Este elemento es imprescindible, para que exista una adecuada actividad del sistema properdina en la sangre, compuesto que brida protección y defensa a las células contra el cáncer (Voisin, 1961).

Arzola y Corona (1992) reportan que con el incremento del contenido de magnesio y de la relación de este elemento con el calcio en el agua potable disminuyo la presencia de cáncer de mama.

En mayo de 1971, en el primer simposio internacional celebrado en Vittel sobre la deficiencia magnésica en patología humana, se concluyó que existía una relación entre la carencia de magnesio y las enfermedades cardiovasculares, depresiones nerviosas, fatigas y cáncer.

5.3.5. Fertilizantes magnésicos

Como abonos aplicados al suelo se utilizan frecuentemente la dolomita ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$) con 12% de Mg, el sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 9.6% de Mg) y las sales de potasio y magnesio.

El sulfato es de acción más rápida, pero más caro, en pequeñas dosis, mezclado con fuentes de NPK; es inseguro cual de las mencionadas fuentes magnésicas sea mejor. Ya que el sulfato magnésico tiene menor concentración, diluye el fertilizante compuesto, y la dolomita, por ser alcalina, puede disminuir la solubilidad de los fosfatos.

Por su reacción la dolomita es más eficaz en suelos ácidos que en neutros y alcalinos. En estos es preferible aplicar

Sulfato magnésico. Las aplicaciones foliares de compuestos magnésicos son de acción más rápida que en el suelo pero de corta duración, por lo que han de repetirse. Con este fin se ha utilizado el sulfato de magnesio con frecuencia, aunque el $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ y el Mg Cl_2 , por su gran delicuescencia, resultan mejores; ya que esta propiedad, que consiste en absorber humedad de la atmósfera hasta formar con ella una disolución acuosa, asegura que puedan usarse soluciones de mayor concentración sin causar daños al follaje.

También se utiliza como abono magnésico el óxido de magnesio (MgO) denominado magnesita calcinada, por su obtención producto de calcinar la magnesita (MgCO_3).

La dolomita y la caliza dolomítica calcinadas portan el Mg como óxido y sirven como abonos magnésicos. Cuando se utilizan las calizas dolomíticas como enmienda calcárea del suelo, también se está aplicando magnesio al mismo.

5.4. El azufre

5.4.1. El azufre en el suelo

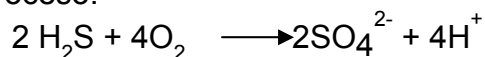
El azufre del suelo se asemeja al nitrógeno en más de una característica, entre otras, la mayor parte del mismo se encuentra en forma orgánica necesitando, para hacerse asimilable a las plantas, que los compuestos orgánicos de los cuales forma parte sean mineralizados por los microorganismos del suelo.

Más de un 70% del azufre total del suelo se halla en la materia orgánica del mismo, ya sea formando parte de compuestos en los que se enlaza directamente al carbono como son aminoácidos que contienen azufre (cistina, cisteína y metionina), ya sea en compuestos en los cuales no se halla enlazado al carbono, como los sulfatos fenólicos, caolín- sulfatos y lípidos.

Debido a la importancia de la materia orgánica como reserva de azufre de los suelos, no es sorprendente que al determinar el contenido de azufre asimilable se encontrara en un 45 % de las muestras de suelo tomadas en áreas de abasto de caña del ingenio Ecudos, S.A., valores inferiores a 7 ppm, valor crítico que ha sido reportado (Cuellar et

al.,2002).Esto se explica por la quema de la caña que se realiza todos los años antes de la cosecha, lo que junto con la no aplicación de fertilizantes que contengan este nutriente ha ocasionado muy bajos contenidos de materia orgánica (Arzola y Vilma Contreras,2010).

Cuando los compuestos orgánicos que contienen azufre se mineralizan se forma H_2S (sulfuro de hidrógeno), el cual en condiciones aerobias se oxida rápidamente pasando a sulfato (SO_4^{2-}), como se expone en la siguiente reacción que resume todo el proceso:



En condiciones de encharcamiento se dificulta esa reacción, por lo que se acumulan los sulfuros y en algunos casos se deposita azufre elemental. Si en estas condiciones se aplican sulfatos se reducen a sulfuros.

El ión sulfuro (S^{2-}), es tóxico para las plantas, si no existe suficiente hierro y manganeso en la solución del suelo para precipitarlo. Si se acumula H_2S en el suelo, parte pasa a la atmósfera donde se oxida a SO_2

Aunque el H_2S es el producto más importante de la degradación anaeróbica del azufre, también se forman mercaptanos (tioalcoholes) como productos de la descomposición de compuestos orgánicos de azufre, los cuales también son tóxicos para las plantas. Estos compuestos también se volatilizan, al igual que el sulfhídrico.

El H_2S es tóxico porque perjudica procesos metabólicos en la planta, además de que disminuye la absorción de nutrimentos, ya que inhibe la respiración de las raíces y su capacidad oxidante.

5.4.2 .El azufre en la planta

5.4.2.1. Disponibilidad para las plantas

El anión SO_4^{2-} , asimilable para las plantas, se retiene por los coloides del suelo con mucha menor energía de ligazón que los aniones fosfato, pero con mayor fortaleza que los NO_3^- .

La fortaleza de retención del SO_4^{2-} por el suelo depende de los tipos de coloides del mismo; mientras existan menos cargas positivas que retengan ese anión, mas disminuye la capacidad de retención, obviamente, por eso los minerales arcillosos lo absorben según la siguiente fila, con cargas positivas en orden decreciente.

Óxidos de Fe y Al > caolinita > illita > montmorillonita

Los suelos insuficientes en azufre tienen una o más de las siguientes características: Son de bajo contenido en materia orgánica, con frecuencia arenosos o tienen un elevado contenido de alófanos o de óxidos de hierro y aluminio.

La abundancia de aluminio en la alófana protege la parte orgánica del complejo húmico-mineral contra la biodegradación, ya que ese elemento es tóxico a los microorganismos (Driessen y Dudal, 1991). La alta resistencia a la mineralización de los compuestos orgánicos conteniendo azufre en los suelos abundantes en alófanos (Andosols o Andepts) explica la relativa frecuencia de su insuficiencia en azufre.

En Gran Bretaña, isla alargada y estrecha, no se han reportado insuficiencias de azufre, por estar sus áreas agrícolas cercanas al mar, de modo que las lluvias y el

viento cargado de pequeñas gotas de agua de mar, rico en azufre, aportarían cantidades apreciables del mismo; otro tanto ocurriría en Cuba, por lo que no se han encontrado insuficiencias de este elemento. No obstante, la isla posee extensas áreas de suelos tales como Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles, donde la insuficiencia de azufre es frecuente en otras áreas del trópico, por la abundancia de óxidos de Fe y Al de las mismas.

En áreas cercanas a zonas industriales, el SO_2 proveniente de las fábricas que utilizan combustible que contienen azufre se absorbe por el suelo, enriqueciéndolo.

Aunque la principal fuente de azufre para el vegetal son los iones SO_4^{2-} de la solución del suelo, también la planta puede absorber SO_2 por las estomas foliares, el cual pasa a la forma sulfática, lo cual puede representar un buen aporte a la nutrición del vegetal. Sin embargo, demasiado alta concentración de SO_2 en el aire puede causar daños a la planta.

5.4.2.2. Funciones en la planta

Cuando el vegetal toma los iones SO_4^{2-} estos deben reducirse a sulfuro, la forma fisiológicamente eficaz antes de incorporarse a la materia orgánica.

Alrededor de 40% del azufre sulfático absorbido por la planta se reduce. El azufre es constituyente fundamental de importantes compuestos orgánicos, alrededor de 90% del azufre reducido se encuentra formando parte de la proteína (Bergmann y Neubert, 1976).

El azufre es componente esencial de muchos compuestos orgánicos con funciones plásticas y metabólicas. El azufre reducido se presenta en la planta como grupo SH^- como derivado de ese grupo ($\text{R}_1-\text{S}-\text{R}_1$) como grupo bisulfuro ($\text{R}_1-\text{S}-\text{S}-\text{R}_2$) como rodanuro ($\text{R}-\text{N}=\text{C}=\text{S}$) o como azufre heterocíclicamente enlazado a la materia orgánica. Entre las principales funciones del azufre en la planta, deben citarse las siguientes:

- Interviene en la síntesis de los aminoácidos esenciales cistina, cisteína y metionina, formando parte de ellos. Los citados aminoácidos son parte imprescindible de la proteína. La actividad de numerosos, compuestos bioquímicos está determinada por su contenido de cistina y cisteína, mientras que 50% del azufre total de la proteína se encuentra en la metionina.

- Constituyente de vitaminas B_1 y H.

La B_1 (Tiamina o Aneurina) participa en la formación de la carboxilasa, mientras que la H (biotina) sirve de catalizador del crecimiento plasmático.

- Forma parte de enzimas como la nitratorreductasa, la cual interviene en la reducción de los nitratos, y proteolíticas como la papaína y bromelina. El azufre es importante para la formación de los cloroplastos y la clorofila. Los cloroplastos son muy ricos en proteína; alrededor de 70% del azufre proteínico total se encuentra en los plastidios. Si el azufre es insuficiente en la planta hay destrucción de cloroplastos. De ahí que el contenido de clorofila disminuya si falta azufre en la planta.

- Presente en aceites esenciales en especies de los géneros, *Allium* y *Brassica*, como la cebolla, el ajo y la mostaza.

- El puente de bisulfuro ($\text{R}-\text{S}-\text{S}-\text{R}$) es fundamental para la estabilización de los polipéptidos y contribuye a la formación de proteínas enzimáticas.

- Aumenta el contenido de aceite en especies como la soya y el maíz.

5.4.3. Insuficiencia y exceso de azufre

La fertilización habitual con sulfato de amonio y superfosfato simple satisface las necesidades de azufre de la mayoría de los cultivos; pero el aumento del uso de abonos, así como la disminución de la aplicación de azufre con plaguicida, hace que aumenten las posibilidades de insuficiencia de azufre.

La insuficiencia de este elemento se manifiesta como una clorosis foliar de amarilla-verdosa a completamente amarilla, semejante a la producida por insuficiencia de nitrógeno, a causa de sus funciones fisiológicas en el metabolismo celular y proteico. No obstante existen diferencias entre ambos síntomas. Mientras que los síntomas de la insuficiencia de azufre se muestran, generalmente primero en las hojas jóvenes, las de insuficiencia de nitrógeno por el contrario, ocurren primero en las hojas viejas.

Aunque el azufre almacenado en forma de SO_4^{2-} se moviliza rápidamente de las hojas viejas a las jóvenes, en caso de insuficiencia esto no basta para satisfacer las necesidades de azufre de las hojas nuevas, por lo que estas permanecen pequeñas y se tornan cloróticas, a causa de la falta de proteína y clorofila.

Se supone que la clorosis por falta de azufre se relaciona con una perturbación del metabolismo de la proteína de los cloroplastos y de la síntesis de proteína, con lo que el crecimiento de la planta se inhibe, por lo que las plantas con insuficiencia son más pequeñas que las normalmente desarrolladas la insuficiencia es muy aguda pueden aparecer además de la clorosis, tonalidades rojizas o púrpuras e incluso moradas en las hojas.

Una insuficiencia de azufre puede causar la acumulación de nitrógeno no proteico, si esta situación no se corrige con alimentos que contengan azufre, puede ser perjudicial a los rumiantes. El exceso de azufre como sulfato es raro; mientras que el H_2S como ya se explicó, es tóxico y sobre cultivos como el arroz se han informado daños, ya que las condiciones de aniego favorecen la reducción de los sulfatos aplicados y el ión S^{2-} así producido, si no encuentra suficiente Mn y Fe en el suelo para precipitarlo, es tomado por la planta, resultando tóxico.

5.4.4. Fertilizantes de azufre

La fertilización con azufre, al igual que ocurre con cualquier otro elemento esencial, debe estar dirigida a los suelos insuficientes en este nutriente, pero el diagnóstico de la necesidad del mismo posee complicaciones similares a las expuestas en el caso de nitrógeno, debido a que principalmente existe en combinaciones orgánicas en el suelo y debe mineralizarse mediante la acción de los microorganismos para pasar a forma asimilable.

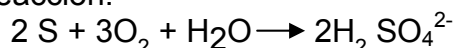
El mayor consumo de S se atribuye a la soja, seguido por el maíz y el trigo cuya absorción es varias veces menor (Rodríguez, 2008). La fertilización azufrada comenzó a difundirse hace pocos años. En el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe se verificaron deficiencias y respuestas al agregado de S en soja, trigo y maíz, en lotes con prolongada historia agrícola, bajos contenidos de MO y manejo bajo siembra directa (Echeverría, 2005; Gutiérrez Boem, 2006). Las respuestas medias a la fertilización en la Región Pampeana argentina para dosis de $5\text{-}20 \text{ kg ha}^{-1}$ de S como

SO_4^{2-} son de 200-500 kg ha⁻¹ en trigo y soja, y de 400-700 kg ha⁻¹ en maíz (FAO, 2004).

La fracción orgánica del azufre del suelo, donde se presenta el azufre más disponible para los cultivos, puede extraerse con H_2O_2 al 30% en dosis de 0.5 mL/cm³ (Ribeiro et al., 2001), no obstante, el diagnóstico de la necesidad de aplicar azufre a los cultivos parece atravesar similares dificultades que el nitrógeno.

En EE.UU., Rusia y otros países europeos se han obtenido aumentos del rendimiento de hasta 100% en suelos insuficientes en azufre, con aplicaciones de 40-60 Kg. de S.ha⁻¹ (Bergmann y Neubert, 1976); aunque según Sánchez (1981) bastan de 10 a 40 Kg de S.ha⁻¹. Como fuente puede servir el yeso (19% de S), el más común y barato de los abonos azufrosos.

También se utiliza el azufre elemental, ya sea directamente, o revistiendo gránulos de fertilizantes, como en la urea- azufre, sobre todo para suelos neutros y alcalinos, ya que su reacción en el suelo es ácida. El azufre elemental requiere de condiciones que permitan su oxidación, de modo que las tiobacilos puedan llevar a cabo la siguiente reacción:



Si el azufre no es suficientemente fino, reacciona muy lentamente en el suelo; si pasa por tamiz de más de 40 mallas se aseguran condiciones adecuadas.

El efecto beneficioso de la aplicación de los fertilizantes minerales completos en suelos insuficientes de azufre, puede incrementar cuando se complementan estos con la aplicación de azufre. En el arroz, la necesidad de azufre empieza a ser importante, después de los 51 días, pues hasta esa edad la planta absorbe menos de 8 Kg. /ha, a partir de ese momento se incrementa constantemente hasta alcanzar la cifra de 26.3 Kg. /ha a los 94 días (inicios de floración). Por ello si se requiere de azufre, las aplicaciones deben realizarse a partir de los 51 días (Vargas, 2006).

Bibliografía Consultada

Arzola, N.; Corona, D.: Influencia de elementos naturales sobre el cáncer en el hombre. Fórum de Ciencia y Técnica. Cienfuegos, 1992.

Arzola, N.; Vilma Contreras: Elementos secundarios y microelementos en áreas agrícolas de Ecudos, S.A. Evaluación del estado nutricional de las plantaciones cañeras en el ingenio Ecudos S.A. La Troncal. Memorias de trabajos del curso de postgrado "Manejo Agroecológico de Suelos, Fertilizantes y Enmiendas". Ecuador, 2010 (CD con ponencias).

Arzola, N.; Jessica Villa Ramón: Medidas de mejoramiento de suelos halomorficos y mal drenaje del sector Agriflorsa. Memorias de trabajos del curso de postgrado "Manejo Agroecológico de Suelos, Fertilizantes y Enmiendas". Ecuador, 2010 (CD con ponencias).

Bergmann, W.; Neubert, P.: Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. Gustav Fischer Verlag, Jena, 1976: 475pp.

Correa, D. L.; García, A.; Moreno, A.; Gallo, P.: Residualidad de plaguicidas en suelos con alta saturación de magnesio en el valle del río Cauca (Colombia). XV Congreso

Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Cuellar, I.; Villegas, R.; de León, M.; Pérez, H.: Manual de fertilización de la caña de azúcar en Cuba. Editorial Publiinica. La Habana, 2002

Driseen, P.M.; Dudal, R.: The Mayor Soils of the World Agricultural University, Wageningen, 1991

Echeverría, H.E.: Azufre. En: Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos. Ediciones INTA. 2005: 525 pp.

FAO: Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome, 2004:45 pp.

Fassbender, H.W. ; Bornemisza, E.: Química de Suelos. Editorial IICA. San José de Costa Rica, 1987:309 pp.

Fundora, O.; Arzola, N.; Machado, J.: Agroquímica. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1979. 267pp.

Fundora, O.; Carballe, J.C.: Abonado magnésico del tomate en suelos ferralíticos cuarcíticos amarillos rojizos lixiviados. Universidad Central de las Villas, 1990.

Gutiérrez Boem, F. H.: Azufre. En: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeados. R. Álvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, 2006: 206 pp.

Hanson, J. B.: The function of calcium in plant nutrition. Advances in Plant Nutrition. 1(1984):149-208pp.

Klimes- Szmik, A.: Suelos de Cuba. Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes. Edit. Orbe, La Habana, 1975:367pp.

Marschner, H.: Ion uptake mechanisms of individual cells and roots. Short-Distance Transpot. In Mineral Nutrition of Higher Plants. 1995: 6-77pp.

Mengel, K. ; Kirkby, E.A.: Principles of plant nutrition. Int. Potash Institute, Berna, 1987. 265 pp.

Mesa, A.; Naranjo, M.: Manual de interpretación de los suelos. Editorial científico técnico. La Habana, 1984:105pp.

Ribeiro. E. ; Dias, L.; Alvarez, V.H., Mello, J.M.: Oxidação parcial de enxofre orgânico em solos brasileiros submetidos a cultivos sucessivos. XV Congresso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Rodríguez, M.B.: Fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. En: La fertilización de cultivos y pasturas. R. Melgar y M Díaz Zorita. 2ª ed. Buenos Aires: Hemisferio Sur, 2008. 588 p. ISBN 978-950-504-597-6.

Sánchez, P.A.: Suelos del trópico. Editorial IICA, San José, Costa Rica, 1981. 671 pp.

Vantour, A.; Voronin, A.; Hernández, A.;Pérez, I.: Influencia de la relación Ca/Mg sobre el rendimiento de Rhodes (*Chloris gayana* Kunts) en un suelo pseudopodzólico.3ra. Jornada Científica del Instituto de Suelos. Memoria. 2da. parte, 1985: 438-442pp.

Vargas, M.: Fertilización con cuatro niveles de nitrógeno, fósforo y potasio y curvas de absorción de la variedad Fedearroz 50, en condiciones de secano favorecido. Segunda Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006(CD con ponencias).

Voisin, A.: Suelo, Hierba y Cáncer. Editorial Tecno, S.A. Madrid.1961:421pp.

Voronin, A.: El magnesio en la planta y en el suelo (monografía) Depto. de Nutrición Vegetal, Universidad Central de las Villas, 1972

“Debe considerarse que los elementos menores solo se refieren a las concentraciones en las que son efectivos y no a su efecto”.

Karl H. Schute

CAPITULO 6. MICROELEMENTOS Y METALES PESADOS

6.1. Generalidades

Los microelementos son esenciales para las plantas, la mayoría de ellos son metales pesados, pero existen metales pesados que no poseen ninguna función biológica conocida, no son esenciales para las plantas y pueden originar toxicidad cuando se presentan en exceso. La razón para estudiar ese último grupo es con el propósito de evitar el peligro potencial que representan para las plantas y para el hombre cuando entran en la cadena alimentaria.

Según el contenido en la materia orgánica de las plantas, los nutrimentos se clasifican en macronutrientes y microelementos. Para estos últimos se han utilizado otros términos: micronutrientes, oligoelementos, elementos menores y elementos traza. Su contenido en suelos y plantas se expresa comúnmente en mg/Kg (p p m) y generalmente el contenido de estos nutrimentos en la planta se encuentran según la siguiente fila: Fe > Mn > Zn > B > Cu > Mo. Al cloro también se le incluye entre los microelementos pero a diferencia de los restantes los problemas relacionados con este elemento son por exceso y no por insuficiencia. En el Cuadro 6.1 aparecen especies vegetales con elevada susceptibilidad a la insuficiencia de microelementos.

Cuadro 6.1. Plantas con alta susceptibilidad a la insuficiencia de microelementos

Fe: Vid, cítricos, café, soja, maíz, piña, plantas ornamentales.
Mn: Frijoles, cebolla, lechuga, rábano, rosa, trigo, millo, vid, cítricos y otros Frutales, plantas ornamentales, maíz.
Zn: Maíz, sorgo, frijoles, vid, cítricos y otros frutales, papa.
Cu: Girasol, alfalfa, cebolla, zanahoria, trigo, avena, centeno.
B: Girasol, alfalfa, coliflor, col, rosa, clavel.
Mo: Lechuga, coliflor, espinaca, alfalfa, trébol rojo, tomate, remolacha, cítricos.

En los últimos tiempos ha aumentado la necesidad de aplicar micronutrientes como fertilizantes a los cultivos. Esto se debe a varias razones, entre ellas, el cultivo de variedades de alto rendimiento, las que muestran una elevada necesidad de nutrimentos, la intensiva explotación del suelo condiciona una alta demanda de microelementos; el uso de fertilizantes de alta concentración, los cuales son pobres en micro nutrimentos; las altas aplicaciones de macronutrientes desplazan el equilibrio iónico de los nutrimentos de la solución del suelo a favor de los microelementos; es decir los macronutrientes aplicados desplazan micronutrientes de la solución interior los cuales salen al exterior, lo que ocasiona un rápido consumo y lavado de los mismos, con la consiguiente disminución de su disponibilidad para las plantas. La importancia de los micronutrientes en numerosas reacciones enzimáticas a pesar de su baja concentración en la planta, si se les compara con los macronutrientes, da

muestras de su alta eficacia fisiológica. Si esta concentración aumenta, fácilmente se puede ocasionar toxicidad, aún dentro del rango de los mg/Kg(p. p. m.); es decir que con relativa facilidad se pasa de una insuficiencia a un exceso.

La importancia de los micronutrientes en numerosas reacciones enzimáticas a pesar de su baja concentración en la planta, si se les compara con los macronutrientes, da muestras de su alta eficacia fisiológica. Si esta concentración aumenta, fácilmente se puede ocasionar toxicidad, aún dentro del rango de exceso. Las insuficiencias se corrigen con relativa simplicidad, aplicando abonos que les contengan, como la medida más común; mientras que los excesos son muy difíciles de eliminar.

6.2. Factores que influyen en la asimilabilidad de los microelementos

Kraus Kiof (1983) expone una relación de los minerales comunes que contienen los elementos micronutrientes (Cuadro 6.2). Esta lista incluye los minerales que son las principales fuentes de micronutrientes en suelos y aquellos que localmente pueden presentarse en concentraciones limitantes en la solución del suelo.

Cuadro 6.2. Minerales comunes que contienen los elementos micronutrientes (Kraus Kopf, 1983).

BORO

Boratos hidratados: bórax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, Kernita $\text{Na}_2 \text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, colemanita $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, ulexita $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$.
Boratos anhidros: Ludwigita Mg Fe BO_3 , Kotoita $\text{Mg}_3 (\text{BO}_3)_2$.
Brorosilicatos complejos: turmalita, axinita.

COBRE

Sulfuros simples: Calcocita Cu_2S , covalita CuS
Sulfuros complejos: calcopirita Cu Fe S_2 , bornita $\text{Cu}_5 \text{Fe S}_4$, enargita $\text{Cu}_3 \text{As S}_4$, tetraedrita $(\text{Cu, Fe})_{12} \text{Sb}_4 \text{S}_{13}$.
Oxidos: cuprita $\text{Cu}_2 \text{O}$, tendorita CuO .
Carbonatos: Malaquita $\text{Cu}_2 (\text{OH})_2 \text{CO}_3$, azurita $\text{Cu}_3 (\text{OH})_2 (\text{CO}_3)_2$.
Silicato: crisocola $\text{Cu Si O}_3 \cdot 2 \text{H}_2 \text{O}$.
Sulfato: brocantita $\text{Cu}_4 (\text{OH})_6 \text{SO}_4$.

HIERRO.

Oxidos: hematita $\text{Fe}_2 \text{O}_3$, goetita Fe O OH , magnetita Fe_3O_4 .
Sulfuros: Pirita Fe S_2 , pirrotita $\text{Fe}_{1-x} \text{S}$.
Carbonato: siderita Fe CO_3 .
Sulfato. Jarosita $\text{K Fe}_3 (\text{OH})_6 (\text{SO}_4)_4$.
Muchos silicatos de alta temperatura, e.g., olivina $(\text{Mg, Fe})_2 \text{Si O}_4$
Silicatos hidratados de baja temperatura: Comosita, glauconita.

MANGANESO.

Óxidos simples: pirolusita Mn O_2 , haustamanita $\text{Mn}_3 \text{O}_4$, maganita Mn OOH .
Óxidos complejos: braunita $(\text{Mn, Si})_2 \text{O}_3$, psilomelano.
Solicato: rodonita Mn Si O_3 .

MOLIBDENO.

Sulfuro. Molibdenita Mo S_2 .
Óxidos: ilsemanita $\text{MO}_3 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$
Molebdatos: wulfenita Pb MoO_4 , powlita Ca Mo O_4 , ferrimolibdita $\text{Fe}_2 (\text{MoO}_4)_3 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$.

ZINC

Sulfuro: sfalerita ZnS
Carbonato: smithsonita Zn CO_3 .
Silicato: hemimorfita $\text{Zn}_4 (\text{OH})_2 \text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Las mayores o menores reservas de minerales que contengan micronutrientes son de importancia para la nutrición vegetal, pero existen muchos factores que determinan el contenido de microelementos asimilables del suelo, que se tratarán a continuación.

6.2.1. Reacción del suelo

Todos los microelementos, excepto el molibdeno, aumentan su solubilidad, es decir su asimilabilidad, cuando el pH disminuye. El manganeso es el más influido por los cambios de la reacción del suelo; lo sigue el Mo: a continuación aparece el hierro, boro y cinc y por último el cobre, relativamente poco afectado. Una alteración del pH del suelo influye en numerosos factores, como la actividad microbiana, estabilidad de los complejos metal orgánicos, elementos antagónicos, entre otros, los cuales a su vez influyen sobre la solubilidad de los microelementos; de ahí que la intensidad del efecto de igual cambio de pH sobre los micronutrientes, no puede esperarse que siempre sea la misma.

6.2.2. Potencial Redox

El hierro y el manganeso se oxidan y reducen con relativa facilidad. Cuando estos elementos se reducen, sus compuestos se hacen más solubles, por tanto más asimilables. La falta de oxígeno, por mal drenaje, por ejemplo y la presencia de materia orgánica fresca (esta es reductora) bajan el potencial redox, favoreciendo las formas bivalentes, asimilables de hierro y manganeso. Como existen reacciones de reducción que consumen hidrógeniones, la reducción será mayor en suelos ácidos que en los de pH elevado. Generalmente los suelos tienen abundancia de Fe y Mn, si hay problemas de insuficiencia es por falta de las formas reducidas y no por insuficiencia total. La materia orgánica del suelo al reaccionar con estos elementos, abundantes en la forma oxidada en suelos bien aireados, reduce una fracción de ellos, haciéndolos asimilables; estos elementos se oxidan de nuevo y el proceso se repite continuamente. Por eso; los aportes frecuentes de materia orgánica contribuyen

a que no falten estos nutrimentos en forma asimilable. Contrariamente a lo que sucede con el hierro y el manganeso, los compuestos reducidos de molibdeno (Mo IV y V) son muy poco solubles, mientras que los compuestos oxidados (Mo VI) son muy solubles; de ahí que cambios en el potencial redox, tengan efectos sobre el Mo contrarios a los que tiene sobre el hierro y manganeso.

6.2.3. Materia orgánica

La materia orgánica aplicada al suelo como abono y los propios residuos de las plantas contienen microelementos que se liberan y se hacen asimilables al mineralizarse los compuestos orgánicos que los contienen. Los microelementos Fe, Mn, Cu y Zn, son metales pesados que pueden formar compuestos complejos como ligandos procedente de la materia orgánica. Estos compuestos llamados quelatos son solubles y por lo tanto están presentes en la solución del suelo, pero no ionizables, lo que los protege de las reacciones que en el suelo pudieran hacerlos insolubles. Los quelatos de estos microelementos son fuente importante de estos nutrimentos. La descomposición anaeróbica de la materia orgánica favorece la formación de agentes acomplejantes solubles, es decir de quelatos de estos nutrimentos. En los suelos minerales al aumentar la materia orgánica se eleva el contenido de microelementos asimilables, esto se hace más patente entre un 5 y 15 % de materia orgánica. A contenidos mayores, la materia orgánica perjudica la asimilabilidad de los micronutrimentos, como ocurre en los suelos de turba.

6.2.4. Microorganismos

Existen resultados que indican que las consecuencias de los cambios en el potencial redox y en el pH respecto al manganeso, y quizás en relación con el hierro, tienen efectos sólo a través de la actividad microbiana. Los microorganismos al actuar sobre la materia orgánica, no sólo liberan o inmovilizan microelementos sino que hacen posible la aparición de agentes acomplejantes que se unen a los microelementos, dando lugar tanto a compuestos metalorgánicos solubles (quelatos) como insolubles. Por otra parte, la descomposición de estos complejos es consecuencia de la acción de los microorganismos.

6.2.5. Rizosfera

Aquella parte del suelo en la vecindad de las raíces influida directamente por ellas constituye la rizosfera. La actividad microbiana en la rizosfera es muy intensa ya que los compuestos orgánicos liberados por las raíces son utilizados por los microorganismos para su nutrición. Los microorganismos de la rizosfera oxidan o reducen el hierro y el manganeso influyendo en su asimilación, además de los otros efectos ya expuestos, que sobre los elementos menores tiene la actividad microbiana. Los exudados producidos por la raíz y sus tejidos muertos modifican químicamente el medio de la rizósfera y actúan sobre los elementos menores, directamente o a través de los microorganismos. La raíz oxida compuestos orgánicos como aminoácidos, polisacáridos, ácidos orgánicos y azúcares, además de desprender tejidos muertos que se transforman por la acción microbiana. Existen compuestos orgánicos segregados por las raíces que pueden actuar como agentes quelantes, lo cual resulta

favorable para la asimilabilidad de los microelementos respecto a la planta. Aquella especie o variedad capaz de producir mayor cantidad de agentes quelantes tendrá mayor disponibilidad de micronutrientes en un mismo suelo que otras más limitadas respecto a esta propiedad. También distintas especies o variedades pueden mantener valores de pH en la rizófora muy diferentes, ya que pueden tener diferente capacidad para ceder H^+ por las raíces al medio; aquella que libere más H^+ a la rizófora mantendrá un pH más bajo y será más resistente a la insuficiencia de microelementos, con la conocida excepción relativa del molibdeno. Los ácidos orgánicos exudados por las raíces pueden ayudar a solubilizar microelementos, no solo como agentes quelantes, sino por su efecto sobre la reacción de la rizófora.

6.3. Hierro

6.3.1. El hierro en el suelo

Nishizawa, Shojima y Mori (1990) reportan que en condiciones de insuficiencia de hierro las gramíneas segregan sustancias capaces de disolver el hierro insoluble en la rizófora y el Fe^{3+} es absorbido formando un complejo con un quelato.

El contenido total de hierro en los suelos es generalmente elevado, ya que este es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, el problema nutricional respecto al hierro puede presentarse porque aun existiendo mucho hierro en el suelo, este se presenta en compuestos muy poco solubles como son óxidos, oxihidratos, fosfatos, carbonatos. El hierro presente en muchos minerales que forman las rocas que dan lugar a los suelos tales como la hornablenda, biotita, augita, olivino y numerosos minerales secundarios, puede encontrarse como Fe II o Fe III.

Los óxidos de Fe III presentes en los minerales son muy estables, por lo que a medida que la meteorización progresa y con esto la transformación y lavado de otros componentes, ellos se acumulan en la fracción arcillosa del suelo.

Por otra parte, el Fe II presente en minerales como el olivino se oxida a Fe III durante la meteorización. Todo ello da como resultado que en los suelos muy meteorizados como los Oxisoles, los óxidos de Fe III conjuntamente con los de aluminio y la caolinita sean los componentes predominantes en la fracción arcillosa. Los principales óxidos y oxihidratos cristalinos de Fe III en el suelo son la goethita ($-FeOOH$) de color amarillo pardusco y la hematita ($-Fe_2O_3$) la cual surge de la total deshidratación de los oxihidratos, y a la cual los suelos rojos le deben su color. Otro oxihidrato de hierro de importancia es la lepidocrocita ($-FeOOH$) la cual se origina en los compuestos de hierro en zonas profundas del suelo, pobres en O_2 y CO_2 y con humedades estagnante; adonde llega O_2 por los canales de las raíces más viejas, o de cualquier otra manera, formándose manchas difusas de lepidocrocita de color naranja en los alrededores del área de entrada de oxígeno. También de importancia son la magnetita (Fe_3O_4) la maghaemita ($-Fe_2O_3$) y la ilmenita ($FeTiO_3$). Además de estos compuestos cristalinos existen oxihidratos amorfos, convencionalmente representados como $Fe(OH)_3$.

Los óxidos y oxihidratos de Fe antes mencionados dan su coloración roja, parda, amarilla, amarillo-naranja y amarillo-ocre a los suelos, fungen de sustancias cementantes en la formación de la estructura del suelo y participan en la formación de horizontes compactados. Los óxidos y oxihidratos de Fe III son muy poco solubles,

aunque es de señalar que los compuestos muy hidratados representan una forma de hierro muy activa y propensa a la reducción (Merkle, 1965); es decir; a hacerse asimilable. Se considera al Fe^{2+} , como el ión metabólicamente activo.

6.3.2. El hierro en la planta

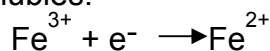
6.3.2.1. Disponibilidad para la planta

El pH y el potencial redox son dos factores determinantes en la disponibilidad del hierro para el vegetal. En los suelos de reacción ácida, generalmente, hay más hierro asimilable que en los calcáreos, de reacción alcalina. Según Lindsay y Schwab (1982) la solubilidad de los compuestos de hierro del suelo alcanza un mínimo en el rango de pH, entre 7.4 y 8.5 que es, aproximadamente, el correspondiente a los suelos calcáreos. En la práctica la insuficiencia aparece a valores de pH por encima de 6 - 7, especialmente en suelos calcáreos con alto contenido de arcilla. En estos suelos son frecuentes las insuficiencias de Fe en plantas tales como la vid, los cítricos y otros frutales, el café, la soja el maíz y las plantas de jardín, entre otras especies. Tanta es la influencia de la reacción, que la actividad del hierro en la solución del suelo decrece 1000 veces por cada unidad que se eleve el pH (Mengel y Kirkby, 1987).

En los suelos calcáreos, además del efecto desfavorable del alto pH, el abundante ión dihidrocarbonato HCO_3^- provoca un trastorno fisiológico, a causa de que perjudica tanto la absorción de hierro por la planta como su translocación dentro de ella; al parecer esto último tiene la mayor importancia (Mengel y Kirby, 1987).

Además del ión HCO_3^- , elevados contenidos de "Ca activo" inhiben la absorción de Fe por la planta. En los suelos calcáreos bien aireados la insuficiencia de Fe es menos frecuente (Bergmann y Neubert, 1976); al parecer debido a que el buen crecimiento del sistema radical en tales condiciones de suelos asegura que la planta intercepte el Fe asimilable en cantidades suficientes (alrededor del 50% del Fe absorbido por la planta es por intercepción de las raíces): en ocasiones la insuficiencia se asocia a la falta de O_2 y acumulación de CO_2 causados por humedad estagnante o compactación del suelo; aquí se favorece al ión HCO_3^- .

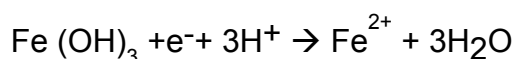
El potencial redox es otro factor determinante en la solubilidad de los compuestos de hierro en el suelo. Mientras mayores sean las condiciones reductoras, mayor tendencia a pasar los compuestos oxidados de Fe III, poco solubles, a los reducidos de Fe II, más solubles:



(Compuestos poco solubles) (Compuestos solubles)

Como en los suelos bien aireados existen las peores condiciones para la existencia de los compuestos de Fe^{2+} , la mayor parte del hierro en solución se presenta como Fe^{3+} , a diferencia de donde existen condiciones reductoras.

El equilibrio existente entre los óxidos de Fe II de la fase sólida y los iones Fe^{3+} en los suelos bien aireados es de manera muy marcada a favor de los óxidos precipitados. La reacción ácida del suelo favorece la reducción del hierro, ya que se consume H^+ en este proceso:



Es característica del hierro su aptitud para formar compuestos metalorgánicos solubles, pero no ionizables, llamados quelatos. Se supone que las raíces pueden formar quelatos, lo cual mejora la asimilabilidad del hierro para las plantas (Mengel, 1973). Los compuestos amorfos de hierro, en forma coloidal, presentan una gran superficie específica, y por tanto, una solubilidad mucho mayor que cuando cristalizan a causa del envejecimiento y desecación. Otros elementos sobre todo el manganeso, ejercen gran influencia en la asimilabilidad del hierro del suelo. El hierro se oxida fácilmente y el manganeso es muy propenso a la reducción; de ahí que una elevada presencia de Mn, provoca el paso de Fe II a Fe III (poco soluble). Otros metales pesados (Cu, Ni, Co, Zn, Cr y Mn) pueden desplazar al Fe de los quelatos, tornándose este elemento susceptible a la precipitación. Por eso aún en los suelos ácidos puede presentarse insuficiencia de Fe, por exceso de Mn u otro de los metales mencionados. También el Ca^{2+} es capaz de desplazar al Fe^{3+} de los quelatos. La elevada aplicación de fosfatos, año tras año, acumulándose en el suelo, precipita el hierro, disminuyendo su disponibilidad para la planta.

6.3.2.2. Absorción de hierro por la planta. Funciones en el vegetal

La mayor parte de los iones Fe^{3+} son reducidos a Fe^{2+} por la planta, al parecer al llegar al plasmalema, antes de ser absorbidos dentro de la célula ya que esta última forma es la metabólicamente activa. Para ser reducido el Fe III de los quelatos, este deberá unirse al plasmalema, entonces se rompe la unión hierro-anión orgánica quelante, de modo que el hierro atraviesa el plasmalema, mientras que el anión orgánico quelante queda libre.

El anión HCO_3^- abundante en los suelos calcáreos ejerce efecto negativo sobre el Fe, entre otras causas porque aumenta el pH del espacio libre de las células, dificultando la transformación del Fe III a Fe II. En un mismo suelo pueden existir especies y aun variedades que se diferencian por presentar o no clorosis férrica, estas últimas son capaces de oponerse al medio adverso a la asimilabilidad del hierro.

Existen plantas capaces de disminuir el pH del suelo por los exudados ácidos de las raíces, como es el ácido cítrico con lo que el pH de la rizófora baja y por lo tanto se favorece la solubilidad de los compuestos de hierro. Este mismo efecto lo provocan los H^+ cedidos por las raíces al respirar. Otros mecanismos que favorecen la absorción de Fe son la formación de quelatos por los exudados orgánicos de las raíces; asimismo hay especies que se oponen a la escasez de Fe asimilable por un efecto reductor sobre el Fe III, además de cambios que pueden ocurrir en el sistema radical, como son el mayor crecimiento de las pelos radicales, ya que estos son células muy específicas para la extracción de hierro del suelo. La importancia del hierro en el metabolismo vegetal, se basa en su buena aptitud para cambiar de valencia y para formar quelatos. El hierro forma parte de diferentes enzimas así, interviene en la respiración por medio de enzimas que la regulan como los citocromos b y c y la catalasa; por eso los mitocondrios, como centros de respiración contienen mucho hierro.

Otras enzimas que contienen hierro son la peroxidasa y la citocromoxidasa, las que participan en el metabolismo, sobre todo en reacciones de oxidación y en la cadena

respiratoria como transportadores de electrones; por eso, si falta hierro, se reduce la actividad de estas enzimas, con lo cual disminuye el suministro de energía necesaria para el crecimiento. Los cloroplastos pueden contener hasta 80% del hierro total de la planta. En los cloroplastos abunda la ferredoxina, la cual transporta electrones en los procesos de oxidación-reducción. Especial significado tiene esta enzima en la primera reacción de la fotosíntesis, es decir, en la transformación de la luz en energía química. La ferredoxina participa también en la asimilación de N_2 atmosférico en la reducción de los NO_2^- en el proceso que conduce a la formación de aminoácidos, así como en la reducción de los iones sulfato. De ahí, que una insuficiencia de hierro ocasione una disminución en la síntesis de aminoácidos.

Aunque el hierro no es componente de la clorofila, cataliza su síntesis por medio de diversos sistemas enzimáticos.

6.3.3. Insuficiencia y exceso

Los síntomas visuales de la insuficiencia aparecen en las hojas más jóvenes, los cuales, cuando corresponden a una carencia relativamente ligera se caracterizan por una clorosis verde -amarillenta; con una insuficiencia creciente los síntomas corresponden a una coloración amarillo-limón o naranja de las zonas internervales, en agudo contraste con la coloración verde de los nervios. Al avanzar la insuficiencia aun más, el color verde de los nervios desaparece y toda la hoja toma una coloración de blanco amarillenta a casi blanca. La anterior descripción corresponde a las dicotiledóneas; en las monocotiledóneas, como las poáceas, la insuficiencia aparece como franja clorótica paralelas a los nervios los cuales permanecen verdes.

Una característica general de los síntomas de la insuficiencia de hierro es que mientras más joven la hoja más intensa es la clorosis, por otra parte las hojas cloróticas conservan su tamaño normal.

El exceso se ha observado casi exclusivamente en arroz de aniego, cuando bajo las condiciones fuertemente reductoras la capacidad oxidante de las raíces no basta para oxidar el exceso de Fe^{2+} que aparece cuando el suelo es muy rico en óxidos de hierro libres de fácil reducción. Esta capacidad de las raíces para excluir de la absorción un exceso de Fe^{2+} disminuye cuando hay insuficiencia de potasio o de otros nutrimentos (P, Mn, Ca, Mg). (Tanaka y Tadano, 1972)

Los síntomas visuales del exceso se caracterizan por manchas pardas o coloración anaranjada en las hojas más viejas y extremas de las hojas pardo-rojizas ("bronceado del arroz"), además de raíces gruesas y pardas. Arzola (1980) observó que después de la aparición de zonas de color naranja o amarillas que comenzaban en el extremo apical de las hojas inferiores avanzando hacia la base, se producía un secamiento de las hojas y muerte de la planta si la toxicidad era aguda. El exceso de Fe ha provocado insuficiencia de Zn en arroz.

.Cuando tales medidas como la aplicación de elevadas dosis de abonos fosfóricos o el encalado no sean eficaces para eliminar la toxicidad debe renunciarse a mantener el suelo anegado.

6.3.4. Corrección de la insuficiencia

La insuficiencia de hierro es la más difícil de corregir entre todas las insuficiencias nutricionales. Las sales de hierro II, como el $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, aplicadas al suelo se insolubilizan rápidamente, ya que el Fe II se oxida a Fe III, por lo que los intentos de corregir las insuficiencias de Fe de esta manera han tenido poco éxito; el problema de la insuficiencia de hierro, casi sin excepción no es la falta de Fe total en el suelo, sino de hierro asimilable. Las condiciones que han favorecido su existencia como compuestos de Fe III, poco solubles son las mismas que insolubilizan el Fe II de las sales inorgánicas aplicadas como fertilizante.

Por otra parte la aplicación de soluciones de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ foliarmente han corregido la insuficiencia de hierro en algunas especies como la piña mientras que en otras como los cítricos no, pues el hierro solo penetra en algunos puntos de las hojas y no se trasloca a los brotes nuevos que surgen tras la aplicación.

En aquellas especies donde las aplicaciones foliares de sulfato ferroso son efectivas, estas se hacen en concentraciones de 0,05 a 0,5% de $\text{Fe SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, preferiblemente en agua lluvia, pues el agua dura provoca la precipitación del hierro; sino se dispone de agua lluvia es necesario añadir de 0,2 a 0,5 ml de $\text{H}_2 \text{SO}_4/\text{L}$ para mantener el hierro en solución. Si no se aplica inmediatamente el Fe II se oxida, haciéndose insoluble.

En muchas especies como los cítricos, los intentos de eliminación de la insuficiencia de hierro solo tuvieron éxito parcial hasta la corrección con Fe-EDTA (quelatos). Ese quelato es preferible para suelos ligeramente ácidos, mientras que para aquellos con pH superior a 7, donde son más frecuentes las insuficiencias de Fe, este quelato es muy inestable por lo que son preferibles otros como el Fe. EDDHA (secuestreno -Fe-138), el cual puede aplicarse en dosis de 50-450g por árbol al suelo. Si se aplica foliarmente se necesitan de dos a tres aspersiones con intervalos de 8 a 10 días de soluciones de 0.1 a 0,4% de ese compuesto; las aplicaciones al suelo son preferibles por su efecto mas duradero.

Como los quelatos más estables son caros se les reserva para aquellas situaciones en que otras medidas más económicas, como las aspersiones foliares de sulfato ferroso resultan infructuosas. Un adecuado manejo de suelo puede eliminar o al menos paliar la insuficiencia. Toda medida que elimine las limitaciones al crecimiento del sistema radical como es la eliminación de la compactación, favorece la absorción de hierro. La aplicación de abonos de reacción ácida, como el sulfato de amonio, puede contribuir a disminuir la insuficiencia.

Cuando la carencia se deba a exceso de Mn, un ligero encalado puede ser beneficioso ya que el Mn reacciona con más intensidad a los cambios de pH que el Fe. La aplicación del agua de riego rica en HCO_3^- puede provocar la insuficiencia, por lo que en este caso a de suspenderse el uso de tales aguas.

Se ha observado que si la insuficiencia de Fe es provocada por exceso de Cu, Mn, Zn o Co, puede eliminarse aplicando molibdeno. Este elemento mejora tanto la absorción de Fe por la planta, como su disponibilidad fisiológica.

6.4. Manganeso

6.4.1. Generalidades

La forma reducida de Mn^{2+} , es la que las plantas toman preferiblemente, la cual se encuentra en la solución del suelo o en forma intercambiable unida a los coloides del complejo arcillo húmico. Además de la forma bivalente, el manganeso se presenta en el suelo con las valencias +3 y +4; los compuestos de estos dos últimos son difícilmente solubles; menos, mientras menor es la valencia.

La más importante fuente de manganeso en el suelo son los óxidos. Entre el Mn^{2+} acuoso soluble o intercambiable, y los óxidos de Mn III y IV existe un equilibrio que depende, sobre todo, de la reacción del suelo y del potencial redox.

A valores de pH menores que 6,0 no se presenta la insuficiencia, a menos que el contenido de Mn total en el suelo sea muy bajo. A valores de pH entre 6,5 y 7,5 es mínima la disponibilidad de Mn, a causa de la alta actividad bacteriana lo que trae consigo una intensa oxidación de Mn a la forma Mn IV. El efecto positivo de los bajos valores de pH sobre la forma reducida Mn^{2+} , se explica por la siguiente reacción:



La marcada dependencia del Mn respecto del pH hace que por debajo de pH 5,5 predominen las formas intercambiables y acuoso solubles (Mn^{2+}), y por encima de pH 6,5 los óxidos trivalentes y tetravalentes, Mn_2O_3 y MnO_2 (Mn III y IV),

El potencial redox del suelo ejerce notable influencia sobre la disponibilidad para las plantas; la humedad del suelo ejerce influencia sobre la asimilabilidad de este elemento; en años húmedos la asimilabilidad es mayor; ya que a un mismo valor de pH, mientras mayor sea la humedad, menor el potencial redox, el cual favorece los procesos reductores y con ello la presencia de Mn^{2+} .

Ya que la disponibilidad de Mn para las plantas depende, además del pH y del potencial redox, del contenido de Mn fácilmente reducible en el suelo, Schachtschabel (1955) citado por Pagel et al. (1982) propuso para juzgar el probable suministro de Mn por el suelo a la planta, la determinación de la suma Mn acuoso soluble + Mn intercambiable + Mn fácilmente reducible con la denominación de Mn activo.

Por la gran influencia que el potencial redox tiene sobre la disponibilidad de Mn para el vegetal, la aireación del suelo, el contenido de materia orgánica y el régimen hídrico desempeñan un papel fundamental al respecto.

Arzola y Vilma Contreras (2011) reportan que al estudiar mediante correlaciones lineales las relaciones entre el contenido de manganeso del suelo, con características generales de los suelos se encontró que, el incremento del contenido de arcilla ($r=0,44^{**}$) y la disminución del pH, fueron los dos factores que en mayor medida incrementaron la disponibilidad de este elemento en el suelo ($r=-0,26^{**}$).

6.4.2. El Mn en la planta

6.4.2.1. Disponibilidad para las plantas

La insuficiencia aparece, sobre todo, en suelos de elevado pH, especialmente los calcáreos u orgánico-carbonáticos, bien aireados.

En estos el efecto negativo no solo del pH y potencial redox altos, sino también del gran contenido de Ca^{2+} intercambiable que inhibe la absorción de Mn y saturación en la planta.

También los suelos arenosos, muy acidificados pueden haber perdido por solubilización y lavado gran parte de este elemento, por lo que la aparición de insuficiencia de Mn en ellos no es rara. Por el contrario, en los suelos ricos en arcilla, sobre todo del tipo 2:1, con buen contenido de humus el Mn activo es elevado y por lo tanto la insuficiencia muy poco probable, ya que la elevada capacidad de intercambio catiónico de estos suelos preservan al Mn^{2+} intercambiable del lavado; como tienen una gran capacidad hídrica no suelen ser bien aireados, lo que favorece bajos potenciales redox; además durante la mineralización del humus se consume O_2 , lo cual disminuye aún más el potencial redox, favoreciendo la presencia de Mn^{2+} asimilable y porque el alto contenido de arcilla y humus inhiben la cristalización de los óxidos de Mn recién precipitados, por la menor desecación del suelo que en caso contrario (Pagel et al., 1982).

6.4.2.2. Formas de ser absorbido y funciones en la planta

La planta absorbe el Mn como Mn^{2+} y sus quelatos, sino exclusivamente, preferiblemente. A causa de la capacidad reductora del sistema radical, la planta puede utilizar, hasta cierto punto, los compuestos fácilmente reducibles de manganeso. La importancia del Mn para el metabolismo del vegetal radica en la facilidad con que se reduce y oxida, por lo que participa en procesos de oxidación-reducción, como el transporte de electrones en la fotosíntesis (Mengel y Kirkby, 1987). Es imprescindible en la descomposición del agua en el fotosistema I, así como en la fotólisis en el fotosistema II (Pagel et al., 1982). El Mn participa en numerosas enzimas relacionadas con procesos metabólicos, como la síntesis de carbohidratos y proteínas. Este elemento activa la indolacético-oxidasa. Es necesario mencionar su papel en la activación de las descarboxilasas y deshidrogenasas. El Mn toma parte en numerosas reacciones enzimáticas conjuntamente con el Mg, en las cuales pueden sustituirse mutuamente hasta cierto grado.

6.4.3. Insuficiencia y exceso

La insuficiencia se caracteriza por una clorosis internerval, que comienza en las hojas jóvenes pero no en las más jóvenes, como ocurre con el hierro. La insuficiencia de Mn provoca una inhibición de la síntesis de proteína y clorofila y un aumento de la descomposición de esas sustancias por falta de energía para los procesos de síntesis, así como una acumulación de compuestos nitrogenados de bajo peso molecular, incluyendo nitrato y ácidos orgánicos, lo que conduce a clorosis y finalmente a necrosis. La clorosis internerval comienza en las áreas de tejido foliar

alejadas de los nervios o venas, al inicio, la destrucción de clorofila provoca que las células pierdan su color verde y que surja inicialmente una clorosis debida a pequeñas manchitas verde amarillentas o descoloridas, las que se ven claramente cuando se observan a trasluz. En las gramíneas la clorosis se presenta como franjas internervales en forma de "sarta de perlas". Paralelamente a los nervios permanece una franja verde durante largo tiempo. Las hojas de las dicotiledóneas adquieren un moteado de verde amarillento a amarillento internerval que da a la hoja el aspecto que semeja una red formada por los nervios y las zonas verdes que los rodean. Si se mantiene la insuficiencia en muchas dicotiledóneas aun los nervios finos se tornan cloróticos y solo permanece verde una pequeña área en la parte basal de la hoja, bordeando el nervio central. Posteriormente surgen manchas necróticas en el centro de las manchas cloróticas, las que se perforan, parcialmente, esto es notorio en especies como la papa, tomate, leguminosas, poaceas, col y remolacha.

Característica de la falta de manganeso es que en las hojas que muestran los síntomas visuales (jóvenes y medias), estos, en general, son más marcados mientras más basal sea la inserción de la hoja. El exceso de Mn puede producir insuficiencia de hierro, además de efectos específicos. Los síntomas visuales, frecuentemente, se caracterizan por necrosis en forma de manchas pardas en las hojas más viejas. También se han reportado las insuficiencias de Cu y Mo por exceso de Mn.

6.4.4. Corrección de la insuficiencia y exceso

En suelos con pH por encima de 6,5 no es económico el abonado al suelo, pues el Mn^{2+} se oxida haciéndose poco asimilable. En pH menores de 6,5 puede aplicarse al suelo a razón de 25-50 kg.de Mn en suelos arcillosos y de 45 a 20 kg. en los ligeros como $Mn SO_4 \cdot 5H_2O$. En los suelos de pH por encima de 6,5 debe hacerse aspersiones foliares de 0,25 a 2% de $Mn SO_4 \cdot 5H_2O$. La solución debe neutralizarse con unos 2 kg. de $Na_2 CO_3$ por 500lts. de agua. A los 10 o 14 días debe aplicarse una segunda aspersión si la deficiencia es aguda se necesitan varias aspersiones: El Mn-EDTA es un fertilizante de manganeso muy eficaz. La aplicación de abonos fisiológicamente ácidos como el sulfato de amonio puede ayudar en algunos suelos, sobre todo en los de pobre poder amortiguador, a solubilizar el Mn del mismo. Los excesos se corrigen encalando el suelo. También se ha paliado el exceso de manganeso con aplicaciones de molibdeno.

6.5. Cinc

6.5.1. El Cinc en el suelo

El Cinc en el suelo proviene de minerales como la augita, biotita y hornablenda, de cuyos cristales forma parte. En el suelo, el Zinc aparece, además, como los iones Zn^{2+} , $ZnCl^+$ y $Zn(OH)^+$, en dependencia del pH del suelo. Estos cationes se unen al complejo del suelo de forma intercambiable por otros cationes, aunque esa unión es muy fuerte, aumentando su fortaleza a medida que el pH del suelo sube. De ahí que la movilidad del Zn en el suelo sea muy pequeña; igualmente baja la concentración del Zinc en la solución del suelo.

Los iones Zn^{2+} pueden sustituir los iones Mg^{2+} dentro de los cristales de arcilla. El zinc se acumula sobre todo en la capa arable del suelo.

6.5.2. El cinc en la planta

6.5.2.1. Disponibilidad para las plantas

Ya que la fortaleza de absorción de los iones de zinc al complejo de cambio del suelo aumenta a medida que el pH se eleva, la insuficiencia de Zn tiene lugar a pH por encima de 6,0-6,5 (Bergmann y Neubert, 1976), por ejemplo, en los suelos calcáreos de reacción neutra o alcalina. Es probable que a valores de pH elevados se favorezca la formación de cincatos de calcio insolubles. En los suelos arenosos ácidos, donde se ha perdido mucho Zinc por lavado, son probables las insuficiencias de Zinc, sobre todo si se ha aplicado mucho fósforo o si se ha encalado. Un alto contenido de fósforo disminuye la asimilabilidad del zinc, supuestamente ocurriría una precipitación de zinc tanto en el suelo como en la planta, como fosfato de zinc.

En áreas de abasto de caña del ingenio Ecudos S.A., se presentan predominantemente suelos con pH alrededor de la neutralidad o ligeramente ácidos, así como elevados contenidos de fósforo asimilable en el suelo, reportándose en un 93% de las muestras de suelo tomadas contenidos insuficientes de Zn (Arzola y Vilma Contreras, 2010).

En los suelos orgánicos con un bajo potencial de mineralización también es probable la insuficiencia, así como en los suelos formados a partir de rocas ácidas macrogranudas como el granito y el gneis.

6.5.2.2. Absorción del Zn por la planta. Funciones en el vegetal.

El zinc se absorbe por el vegetal sobre todo como Zn^{2+} . Por la poca movilidad del zinc y su baja concentración en la solución del suelo, el contacto estrecho entre las raíces y las partículas de suelo desempeña un papel fundamental en la absorción del zinc por la planta. Un exceso de fósforo puede causar una fijación de Zn en las raíces por lo que decrece la acumulación acropetala de este elemento incluyendo su concentración en las hojas.

El zinc forma parte de numerosas enzimas como dehidrogenasa, proteinasas y peptidasas con lo cual participa en el metabolismo del nitrógeno. Una insuficiencia de Zn provoca una disminución de la síntesis de RNA y una inhibición en la formación de proteínas. Este elemento actúa como agente catalítico de reacciones oxidantes, interviene en el metabolismo de carbohidratos y parece influir en la actividad fotosintética.

Ya que el zinc cataliza la síntesis de triptófano y este es la forma previa a la auxina ácido B -indolacético, este elemento se relaciona con la formación de auxina; asimismo se ha supuesto que impida la destrucción de la misma.

6.5.3. Insuficiencia y exceso

Los árboles y arbustos frutales reaccionan marcadamente a la insuficiencia de Zn, sobre todo los cítricos, el melocotón, la manzana y la vid, también las plantas ornamentales, el maíz, los frijoles, la soja y la yuca se encuentran entre las más

susceptibles. Los síntomas visuales de la insuficiencia están muy relacionados con la insuficiencia de auxina: entre el más característico se cuenta la presencia de hojas terminales pequeñas, insertadas formando roseta, a causa de los muy cortos entrenudos. Estas hojas en forma de punta de lanza muestran clorosis internerval que cubre toda el área foliar. Cuando la insuficiencia se agudiza, como el crecimiento terminal de la planta se afecta primero hay una disminución de la longitud del tallo en muchas especies. También, la deformación y caídas prematuras de frutos están entre los síntomas más característicos de la insuficiencia. Los síntomas visuales se agudizan en la época de sequía cuando al aumentar las radiaciones ocurre una mayor descomposición de auxina. Los síntomas descritos no corresponden a todas las especies. Así, por ejemplo, en el arroz se caracterizan por manchas pardo-herrumbrosas en las hojas más viejas, entre dos y tres semanas después de la germinación (Sanzo, 1990).

En condiciones de la práctica agrícola es poco frecuente la toxicidad por este elemento. La fertilización con los residuales, ricos en zinc durante largo tiempo, puede producir la toxicidad. El exceso de zinc se manifiesta por una insuficiencia de hierro. El límite de tolerancia para el zinc queda entre 300 y 500 mg. por kg de materia seca (Pagel et al., 1982).

6.5.4. Corrección de la insuficiencia

A pH no mayor de 6 las aplicaciones al suelo de fertilizantes conteniendo Zn son preferibles a los foliares, ya que el efecto es más duradero. Las dosis más frecuentes fluctúan entre 3-15 kg. de $\text{Zn} \cdot \text{ha}^{-1}$, como $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, las dosis serán más elevadas mientras más arcilloso el suelo y más alto sea el pH; aunque las dosis más frecuentes corresponden de 4 a 6 Kg. de $\text{Zn} \cdot \text{ha}^{-1}$; efectivas para varios años. Para maíz y frijoles se recomiendan dosis de 5-16 Kg. de $\text{Zn} \cdot \text{ha}^{-1}$; mientras que para arroz Sanzo (1990) obtuvo la mejor respuesta con una dosis relativamente elevada de 26 Kg. de $\text{Zn} \cdot \text{ha}^{-1}$, fraccionada en 10, 8 y 8 $\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ en tres cosechas consecutivas en vertisoles de pH entre 6.5 y 7.0. Aunque este pH no es favorable, es de señalar que las condiciones de aniego favorecen la asimilación del Zinc. Para suelos arenosos fueron suficientes dosis de 20 kg de Zn por ha., de una vez o fraccionada en varias cosechas. Otras fuentes de Zn menos frecuentemente usadas son el óxido de Zinc (70-80%), el superfosfato y la urea con zinc y los quelatos; estos últimos tienen como limitante el alto costo.

6.6. Cobre

6.6.1. Cobre en el suelo

El cobre se presenta en el suelo formando parte de los cristales de los minerales, unido al complejo de cambio en forma de iones Cu^{2+} y Cu OH^+ , y como parte de compuestos orgánicos complejos. El radio iónico del cobre es tan pequeño que su densidad de carga es muy alta en comparación con otros cationes nutrientes; de ahí que sea desplazado por esos otros cationes con dificultad. A causa de esa fuerte retención al complejo de cambio, el cobre se acumula en los suelos arcillosos, ya que se lava muy poco.

6.6.2. El cobre en la planta

6.6.2.1. Disponibilidad para las plantas

Los suelos arcillosos generalmente están bien provistos de Cu asimilable para las plantas. El efecto de la fuerte retención por la arcilla es contrarrestado por el creciente porcentaje de saturación cúprica de las mismas, lo cual hace que haya una fracción de ese cobre intercambiable que se cede con relativa facilidad, satisfaciendo la necesidad del vegetal. Por otra parte, los suelos arenosos ácidos y algunos ferralíticos muy ácidos pueden haber perdido gran parte de su cobre asimilable por lavado, lo cual es facilitado por la reacción del suelo. En estos suelos no son raras las insuficiencias para el ganado. Aunque la reacción ácida del suelo facilita la movilidad y por lo tanto la asimilabilidad del cobre; se ha encontrado que no existe una relación entre cobre asimilable y pH del suelo como la que ocurre con los demás microelementos; es decir, esta relación en el caso del cobre es muy atenuada. Una causa para ello es que, por una parte, muchos suelos arcillosos no son de reacción ácida y como ya se explicó suelen presentar suficiente cobre asimilable, mientras que los suelos arenosos ácidos lavados pueden presentar insuficiencia de cobre. Los suelos muy calcáreos pueden ser insuficientes en cobre asimilable por la formación de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y Cu CO_3 , muy poco solubles (Pagel et al., 1982).

Arzola y Vilma Contreras (2011) no encontraron relación alguna entre el pH y el contenido de cobre asimilable del suelo, mientras que al aumentar el contenido de arena ($r=0,18^{**}$) disminuía el contenido de este elemento en el suelo.

El alto contenido de humus en el suelo, como en los arenosos húmicos y los de turba, se asocia a la insuficiencia de cobre. Este efecto se atribuyó a la fuerte fijación que podrían ejercer sobre este elemento ciertos compuestos húmicos. Hoy se conoce que las causas se deben, sobre todo, a la pobreza en cobre total característica de los compuestos húmicos y a la débil vida bacteriana de estos suelos, con la consiguiente poca liberación de cobre asimilable. La insuficiencia de cobre se agudiza con fuertes aplicaciones de fósforo, las que inhiben la absorción de cobre por la planta. En suelos ligeros y húmicos las aplicaciones elevadas de potasio intensifican la insuficiencia, asimismo, el abonado nitrogenado pesado puede inducir o agudizar la carencia por la importancia del cobre en el metabolismo de los aminoácidos.

6.6.2.2. Absorción de cobre por la planta. Funciones en el vegetal

La planta toma el cobre como ión Cu^{2+} y como quelato. La máxima absorción de cobre por la planta tiene lugar en la planta joven. El transporte de cobre desde las raíces hasta las partes más altas del vegetal es muy pobre; de ahí, que aún las elevadas dosis de fertilizantes cúpricos enriquezcan sobre todo las raíces y el contenido en las hojas aumente lentamente. El cobre en la planta se presenta en concentraciones mucho más bajas que el Fe, Mn, y Zn; normalmente entre 2 y 25 mg.kg^{-1} de materia seca. Los efectos fisiológicos específicos del cobre están en estrecha relación con su pequeño radio iónico, su alto peso atómico, su buena capacidad para cambiar de valencia y su facilidad para formar compuestos complejos. Existe una fuerte afinidad del cobre respecto a determinadas estructuras proteicas con las cuales el cobre se une fuertemente; de ahí que exista una fuerte correlación entre el cobre y el contenido de proteína. En general las hojas más ricas en nitrógeno poseen más cobre (Bergman y Neubert, 1976). Más del 70% del cobre de la planta se acumula en los cloroplastos.

Este elemento se relaciona con la síntesis de clorofila, participando en procesos enzimáticos y como estabilizador de la misma (Pagel et al., 1982).

En la hoja debe haber una determinada relación entre el contenido de clorofila y el de proteína, para proteger a la clorofila de su descomposición. El cobre favorece la síntesis de proteína e inhibe la descomposición de la misma; con ello este elemento ejerce un efecto estabilizador sobre la clorofila. Si falta cobre disminuye la fracción proteica a favor de la fracción de compuestos solubles de nitrógeno. El cobre participa, además en la reducción de los nitratos, con lo que favorece la formación de aminoácidos.

Favorece la síntesis de carbohidratos; una insuficiencia de cobre provoca una disminución de la síntesis de lignina, con ello sufre la estabilización y lignificación de la pared celular. El cobre activa enzimas de importancia para el metabolismo respiratorio y para el transporte de electrones.

6.6.3. Insuficiencia y exceso

No hay una descripción generalizada de los síntomas visuales de la insuficiencia de cobre, ya que varían de una especie a otra (Rahimi, 1972). Esos síntomas tienen como causas primarias, la inhibición o insuficiente lignificación de la pared celular y la alteración en la formación de vasos conductores; ambas perturbaciones traen como consecuencia falta de firmeza en los tejidos de tallos, pétalos y hojas e inhibición del transporte de agua y nutrimentos.

Así la marchites permanente de las hojas y su enrollado tiene por causa la reducción del transporte de agua. Los síntomas visuales de cobre aparecen primero, generalmente, en las hojas y órganos más jóvenes como un metabolismo más activo. Típico de la insuficiencia de cobre es que la fase generativa de la planta, la formación de flores y frutos, merma en mayor grado que el desarrollo vegetativo. En los cítricos y otros frutales; al desaparecer la dominancia apical, por muerte de la yema apical, ocurre una intensiva formación de renuevos en forma de S, con hojas de apariencia vigorosa. En esos brotes suelen aparecer acumulaciones de goma en la corteza que impiden el transporte de los carbohidratos desde las hojas a través del floema. En la caña de azúcar ocurre una permanente marchites, es necesario conocer los síntomas en cada especie, por las características propias de la insuficiencia en cada una.

Respecto a la nutrición animal, las insuficiencias de cobre y de cobalto son las más comunes entre los microelementos. El cobre interviene directamente en la formación de la hemoglobina; por eso, si hay insuficiencia de cobre aparece anemia y retardo del crecimiento, además de falta de fecundidad, trastornos nerviosos, etc. Si en el pasto o forraje el contenido de cobre es de 1 a 3 mg.Kg⁻¹ de materia seca (p p m) aparecen trastornos en el ganado vacuno; si es de 5 a 8, raramente sufre de la insuficiencia. El exceso de cobre se manifiesta por una disminución de hierro o de otros metales pesados Mn y Zn en el follaje, con reducción de la cosecha y su calidad. El exceso es raro; sólo se presenta en aquellos suelos donde se hacen continuas aplicaciones de fungicidas cúpricos que conduzcan a la acumulación excesiva del elemento en la capa arable y en sitios cercanos a las minas de cobre.

Fernández et al.(2001) estudió los contenidos de cobre en 20 suelos de viñedos de Galicia (NW España) así como su distribución en las distintas fracciones del suelo, encontró en todos ellos una presencia excesiva de este metal, superando en el 60% de las muestras el umbral de fitotoxicidad de 100 mg.Kg⁻¹. Por lo tanto, parece que el

cobre aportado a lo largo del tiempo a este cultivo como componente de productos anticriptogámicos se ha ido acumulando en el suelo y gran parte permanece en él ligado principalmente a la materia orgánica como lo demuestra el hecho de que el cobre unido a la materia orgánica es la fracción mayoritaria de cobre en estos suelos.

6.6.4. Eliminación de la insuficiencia y exceso

La fuente de cobre más comúnmente usada como abono es el sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), con 26% de Cu. Para suelos ligeros deficientes se recomiendan de 5 a 20 Kg de sulfato de cobre por hectárea; para suelos pesados y orgánicos las dosis son de 25 a 100kg por hectárea. La cantidad dada se disuelve en 500 a 1000L de agua y se asperja al suelo; así se logra una buena distribución. Esto es suficiente para 3 a 5 años. Gran parte del cobre aplicado como sales inorgánicas se retiene con mucha fortaleza en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico. En esos casos, los quelatos de cobre tienen mejor efecto.

Otras fuentes de cobre son el óxido (Cu O , 70% de Cu) y fertilizantes de elementos mayores como el superfosfato, enriquecido con cobre.

Lo común es el abonado al suelo, preferiblemente aumentando paulatinamente su contenido, pero si se detectará la insuficiencia en un cultivo, este se trataría con aspersiones foliares con un 0,5 a 1.0% de $\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, neutralizadas para evitar quemaduras, o con sulfato de cobre básico ($\text{Cu SO}_4 \cdot 3 \text{ Cu (OH)}_2$). Los quelatos y el óxido de cobre también pueden aplicarse en aspersiones foliares. El exceso de cobre puede eliminarse o aminorarse con elevadas aplicaciones de fertilizantes fosfóricos, de encalado o de abonos orgánicos. También la aplicación de quelatos de hierro o de sulfato ferroso puede aminorar los daños de la toxicidad.

6.7. Boro

6.7.1 Boro en el suelo

La roca madre determina en alto grado el contenido de boro total del suelo. Los suelos formados de rocas ácidas eruptivas contienen, generalmente menos boro que los formados de rocas sedimentarias de origen marino, ya que el agua de mar es rica en boro. La impulverización (transporte por el viento de pequeñas gotas de agua conteniendo sales, entre ellas de boro) contribuye al contenido de boro de los suelos costeros.

A mayor grado de meteorización y lavado, más pérdida de boro del suelo. Los sedimentos arenosos ácidos suelen ser pobres en boro. La mayor parte del boro de la litosfera se encuentra como turmalina, borosilicato muy insoluble que contiene 3% de boro. El boro se presenta de diferentes formas en el suelo: como elemento estructural de los minerales, como ión adsorbido a los minerales arcillosos y al humus, formando parte de compuestos orgánicos complejos y en la solución del suelo. La fracción del boro como elemento estructural de minerales, incluye las arcillas silicatadas, de las cuales se libera lentamente por hidrólisis. En las micas y las ilitas el boro aparece en el centro de los tetraedros de su red cristalina. Cuando los compuestos orgánicos se mineralizan liberan al boro, haciéndose asimilable. En la solución del suelo el boro se encuentra principalmente como H_3BO_3 . A causa de su baja constante de disociación hasta pH 7.5 el H_3BO_3 aparece prácticamente no ionizado y por tanto, poco

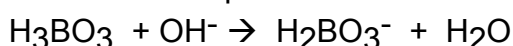
adsorbido por los coloides del suelo y fácilmente lavable. Esta forma de boro es fundamental para la nutrición vegetal, ya que es la tomada por las raíces.

6.7.2. El boro en la planta

6.7.2.1. Disponibilidad para las plantas

El contenido de boro asimilable del suelo está determinado por varios factores, además del contenido de boro en la roca madre y del grado de meteorización y lavado del suelo. El pH del suelo es un importante factor en la asimilación del boro. Generalmente, al aumentar el pH desde una reacción ácida a neutra o alcalina disminuye la solubilidad del boro y por lo tanto su asimilabilidad. Para ello hay varias causas.

Al aumentar el pH aumenta la disociación del ácido bórico:



Los iones borato así surgidos (H_2BO_3^- , HBO_3^{2-} y BO_3^{3-}) quedan expuestos a la fijación por las arcillas silicatadas y los óxidos libres de Fe y Al. Los iones de boro citados se fijan en las arcillas silicatadas por las hidropolímeras de Fe y Al existentes en el espacio interlamilar de las mismas (Pagel et al, 1982). También es probable que los iones de boro se fijen al pasar a los centros de las arcillas silicatadas.

En los suelos ricos en sesquióxidos estos deben de fijar los iones borato por medio de intercambio de ligandos semejante a como ocurre con el fósforo.

Es probable que también el carbonato cálcico realice la fijación por intercambio de ligandos. La fijación antes descrita es máxima en las arcillas silicatadas y los sesquióxidos de Fe a pH entre 8 y 8.5, y en los sesquióxidos de Al a pH de 5.5 a 7.5. Por otra parte es posible que un aumento de pH provoque la precipitación de borosilicatos de aluminio y calcio, poco solubles. El humus del suelo es otro importante factor en la disponibilidad del boro: mientras más humus menos posibilidades de pérdida por lavado. Los suelos arenosos ácidos pobres en materia orgánica se encuentran entre los que con frecuencia presentan insuficiencia de boro. En los suelos de las regiones de clima templado con el aumento del porcentaje de arcilla se eleva el contenido de boro total del suelo, el cual representa el funcionamiento esencial para la disponibilidad del boro para las plantas, en las de clima tropical lluvioso no siempre existe esta relación, ya que el contenido de arcilla puede estar relacionado con mayor grado de meteorización y por tanto de lavado del boro. En estos suelos se ha hallado una mejor relación con el contenido de limo y de humus que con el de arcilla.

En la época de sequía se agudiza la insuficiencia de boro, debido a que los iones de boro que hayan penetrado en los coloides hinchados tras un período de lluvia pueden quedar fijados si sigue un período prolongado de sequía, pues los coloides al contraerse ocasionan una fijación intercrystalina del elemento. Además, en esta época la reducción de la solución del suelo provoca una disminución del boro disuelto; igualmente decrece el flujo de agua con boro y el grado de difusión de los iones bóricos hacia las raíces. El exceso de potasio puede producir insuficiencia de boro.

6.7.2.2 Absorción de boro por las plantas. Funciones

El boro es absorbido como BO_3^{3-} y probablemente también como los iones BO_3H^{2-} y BO_3H_2^- . El boro influye en el metabolismo de los carbohidratos, el sistema de información central del desarrollo, diferenciación celular, la permeabilidad de la membrana y el transporte de asimilatos, la absorción activa de sales, el régimen hídrico, el régimen de los ácidos nucleídos y de la proteína, la formación de las flores y la germinación del polen, así como el metabolismo y transporte de las hormonas. En relación con el metabolismo de los carbohidratos el boro favorece la eficacia de la fotosíntesis a través de su positiva influencia en los procesos de fosforilación y sobre el transporte de los productos de la fotosíntesis. Por otra parte, si falta boro aumenta la respiración. La importancia del boro en el metabolismo vegetal se relaciona con su influencia en los procesos energéticos, en los procesos de fosforilación y desfosforilación. Las plantas con un contenido bajo de fósforo tienen una gran demanda de boro. Si falta boro disminuye el contenido de ATP y aumenta la actividad de la ATPasa; es decir ocurre una perturbación del régimen energético. Una insuficiencia de boro perjudica el transporte desde los sitios donde se han sintetizado los azúcares hasta los órganos de almacenamiento o hasta donde se les necesita. La relación entre el boro y el transporte de estos compuestos parece radicar en el hecho de que si este elemento es insuficiente hay daño en los tejidos conductores de la planta. Además el boro evita la excesiva polimerización de los azúcares y con ello facilita su traslación. De ahí que el boro favorezca el contenido de azúcares y almidón en los frutos y órganos de reserva como son los tubérculos.

Por medio de la activación de los procesos de desfosforilación el boro fomenta la síntesis de almidón y celulosa. Este elemento promueve una adecuada estructura de la pared celular y el desarrollo de las células del cambio a células de xilema y floema. Este elemento es significativo para la síntesis de proteína y de ácido nucleído. Si falta boro se reduce la incorporación de fósforo en los nucleótidos y se inhibe la formación de aminoácidos acompañada de una acumulación de nitrato en la planta.

Este elemento se asocia al proceso de división celular. Es necesario para la formación normal de la célula y su diferenciación. En el proceso de fructificación el boro tiene gran importancia.

Los órganos reproductivos son ricos en boro. La influencia sobre el régimen hídrico se ejerce aumentando la transpiración si la disponibilidad de agua es elevada y disminuyéndola si hay sequía. La absorción del nutriente se favorece por este elemento.

6.7.3. Insuficiencia y exceso

Como el boro se trasloca con dificultad los síntomas visuales de la insuficiencia de boro se manifiestan en las hojas más jóvenes y en las puntas vegetativas de los brotes y raíces.

Las hojas pueden tornarse gruesas y quebradizas con manchas cloróticas; a veces tienen lugar un acortamiento de los entrenudos, lo que ocasiona la inserción de las hojas más jóvenes en forma de roseta. La degeneración de los tejidos meristemáticos es uno de los síntomas más frecuentes. Se presenta la muerte de la yema terminal y de los brotes nuevos. Esto ocurre con más frecuencia en las dicotiledóneas, pues las

monocotiledóneas presentan menos demanda de boro y los síntomas descritos aparecerían solamente con una insuficiencia muy aguda.

Después de una sequía prolongada y al inicio de las lluvias suelen aparecer brotes en las yemas laterales que pueden morir pronto o desarrollarse normalmente. Se reduce la floración y formación de semillas. Los frutos como los agrios son pequeños, con la corteza muy gruesas y goma en el albedo. Se inhibe el crecimiento de las raíces con una multiplicación normal de raíces laterales, las cuales permanecen cortas y se tornan pardas. En las raíces carnosas como rábanos y nabos aparece el centro oscuro e incluso el "corazón hueco". En los tubérculos pueden aparecer manchas pardas en la parte carnosa de los mismos.

La deficiencia de boro ocasiona considerables alteraciones en la disposición normal de los elementos del floema y xilema hasta perder por completo los tejidos su capacidad de conducción.

En los suelos con bajo contenido se intensifica la insuficiencia por aplicación de elevadas dosis de potasio. Altas dosis de nitrógeno aumentan la necesidad de boro. El encalado de suelos ligeros, puede producir la insuficiencia, si el boro no es abundante por los conocidos efectos del aumento del pH quizás por formación de metaboratos cálcicos, muy insolubles.

En un estudio realizado en Colombia en un suelo con textura franco-arenosa, se reporta que el anión borato es fácilmente lixiviable y el nivel de boro del suelo decreció, en la medida en que la precipitación aumentó, también a medida que aumentó el contenido de potasio (K) en el suelo, disminuyó el contenido de Boro (B), lo cual puede asociarse con la reiterada fertilización potásica que recibió este suelo, la cual provocó reducción en la absorción de boro. Este elemento resultó fundamental para una buena producción de plátano, tanto en calidad como en cantidad de fruta, lo cual se confirmó con la correlación entre peso del racimo y Boro, que fue de 1 (García y Bolaños, 2001).

Rojas (2001) al evaluar la disponibilidad de los micronutrientes en las condiciones de Chile, concluye que el B es el micronutriente más limitante por su amplia cobertura geográfica y diversidad de especies afectadas. Para su corrección ha sido eficiente con ulexita.

En Malasia se reporta que la aplicación de boro puede incrementar el rendimiento de la palma de aceite más de un 20%, mejorar la resistencia a plagas y enfermedades (Loo Chong et al., 2009).

El riego puede causar exceso de boro. Las aguas de riego con 2 mg. de boro por litro (2 p p m) son clasificadas como perjudiciales, aunque para muchos cultivos ya con 1 mg por litro no son convenientes; los agrios más susceptibles aún pueden dañarse con más de 0.75 mg. de B. L^{-1} . Si el agua de riego posee más de 0,5 mg. de B.L⁻¹ hay que ser cautelosos en su utilización.

En las zonas áridas ocurre el exceso con más frecuencia que en las lluviosas, donde sólo aparece por sobredosis de fertilizantes bóricos.

Los síntomas visuales del exceso aparecen en el ápice y bordes de las hojas más viejas; donde se acumula boro y se propaga al resto de la hoja. Esto se manifiesta empezando por hojas de la parte inferior de la planta hacia las del extremo superior. En algunas plantas los excesos se caracterizan por necrosis pardas internervales. El exceso de B ha provoca insuficiencia de Mo.

6.7.4. Corrección de la insuficiencia y exceso

Los dos métodos principales de aplicar microelementos consisten en la adición directa al suelo y la aplicación foliar. Los suelos del este de Canadá y particularmente los de la región atlántica son arenosos y muy lavados; consecuentemente ellos tienden a ser deficientes en B y Mo. En esas condiciones Gupta (1990) realizó una comparación del efecto que sobre la concentración de B en la planta, tenía el método de aplicación empleado. A igualdad de dosis de aplicación de Boro, la eficiencia de los métodos, evaluados a partir de la concentración de boro en las hojas se ordena como sigue: aplicación en bandas al suelo > aspersión foliar a los 4 meses de la siembra > aspersión foliar a los 6 meses de la siembra > aplicación a voleo al suelo (Cuadro 6.13).

Cuadro 6.13: Efecto de los métodos de aplicación de B sobre la concentración de B del tejido de la hoja de rutabaga (Guptá, 1990).

Método de aplicación de boro.	Dosis de aplicación en Kg.ha ⁻¹ .			
	O	1.1	2.2	4.4
	ppm de B en el tejido de la hoja.			
En banda al suelo	23	70	123	162
A voleo al suelo	25	39	52	75
Aspersión foliar 4 semanas después de la siembra	25	-	101	-
6 semanas después de la siembra.	25	-	75	-

Las aplicaciones de 10 a 15 Kg. de bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; 11, 3% de B) por hectárea suelen ser beneficiosos cuando se presenta la insuficiencia. El límite inferior del rango corresponde a dosis para suelos arenosos y el superior a arcillosos pesados; el efecto residual es para varios años. Es difícil aplicar esas pequeñas cantidades al suelo y lograr una distribución homogénea, por lo que se recomienda aplicarlas al suelo en solución correspondiente a 1000L de agua a temperatura ambiente o 200 L de agua caliente para disolver el bórax y luego llevar la solución a 500 L. Esta solución se aplica de tres a cuatro semanas antes de la siembra. A veces el bórax se mezcla cuidadosamente con arena ligeramente humedecida para evitar segregación. Esta mezcla permite una mejor distribución del abono.

También se aplica el boro mezclado con fertilizantes de macroelementos, como el superfosfato o el nitrato de amonio o con abonos complejos. Un contenido de 0.25 a 0.55% de boro en el fertilizante es común. Para arbustos y árboles son convenientes de 30 a 60 g de bórax por planta si la insuficiencia es aguda; preferiblemente al inicio de la época de lluvia. Como la diferencia entre suficiente suministro de boro y exceso es muy pequeña, puede resultar fácilmente una sobredosis. Las "fritas" son borosilicatos en forma de vidrios que liberan lentamente el boro, por lo que son muy apropiadas para cultivos muy susceptibles al exceso.

Cuando aparece la insuficiencia en cultivos en pie o el suelo muestra gran fijación de boro, son convenientes las aspersiones foliares de borax o de ácido bórico; este último es más soluble pero el borax es más barato. La toxicidad puede reducirse con

elevadas dosis de encalado y de nitrógeno. Las sobredosis de riego contribuyen a paliar el exceso.

6.8. Molibdeno

6.8.1. Molibdeno en el suelo

El molibdeno del suelo, proviene de la roca madre; si esta es ácida tiene más probabilidades de ser rica en molibdeno. Aunque el olivino es un mineral característico de rocas básicas es rico en este microelemento.

El molibdeno se presente en el suelo probablemente en forma de los óxidos Mo O_3 , $\text{Mo}_2 \text{O}_5$ y Mo O_2 ; otras formas inorgánicas son el sulfuro de molibdeno y el molibdato cálcico, de los cuales se libera por meteorización.

Además existe como los iones Mo O_4^{2-} y HMo O_4^- unidos de modo intercambiable a los coloides del suelo, así como libres en la solución del mismo.

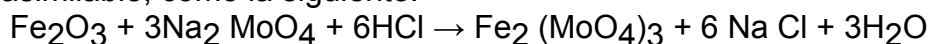
También existe molibdeno en la fracción orgánica del suelo; cuando este se mineraliza, lo libera.

6.8.2. El molibdeno en la planta

6.8.2.1. Disponibilidad para las plantas

La mayor parte del molibdeno del suelo se encuentra en forma no asimilable, ya que hasta el 90% del total puede estar formando parte de minerales poco solubles; aunque de ellos puede liberarse y hacerse asimilable lentamente.

A diferencia de los demás microelementos, el molibdeno se hace menos asimilable mientras más ácida la reacción del suelo, pues la adsorción de los iones Mo O_4^{2-} es tanto más fuerte cuanto más bajo el pH, ya que al menos en parte se fija a los coloides del suelo en forma similar a los iones fosfato en medio ácido. Esta unión, poco asimilable, es especialmente fuerte en los sesquióxidos de Fe y Al, sobre todo en los muy envejecidos y cristalizados. Al disminuir el pH aumentan las cargas inducidas positivas que retienen con gran fortaleza los aniones Mo O_4^{2-} y H Mo O_4^- . Es posible que el molibdeno adsorbido a los coloides del Fe y Al se polimerice dando lugar al $\text{Mo}_7 \text{O}_{24}^{6-}$, el cual por tener mayor carga se retiene más fuertemente. Se han sugerido otras reacciones entre el Mo y los óxidos de Fe que lo harían poco asimilable, como la siguiente:



El aumento del pH aumenta la disponibilidad del molibdeno para las plantas al parecer debido a una sustitución de los iones Mo O_4^{2-} retenidos por el complejo de cambio del suelo por los iones OH^- , las que aumentan su actividad al hacerse mas alcalino el medio. También los iones fosfato tienen importancia práctica en la sustitución de los iones molibdatos.

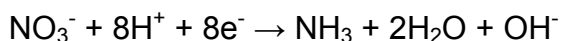
A diferencia de otros microelementos como el hierro y el manganeso, cuyas formas más móviles y por tanto más asimilables son las reducidas, los compuestos de molibdeno formados bajo condiciones reductoras (de Mo IV y V) son difícilmente solubles; contrariamente a los compuestos oxidados (de Mo VI); por eso la

compactación del suelo, con la consiguiente mala aireación, puede inducir insuficiencias de Mo por favorecer las formas reducidas, poco solubles (Bergman y Neubert, 1976).

Aún en suelos ácidos las plantas pueden tomar suficiente molibdeno si hay una fuerte mineralización de la materia orgánica, con la consiguiente liberación del elemento. Los suelos con un pH neutro o alcalino como los calcáreos o los encalados, si permiten un fácil drenaje, pueden empobrecerse en molibdeno, ya que el pH favorece la solubilización y por lo tanto la movilidad del molibdeno existente. Si estos suelos son ricos en materia orgánica, como sucede en muchos calcáreos no erosionados, la mineralización de la misma constituye una buena fuente de Mo, lo cual contrarresta las pérdidas por lavado. Las aplicaciones durante años de elevadas dosis de sulfato amónico pueden inducir la insuficiencia de molibdeno.

6.8.2.2. Absorción de molibdeno por las plantas. Funciones

El molibdeno es tomado por la planta como MoO_4^{2-} . La planta necesita pequeñísimas cantidades de este microelemento; 0,5 mg de Mo por kilogramo de materia seca generalmente es suficiente y como máximo menos de 1 mg.Kg⁻¹ de materia seca; a menos que existan altos contenidos de elementos antagónicos como manganeso, entonces se necesita una mayor concentración de molibdeno. Los iones del suelo inhiben la absorción de molibdeno, mientras que los iones fosfato la estimulan. En la capacidad que tiene el molibdeno de cambiar de valencia (de MoIV a MoV) estriba su importancia fisiológica en la planta. La demanda de la planta respecto al molibdeno es mayor si la nutrición es nítrica (a base de NO_3^-) que si es amónica (a base de NH_4^+ o urea). Esto se debe a que los iones NO_3^- necesitan ser reducidos a la forma amoniacal para que el nitrógeno sea incorporado a compuestos orgánicos y es precisamente la nitratorreductasa, que contiene molibdeno, la que reduce los iones NO_3^- a NO_2^- primer paso en la reducción necesaria. En esa reacción el Mo V pasa a Mo VI por cesión de un electrón al ión NO_3^- que por ello se transforma en NO_2^- . Si la planta tiene insuficiencia de Mo acumula NO_3^- , lo cual es perjudicial a hombres y animales que consuman el producto agrícola, además de la inhibición en la formación de proteína. La reacción que integra las dos reacciones de reducción del nitrato, tanto en plantas superiores como en las inferiores, es la siguiente:



La enzima hidrogenasa, la cual contiene Mo, es esencial para la fijación de N_2 atmosférico por bacterias tanto de vida libre, por ej.: azotobácter, como nodulantes, por ej: Rhizobium.

El Mo activa otras enzimas como la catalasa, peroxidasa y aldehidroxidasa e inhibe la acción de la citocromoxidasa. La síntesis de ácido ascórbico y nicotínico está influida por el molibdeno. Este elemento influye positivamente la formación de clorofila, al parecer, por su papel en la formación de aminoácidos. Favorece la incorporación de fosfatos inorgánicos a compuestos orgánicos. Su insuficiencia provoca daños en los tejidos meristemáticos, pues influye en la formación de la lámina media de la célula.

6.8.3. Insuficiencia y Exceso

Ya que la insuficiencia de molibdeno ocurre sobre todo en suelos ácidos a los síntomas visuales con frecuencia se superponen los síntomas de excesos tóxicos de otros elementos (Mn, Al, B, etc.) o se enmascaran por estos; en otros casos esto ocurre con relación a insuficiencias propias de estos suelos (P, Mg). Las monocotiledóneas, como: caña de azúcar, sorgo, maíz y arroz, no son tan susceptibles a la insuficiencia de Mo, como las dicotiledóneas, principalmente las leguminosas y crucíferas (Pagel et al., 1982). Las primeras tienen una capacidad, mayor para apropiarse del Mo del suelo.

Según Bergmann y Neubert (1976) se consideran plantas indicadoras de la insuficiencia de molibdeno a la coliflor, otras coles, la lechuga, espinacas, tomate, remolacha y cítricos; mientras que la alfalfa, colza, soya, frijoles, guisantes, zanahoria y el apio reaccionan con susceptibilidad algo menor. Los síntomas visuales del molibdeno no son fáciles de identificar: Unas veces son semejantes a los producidos por insuficiencia de nitrógeno, otras no, son específicas. También se han descrito síntomas asociados a la insuficiencia que van desde clorosis hasta deformaciones en los órganos y necrosis. En las especies hortícolas es común que los síntomas de la insuficiencia incluyan moteado internerval de las hojas con áreas cloróticas que finalmente adquieren un chamuscado marginal, además de retorcimiento y enroscamiento de las hojas más jóvenes. Como la falta de Mo inhibe la reducción de los NO_3^- absorbidos por la planta por insuficiencia de molibdorreductasa, a veces los síntomas de la insuficiencia corresponden a los de la carencia de nitrógeno; asimismo, pueden presentarse estos síntomas en las leguminosas a causa del papel que el Mo desempeña en la fijación simbiótica del nitrógeno; en ambos casos, de hecho, hay una insuficiencia de nitrógeno causada por la de molibdeno.

En los cítricos los síntomas son diferentes, al contrario de lo que ocurre con otros microelementos, no aparecen en hojas inmaduras. A los tres o cuatro meses de edad las hojas comienzan a mostrar manchas irregulares de color verde pálido, apenas visible, que con el tiempo se tornan pardo-rojizas, con halos amarillos o anaranjados. Los rangos de abastecimiento de las hojas según Asufrar (2004) atendiendo a los contenidos de las hojas, varían entre los diferentes cultivos (Cuadro 6.14).

Cuadro 6.14: Niveles foliares del Mo (mg/Kg) en hojas de distintos cultivos (Asufrar, 2004).

Cultivo	Muy bajo	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Cítricos	<0.05	0.05-0.1	0.1-3	3-100	>100
Clavel	<0.3	0.3-1	1-3	3-5	
Limonero	<0.05	0.05-0.09	0.1-0.29	0.30-0.4	>0.4
Naranja	<0.06	0.06-0.1	0.1-3	3-100	>100

Las plantas suelen ser muy tolerantes a altos contenidos de molibdeno, por lo que su toxicidad es rara, más común es la toxicidad en el ganado por alteraciones de Mo en el forraje, sin que la planta muestre síntomas de exceso; generalmente cuando hay más de 20 mg de Mo. Kg⁻¹ de materia seca. Si la concentración del Cu es baja, puede ocurrir la toxicidad con menores contenidos de Mo. La toxicidad de Mo en el ganado puede paliarse con suministro extra de cobre.

6.8.4. Corrección de la insuficiencia y exceso

Como abonado al suelo se puede utilizar el (NH₄)₂Mo O₄ (54,4% de Mo) ó Na₂ M O₄ (39, 6% de Mo), a razón de 0,5 a 2,0 Kg. de Mo por hectárea o aún en dosis menores si se trata de suelos ligeros, disueltos en 500 a 1000L de agua y se asperja al suelo antes de la siembra, lo cual basta para tres o cuatro años. Para pastizales se recomiendan de 200 a 250 g de Mo como molibdato de sodio por ha. En algunos países se utiliza el superfosfato molibdenizado con 0.2% del elemento, como aspersión foliar se utiliza el molibdato de amonio a concentraciones de 0,1 a 0,2% de Mo en un estadio temprano de desarrollo de la planta. También se ha recomendado el Na Mo O₄ a razón de 800g.ha⁻¹, en solución al 0.1%. Para los cítricos se recomiendan concentraciones menores: 300 a 100 g de NH₄ Mo O₄ en 400 L de agua.

En un estudio realizado por Gupta (1990) con diferentes cultivos. La aspersión foliar de Mo (I) resultó más efectiva que la aplicación a voleo al suelo (II). (Cuadro 6.15).

Cuadro 6.15: Métodos y dosis de aplicación para diferentes cultivo (Gupta, 1990).

Métodos y dosis de aplicación	Red Clover		Alfalfa		Timothy	
	Corte		Corte		Corte	
	I	II	I	II	I	II
Sin Mo	0.6	0.5	0.7	0.6	0.5	0.5
500g Mo.ha ⁻¹ al suelo	9.9	3.2	14.4	2.9	6.2	2.4
500 g Mo.ha ⁻¹ foliar.	14.6	6.3	16.6	3.4	8.4	3.4

Se han obtenido buenos resultados mojando las semillas con solución de molibdato sódico. Como abonos los más utilizados (Asufrar, 2004)) aparecen en el Cuadro 6.16

Cuadro 6.16: Abonos utilizados para corregir la insuficiencia de molibdeno (Asufrar, 2004).

Abono	Fórmula	% Mo
Molibdato de sodio	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	40
Heptamolibdato amónico	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	54
Trióxido de molibdeno	MoO ₃	66
Molibdato de calcio	CaMoO ₄	48
Sulfuro de molibdeno	MoS ₂	60

Las dosis a aplicar son de 0,5 kg/ha de **Mo** para deficiencias ligeras y de 1 kg/ha de **Mo** en el caso de deficiencias importantes. En caso de abonar en sitios de alta fijación se puede duplicar la dosis (2 kg Mo/ha).

6.9. Metales pesados

Se considera metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 g/cm³ cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados. Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

- Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades, (trazas por plantas y animales), estos han sido estudiados en los epígrafes anteriores. Son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos.
- Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva apareja disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, entre otros: Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl.

El movimiento de metales pesados al interior del suelo ocurre principalmente en la fase líquida, ya sea en forma catiónica o en forma de complejos solubles, por lo cual la intensidad de su movilización estará controlada por la distribución del metal entre la fase sólida y la solución del suelo. Las formas en que se produce el traslado de los metales son por difusión, flujo de masas y por movimiento del metal unido a partículas a través de canales, fisuras o macroporos. La difusión es importante para el traslado a cortas distancias y el flujo se produce generalmente en dirección hacia la zona de raíces de los cultivos. El flujo de masas juega un papel más importante para el desplazamiento de los metales a grandes distancias (Vázquez et al., 2001)

En un estudio realizado en Brasil con el objetivo de caracterizar una gran variedad de suelos, en condiciones naturales, en cuanto a los tenores totales de metales pesados (Cu, Zn, Fe, Mn, Cd, Cr, Ni), se encontró que las concentraciones medias de los metales estudiados fueron inferiores a los encontrados en la literatura internacional, excepto el Cd, e inferiores a los valores considerados tóxicos para las plantas, inclusive para el Cd (Fadigas et al., 2001).

En un estudio realizado en suelos de la cuenca del lago de Valencia (Venezuela) por Ruiz y Paolini (2001) sobre la actividad de la deshidrogenasa como un método para estimar la actividad microbiológica potencial del suelo, reportaron menor valor de la actividad de esta enzima en terrenos cultivados con caña de azúcar regados con aguas residuales industriales y domésticas en comparación con suelos regados con aguas subterráneas o del lago. Ello se atribuyó a la presencia de contaminantes y metales pesados en dichas aguas residuales. Cualquier normativa o recomendación de la salud del hombre, se deben tener tres factores esenciales en la cadena suelo – planta – hombre, estos son:

- Absorción del elemento en el suelo (grado de disponibilidad)
- Fitotoxicidad
- Riesgo en la cadena alimentaria (bioacumulación)

Basándose en estos factores, Chaney (1980) formo cuatro grupos de metales y metaloides según biodisponibilidad y riesgo potencial. (Cuadro 6.17)

Cuadro 6.17. Grupos de metales y metaloides según biodisponibilidad y riesgo para la cadena alimentaria (Chaney, 1980)

Metal	Adsorción en el suelo	Fitotoxicidad	Riesgo para la cadena alimentaría
1.Ag, Cr, Sn, Ti, Y y Zr	Baja solubilidad fuerte retención en suelo	Baja	Bajo riesgo, porque ellos son tomados en menor grado por las plantas
2.As, Hg y Pb	Adsorbidos fuertemente por los coloides del suelo	Las plantas pueden absorberlos pero no trastocarlos a los tallos, son tóxicos a concentraciones muy altas	Causan mínimos riesgos para la cadena alimentaría humana
3.B, Cu, Mn, Mo, Ni y Zn	Menos fuertemente adsorbido al suelo comparado con los grupos 1 y 2	Fácilmente tomados por las plantas, son fitotóxicos a concentraciones que causan bajo riesgo a la salud humana	Conceptualmente la barrera "suelo-planta" protege a la cadena alimentaría de estos elementos
4.Cd, Co y Se	Menor grado adsorción al suelo en relación a los otros metales	Causan riesgo en la salud humana o animal a concentraciones en el tejido de la planta que generalmente no son fitotóxicas	Existe bioacumulación a través de la cadena alimentaría suelo-planta-animal

6.10.Diagnóstico de la insuficiencia y exceso

Los microelementos resultan esenciales para las plantas, por ello interesa evitar su insuficiencia mediante el empleo de adecuadas prácticas, también es necesario evitar sus excesos , en tanto que, el resto de los metales pesados por no ser esenciales para la vida ,solo son de interés desde el punto de vista de evitar sus excesos,por ello se deben emplear métodos que permitan el diagnóstico del estado nutricional de las plantas y que consideren la cadena alimentaria<suelo-planta-animal>y finalmente al hombre.La asimilabilidad de estos elementos para las plantas esta influenciada por numerosos factores, los cuales han sido mencionados anteriormente.Estos,deben tomarse en consideración para establecer un adecuado diagnóstico, lo cual por su complejidad y amplitud no será posible abarcar casuísticamente en esta oportunidad, no obstante se ilustrara con ejemplos.

La solubilidad del hierro en el suelo depende del pH,potencial redox,grado de cristalización de los óxidos de hierro,contenido de materia orgánica y solubilidad del hierro en la rizósfera, lo que hace poco representativa la determinacion del contenido de hierro del suelo respecto a la nutrición de la planta(Chapman,1966);además, aún cuando se determine la cantidad exacta de

hierro ferroso(Fe^{2+}) del suelo que es la forma asimilable para la planta, su efecto dependera de la concentración de otras sustancias, del manganeso, silicio, fósforo, variedad de arroz y el tiempo (Ponnaperuma, 1964).

Arzola y Vilma Contreras (2011) reportan de correlaciones lineales establecidas entre el contenido de hierro y diferentes características del suelo, una mayor disponibilidad del hierro al disminuir el pH ($r=0,38^{**}$) y aumentar el contenido de materia orgánica del suelo ($r=0,44^{**}$).

Los valores límites de toxicidad por hierro en arroz varían ampliamente con las condiciones del medio: 100 ppm (Ishizuka y Tanaka, 1961), 50 ppm (Tanaka Navasero, 1966), 100 ppm a pH 3.7, pero 500 ppm a pH mayor (Tanaka y Tadano, 1970), 5 ppm si existe insuficiencia de manganeso (Ponnamperuma e Ikeashi, 1979). Estos últimos autores resumen que el valor límite de toxicidad por hierro puede variar entre 50 y 1700 ppm. A pesar de esas dificultades, Arzola (1982) encontró una mejor predictibilidad de la toxicidad por hierro en arroz a partir de la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ del suelo (extracción con acetato de amonio a pH 3 y 7, Jackson, 1962), alcanzando el suelo donde se presentó toxicidad una relación de 3.4 y en la planta un contenido de 770 ppm de Fe. Las dificultades encontradas para diagnosticar el estado nutricional de un cultivo en lo referente a metales pesados, explica la gran cantidad de métodos de extracción de los mismos utilizadas en los análisis de suelos (Cottenie et al., 1982).

Bibliografía Consultada

Arzola, N.: Untersuchungen über Wachstumsstörungen von Reis auf einer Boden in Anbaugebiet Majagua, Kuba. Diss z Promotion A K-M-Universität, Leipzig, 1980.

Arzola, N.: Estudio de las afectaciones del rendimiento del arroz en un área nombrada Majagua. Parte II: Comparación del suelo problema con dos suelos normales. Centro Agrícola 9(3) (1982): 23-35pp.

Arzola, N.; Vilma Contreras: Elementos secundarios y microelementos en áreas agrícolas de Ecudos, S.A. Evaluación del estado nutricional de las plantaciones cañeras en el ingenio Ecudos S.A. La Troncal. Memorias de trabajos del curso de postgrado "Manejo Agroecológico de Suelos, Fertilizantes y Enmiendas. Ecuador, 2010 (CD con ponencias).

Arzola, N.; Vilma Contreras: Micro elementos en áreas agrícolas del ingenio ECUDOS S.A de Ecuador. Diversificación 2011. Memorias del evento. Barquisimeto, Venezuela, 2011.

ASUFRAR®: Minerales del recreo s.a. Chile, 2004

Bergmann, W. y Neubert, P.: Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. Gustav Fischer Verlag, Jena, 1976: 475pp.

Chaney, R.L.: Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. In: Bitton, G.; Damro, D.L.; Davidson, G.T., J.M. (eds) Sludge-Health risks of land application. Ann Arbor Sci 1980: 58-83pp.

Chapman, H.D.: Diagnostic criteria for plants and soils. University of California. Division of Agricultural Science. California, 1966.

Cottenie, A.; Verloo, M.; Velghe, G.; Kiekens, L.: Biological and analytical aspects of soil pollution. State Univ. Shent, 1982.

Fadigas, F.; do Amaral Sobrinho, N.; Mazur, N.; Cunha dos Anjos, L.H.; Freixo, A.: Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Fernández, D.; Soto, B.; Arias, M.; López, E.; García.: Contenido y formas de cobre en suelos de viñedo. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

García, A. y Bolaños.: Dinámica del boro en un suelo cultivado con plátano (*Musa aab simmonds*). XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Gupta, U.C.: Efficiency of foliar vs. soil applied micronutrient anions for crop utilization. 13th International Congress of Soil Science. Commission IV. Kyoto, Vol. IV, 1990: 238-242pp.

Ishizuka, Y.; Tanaka, A.: Inorganic nutrition of the rice plant. VI Effect of iron, manganese and copper levels in culture solution of yields and chemical compositions of the plant. Journal Sci. Soil Manure. Japan 32(1961):97-100pp.

Jackson, M.L.: Soil chemical analyses. Englewood Cliffs, 1962.

Lindsay, W.L. y Schwab, A.P.: The chemistry of iron and its availability to plants. Journal of Plant Nutrition, 5(1982): 821-84pp.

Loo Chong P.; Li Gob, T.; Wagner, G.: Borates in micronutrient fertilizers for sustainable palm oil production. Proceedings of Agriculture, biotechnology 8 sustainability Conference. Volume 2. Malaysian Palm Oil Board. PIPOC, 2009: 582-585 pp.

Mengel K.: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag. Jena, 1972, 384 pp.

Mengel, K.; Kirkby, E.A.: Principles of plant nutrition. Int. Potash Institute. Berna, 1987: 265 pp.

Merkle, F.G.: Procesos de reducción en los suelos. En: Chemistry of the soil, edit. por F. G. Bear. Oxford and I B H publishing Co. Calcuta, 1965.

Pagel, H.; Enzmann, J.; Mutscher, H.: Pflanzennährstoffe in tropischen Boden ihre Bestimmung und Bewertung. Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlín, 1982, 306pp..

Ponnamperuma, F.N.: Review of the symposium on the mineral nutrition of the rice plant. In: the mineral nutrition of the rice plant. The International Rice Research Institute. Johns Hopkins Press. Baltimore, 1964: 464-482pp.

Ponnamperuma, F.N.; Ikeashi, H.: Adverse soil tolerance. Annual Programm Review IRRI. 1979.

Rahimi, A.: Kupfermangel-symptome und ihre Entwicklung bei hoheren Pflanzen. T V Berlin Diss, 1972.

Rojas, C.: Diagnóstico y evaluación agronómica de micronutrientes en Chile. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba, 2001.

Ruiz, M y Paolini, J.: Actividad de la deshidrogenasa en suelos de la cuenca del lago de Valencia (Venezuela). XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba. 2001.

Sanzo, F.H.: Dosis, momento de aplicación, efecto del pH, interacción con el fósforo y el hierro y residualidad del zinc en el cultivo del arroz. Tesis para optar por el grado de Dr. En Ciencias Agrícolas. UCLV. 1990.

Tanaka, A.; Navasero, S.A.: Interaction between iron and manganese in the rice plant. Soil Sci. And Plant Nutr. 12(1966): 29-33pp.

Tanaka, A.; Tadano, T.: Studies on the iron nutrition of the rice plant. Part 2: Iron excluding capacity of the rice roots. Soil Sci. and Plant Nutr. 16(1970): 185-189pp.

Tanaka, A.; Tadano, T.: Potassium in relation to iron toxicity for the rice plant. Potash Review. 9/21 (1972) 1-12pp.

Mortvedt, J.J.; Giordano, P.M.; Lindsay, W.L.: Micronutrientes en agricultura. Agt Editor S.A. Primera edición en español, 1983: 742 pág.

Nishizawa, N. K.; Shojima, S.; Moris, S.: The ultrastructural studies on mugineic Acid secretion by barley roots under the Fe deficient stress. 13th International Congress of Soil Science. Comisión IV. Kyoto, Vol. VI, 1990: 238-242pp.

Vázquez, A.; Corlay, L.; Álvarez, E.: Tierra de levadura y lixiviado de cadmio, plomo y níquel. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba. 2001.

“Cuando los suelos neutros se acidifican o los suelos ácidos se neutralizan, muchos factores del suelo cambian simultáneamente. Algunos de estos cambios pueden no tener un efecto significativo sobre las plantas y otros pueden ser críticos. Factores que son críticos en un suelo pueden no tener un efecto significativo en otros debido a diferencias entre los suelos concernientes”.

C. A. Black

CAPITULO 7.LA REACCION DEL SUELO Y SU CORRECCION

7.1. El rango de pH de los suelos

Según Universidad de Extremadura (2006) cuando el pH es excesivamente bajo, comprendido entre 2 y 4, la solución y oxidación de sulfuros metálicos, como la pirita, provoca aumentos o disminuciones de pH. Cuando la perturbación es provocada por un incremento de la acidez, se produce la disolución de los sulfuros y el anión genera sulfuro de hidrógeno que escapa a la atmosfera y elimina el exceso de protones. Por el contrario, cuando el medio se comporte como oxidante, parte de los sulfuros se oxidan a sulfatos que generan un ácido más fuerte y capaz de neutralizar la alcalinidad creada (Cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Propiedades de los suelos asociadas al pH y la capacidad amortiguadora de los suelos (Universidad de Extremadura, 2006).

Solución y oxidación de pirita y otros sulfuros	pH 2-4
Compuestos alumínicos	pH 4-5.5
Complejo de cambio	pH 5.5-6.8
Materia orgánica y minerales	pH 6.8-7.2
Carbonatos de Ca y Mg	pH 7.2-8.5
Sodio de cambio y carbonato sódico sólido	pH 8.5-10.5

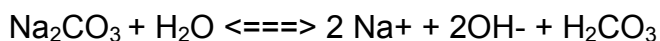
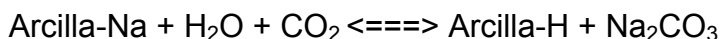
Si el pH del suelo se sitúa entre 4.5 y 5, son los compuestos alumínicos los responsables del mantenimiento de su valor. El ión aluminio trivalente, a medida que incrementa la concentración de hidroxilos, va generando iones con diferentes estados de hidratación y carga, hasta formar el hidróxido alumínico muy poco soluble, que en su forma cristalina es la gibsita. Así cuando existe un aporte externo de hidrogeniones o de hidroxiliones, el ión existente en ese momento, cede o capta hidroxilos para pasar a una forma más anhidra o más hidratada con mayor o menor carga positiva. De modo que el suelo puede amortiguar ese exceso de acidez o basicidad mientras exista gibsita o ión aluminio trivalente, respectivamente.

Para valores de pH comprendidos entre 5.5 y 6.8, el complejo de cambio presenta un grado de saturación muy variable y es la zona en la que la correlación entre ambos valores es mínima. De este modo las agresiones básicas o ácidas se corrigen mediante el paso de bases del complejo a la solución o viceversa. En esta zona, la capacidad tampón (CT) del suelo depende fuertemente de la capacidad de intercambio catiónico. También resulta decisiva la intervención de las cargas variables,

sobre todo en los márgenes ácidos, porque cuando el pH tiende a bajar en exceso, parte de las cargas variables negativas se van haciendo positivas, lo que favorece la liberación de bases y la captación de aniones con liberación de hidroxilos, que consiguen restablecer el equilibrio.

Mientras mayor es la CT de un suelo mayor es la necesidad de base o ácido para variar el valor de pH. La CT no es igual entre los distintos tipos de suelos e incluso dentro del mismo tipo de suelo (Suárez y Márquez, 1992). Dentro de las razones que se han establecido para la variación de la CT están el material parental, el contenido y tipo de arcilla, el contenido de materia orgánica (MO) y la presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Fassbender, 1987). La CT se relaciona con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo (Halvin et al., 1999). Suelos arcillosos y ricos en MO, con una alta CIC, tienen mayor CT, necesitando gran cantidad de CaCO_3 para neutralizar la acidez (Halvin et al., 1999; Brady y Weil, 1999). En cambio, suelos arenosos que poseen una baja CIC, tienen baja CT, y cuando son ácidos requieren pequeñas adiciones de CaCO_3 para neutralizar su acidez (Honorato, 2000).

En los medios muy cercanos a la neutralidad, intervienen los procesos de transformación de la materia orgánica, que generan acidez o la atenúan cuando se produce su polimerización, junto a la alteración mineral, que libera bases. Cuando la conductividad eléctrica supera el valor de 8 dS/m, la mayor parte de las plantas se ve afectada, pero su grado será máximo si abunda el sodio en la solución, lo que se traduce por un valor del pH superior a 8.5, que es el máximo generado por la presencia de carbonato cálcico. Esto hace que también se considere al suelo como salino cuando se dan las circunstancias apuntadas. Las arcillas saturadas en Na tienen propiedades particulares, en presencia de agua de lluvia por tanto con CO_2 disuelto, se hidrolizan, liberando Na^+ y OH^- según la siguiente ecuación:



Como consecuencia el medio se alcaliniza rápidamente, alcanzándose valores de pH progresivamente cada vez más altos; 9, 10 o incluso más.

Algunos suelos presentan acumulaciones de carbonato de calcio en algunas partes del perfil y el contenido de calcio y de magnesio puede llegar hasta el 60 o 70% de la masa del suelo. El pH alcalino de muchos suelos calcáreos, el cual puede llegar hasta 8.5, reduce la asimilabilidad de nutrientes, tales como el fósforo y los microelementos, especialmente el hierro, donde además del efecto del pH, el ión bicarbonato se opone tanto a su absorción como a la utilización del ya absorbido por el vegetal, ocurriendo la clorosis férrica común en frutales como los agrios cuando se desarrollan en tales suelos (Arzola et al., 1981).

7.2. Enmiendas calcáreas en suelos ácidos del trópico

El encalado se puede definir como la aplicación en los suelos ácidos de materiales que posean dos requisitos: 1.- disminuir la acidez de estos y 2.- aportar Ca ó Ca y Mg. De acuerdo a esa definición muchos compuestos que aumentan el pH como por ejemplo los hidróxidos de sodio y de potasio no son materiales encalantes por no

reunir el segundo requisito, mientras que otros como por ejemplo los sulfatos de calcio y de magnesio tampoco lo son por no reunir el primero.

Como materiales encalantes se pueden mencionar los óxidos, hidróxidos y carbonatos de calcio ó calcio y magnesio pues solamente ellos reúnen los dos requisitos inicialmente considerados.

En la zona templada se ha establecido la práctica de aplicar una dosis de cal suficiente como para que los suelos alcancen su neutralidad, lo cual ha derivado de resultados obtenidos con cultivos muy exigentes al calcio como la alfalfa y el trébol.

Myers (1994) reporta que el 60% de los suelos ácidos del mundo se presentan en las regiones tropicales húmedas. En los trópicos húmedos las condiciones climáticas han originado una mayor acidificación de los suelos, por eso los cultivos se han adaptado o han sobrevivido por selección natural los más resistentes a tales condiciones. Probablemente por ello, con demasiada frecuencia en la mayoría de los suelos altamente meteorizados de los trópicos el encalado hasta pH 7 origina más daño que bien, resultando tal práctica en un sobreencalado (Sánchez, 1981).

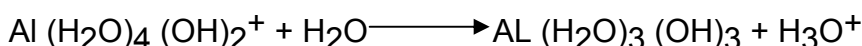
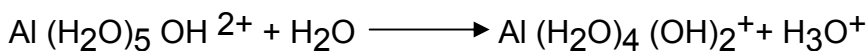
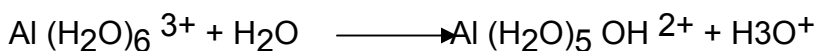
7.2.1. Efectos del encalado

En suelos ácidos del trópico, se han obtenido con el encalado, efectos sobre el rendimiento de los cultivos, tanto positivos como negativos o nulos (Martini, 1968; Kamprath, 1967), lo que se explica por las múltiples modificaciones que se originan en las características del suelo con el empleo de esta práctica agrícola. En unas ocasiones, con el encalado se han favorecido propiedades del suelo y en otras se han perjudicado.

7.2.2. Causas de la infertilidad de los suelos ácidos

Según Porta Casanellas et al. (1999) los efectos perjudiciales de la acidez del suelo no se manifiestan hasta valores de pH inferiores 5,5 por la toxicidad de aluminio y la poca disponibilidad de los elementos nutrientes.

La acidez del suelo se clasifica en actual o activa (solución del suelo) y potencial que es aquella que se encuentra intercambiable en el complejo de cambio del suelo y que es de mucha mayor cuantía que la actual. A través del pH se expresa la acidez actual que no es más que el logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógeno presentes en la solución del suelo, mientras que la acidez potencial comprende los iones hidrógeno y aluminio cambiables, siendo estos últimos causa de acidez como se comprende a partir de las ecuaciones siguientes:



El aluminio se opone, como puede apreciarse al aumento de pH del suelo, pues genera iones hidrónio (H^+) siempre que el suelo presente un pH inferior a 5.5.

El crecimiento deficiente de un cultivo en un suelo ácido no puede atribuirse solamente al pH, excepto a valores inferiores a 4.2, donde la concentración de H^+ puede detener y hasta invertir la absorción de cationes por la raíz (Black, 1968)

a) *Toxicidad por aluminio*

Las causas más frecuentes de infertilidad de los suelos ácidos son indirectos y generalmente pueden atribuirse a uno o más de los factores siguientes: toxicidad por aluminio, manganeso o hierro y deficiencias de calcio o magnesio.

El porcentaje de saturación por aluminio, calculado por la siguiente fórmula, aumenta con la acidificación del suelo y se relaciona con la producción de los cultivos.

$$\% \text{ de Al} = \frac{\text{Al} \times 100}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Al}} \quad (\text{cationes en cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1})$$

La toxicidad por aluminio afecta el rendimiento de los cultivos, por ocasionar bajos contenidos de calcio y magnesio, afectar el desarrollo radical, y la absorción de agua y nutrientes por la planta, este se acumula en las raíces, impidiendo la absorción y el traslado del calcio y fósforo en la planta, apareciendo por ello insuficiencia de estos nutrientes en los suelos con un alto porcentaje de saturación con aluminio y requiriéndose del encalado para eliminar la toxicidad (Essington, 2004; Matus, 2007).

En Colombia se reporta en la palma de aceite que por cada unidad de incremento de aluminio en $\text{cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$, se reducía 0.1 cm. de raíz por cm^3 de suelo, mientras era mayor la incidencia a enfermarse con la Pudrición del Cogollo (Cristancho et al., 2007a y Cristancho et al., 2007b).

En plantas sensibles al exceso de aluminio y manganeso en la solución del suelo, al aumentar el contenido de aluminio disminuye el peso por planta, el área foliar y el contenido de calcio, magnesio y fósforo en los tejidos, a la vez que aumenta el de aluminio, manganeso y hierro (Porta Casanellas et al., 1999).

En particular en los suelos ácidos, con elevados niveles de aluminio tóxico se afecta la absorción de fósforo por los cultivos, por ello, con la finalidad de conocer si los hongos micorrízico arbusculares son capaces de mejorar la absorción de P por el maíz, así como la producción de materia seca en presencia de una fuente de fósforo de baja solubilidad, se realizó un experimento en Venezuela, en condiciones controladas, donde se utilizó un suelo Plinthic Paleustult, ácido, bajo en P, y cuatro líneas de maíz, tres tolerantes a toxicidad por aluminio y una adaptada a suelos calcáreos. Los resultados demostraron que el hongo *Gm* fue más eficiente que los nativos, para la producción de materia seca y absorción de P, en condiciones de suelos ácido con baja disponibilidad de P, y sugieren que el implemento del uso de la roca fosfórica en la producción agrícola de maíces tolerantes y no tolerantes a toxicidad por aluminio puede ser favorecida por la aplicación de hongos micorrízico arbusculares (Mendoza y Ramírez, 2001).

Según Bertsh (1995) los efectos depresivos sobre el rendimiento con el incremento de saturación con aluminio del suelo son diferentes para los distintos cultivos (Cuadro 7.2).

Cuadro 7.2.Tolerancia a la saturación por aluminio de los diferentes cultivos (Bertsh, 1995)

CULTIVO	% de saturación por Al tolerado		
	Alto(>40)	Medio(20-40)	Bajo(< 20)
<i>Gramíneas</i>			
Arroz	X	X	
Maíz		X	
Sorgo			X
Trigo			X
<i>Leguminosas</i>			
Soya		X	X
Fríjol negro			X
Fríjol blanco			X
Caupi	X		
Gandul			X
<i>Hortalizas</i>			
Camote		X	
Papa		X	
Yuca	X		
<i>Frutas</i>			
Banano		X	
Marañón	X		
Mango		X	
Cítricos		X	
Piña	X		
<i>Forestales</i>			
Eucalipto		X	
Pino		X	
Pimiento		X	
Cacao	X		
Caña de azúcar		X	
Café		X	

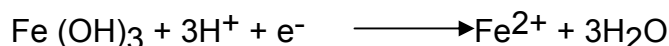
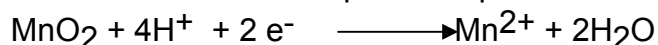
La tolerancia de las especies a la toxicidad del Al ha sido asociada a diferentes mecanismos tales como: cambios en el pH de la solución alrededor de las raíces, el cual, al incrementarse, sería capaz de controlar la absorción de un exceso de Al; cambios en las características de desarrollo de las raíces ; diferente capacidad de absorción y transporte de nutrimentos y de Al , cambios bioquímicos de los metabolitos ; desintoxicación dentro de la propia célula , así como cambios en la capacidad de intercambio catiónico de la raíz (CIC).Se ha señalado que la CIC de la raíz es un factor de control de la absorción de Al, hay evidencias que indican que existe una asociación entre la sensibilidad al Al y los valores altos de CIC, como producto de una mayor atracción del Al por las raíces, lo cual podría originar una mayor absorción de cationes que aniones.

La CIC ha sido correlacionada con la absorción de cationes polivalentes.En una comparación entre diferentes variedades de sorgo en que se evaluó la CIC de las

raíces (CICR) y su relación con el crecimiento de las mismas, al variar la concentración de aluminio del suelo se encontró que a mayor CICR y concentración de aluminio en el medio, era menor el crecimiento radical (Ramírez et al., 1986).

c) Toxicidad por Manganeso o Hierro

Estos nutrientes son utilizados por las plantas en su forma reducida (Mn^{2+} y Fe^{2+}) interviniendo en ese proceso de reducción el ión hidrógeno por lo cual una elevada concentración de estos nutrientes hasta alcanzar niveles tóxicos puede presentarse en suelos ácidos como se comprende a partir de las reacciones siguientes:



Esto puede ser perjudicial en suelos ácidos pobremente aireados, por ello al cultivarse arroz bajo aniego se han reportado diferentes enfermedades fisiológicas provocadas por toxicidad de hierro y manganeso, ácido sulfhídrico y compuestos orgánicos. La presencia de hierro y manganeso asimilables depende del pH y del potencial redox del suelo (Paterson et al., 1991).

La aplicación de abonos orgánicos origina la reducción del hierro y el manganeso, pues cuando la materia orgánica es aplicada al suelo sufre un proceso de oxidación, lo que implica reducción de microelementos como hierro y manganeso. Como en la secuencia de reducción de los elementos en el suelo el manganeso se reduce primero que el hierro, con la aplicación de abonos orgánicos disminuye la relación Fe: Mn (Cuadro 7.3).

Cuadro 7.3. Efecto de la aplicación de residuos del despulpe del café sobre el contenido de Fe y Mn en plantas de col en un suelo Ferralítico ácido (Arzola, 2006).

Tratamientos	Fe(ppm)	Mn(ppm)	Relación Fe:Mn
Sin nada	650	446	1.46
Con pulpa de café	1420	3120	0.46

De los resultados anteriores se puede inducir que podría ser más frecuente la toxicidad por manganeso que por hierro.

c) Deficiencia de Calcio o Magnesio

No sólo los bajos contenidos de calcio y magnesio del suelo determinan la aparición de una insuficiencia de estos nutrientes, sino que los requerimientos de las especies de planta son variables, siendo muy superiores en el caso de las leguminosas en comparación con las gramíneas (Cuadro 7.4).

Cuadro 7.4.Composición de la Conchita Azul (*Clitoria ternatea*) y la Pangola (*Digitaria decumbens*) en tres tipos de suelo (Arzola y Fundora, 2009).

Tipo de suelo	Clitoria ternatea		Digitaria decumbens	
	Calcio (%)	Magnesio (%)	Calcio (%)	Magnesio (%)
Ferralítico rojo	0.42	0.45	0.26	0.19
Pardo Grisáceo	0.39	0.69	0.14	0.23
Vertisuelo	0.58	0.47	0.36	0.22

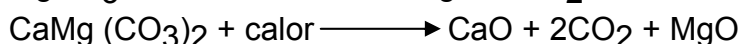
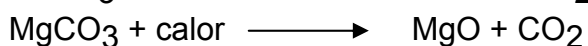
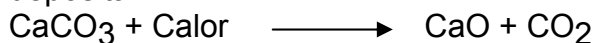
Por lo anterior, en el caso de la alfalfa y el trébol los mejores resultados se obtienen cuando se encala con dosis suficientes como para obtener un pH entre 6.5 y 7.0 (Kamprath, 1967), mientras ello, puede resultar en un sobreencalado, en el caso de muchos cultivos tropicales menos exigentes a este nutriente y adaptados a condiciones de acidez del suelo.

7.2.3. Materiales encalantes

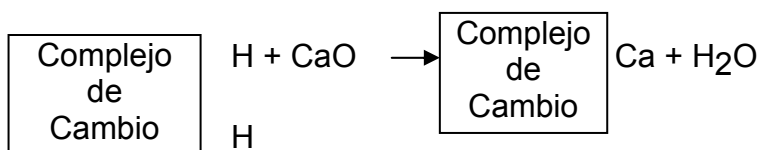
Los materiales más comúnmente utilizados son los óxidos, hidróxidos y carbonatos de calcio y magnesio.

a) Óxido de Calcio

El óxido se obtiene cuando los carbonatos se someten a elevadas temperaturas. El CO₂ y otros gases se desprenden y los óxidos de calcio, de magnesio o de ambos se depositan.

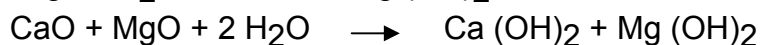
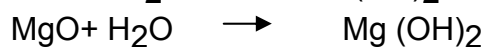
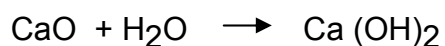


La aplicación de óxido de calcio al suelo origina la siguiente reacción;

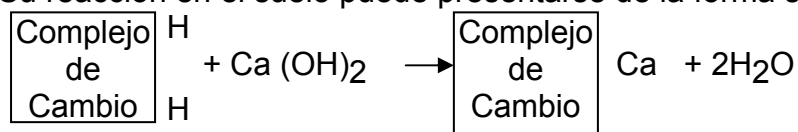


b) Hidróxido de Calcio

Los hidróxidos se forman al añadirle agua a los óxidos. Estas reacciones se pueden representar como sigue:

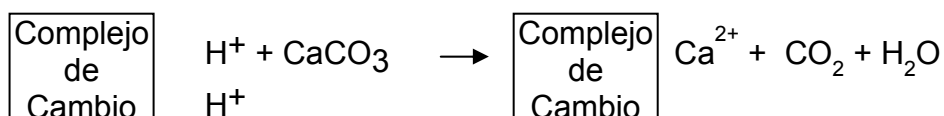


Su reacción en el suelo puede presentarse de la forma siguiente:



c) Carbonato de Calcio

Es muy común en la naturaleza. La piedra caliza, la marga, los caparzones de moluscos, etc., son muy ricos en carbonato de calcio. Los dos compuestos más importantes presentes en las piedras calizas son: El carbonato de calcio (CaCO_3) y la dolomita (MgCO_3) (CaCO_3) en variadas proporciones, cuando está presente poca o ninguna dolomita, la piedra caliza se llama cálcica. Al aumentar la proporción de dolomita, se producen las calizas dolomíticas y por último, si hay principalmente carbonato calcicomagnésico, se usa la palabra dolomita. La reacción del carbonato de calcio en el suelo puede representarse esquemáticamente de la forma siguiente:

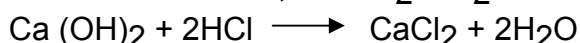


7.2.4. Garantía química de los materiales encalantes

Existen diferentes formas de expresar la garantía química de los materiales encalantes; resultando una expresión sencilla, exacta, rápida de determinar y muy cómoda, para comparar diferentes materiales el valor o poder neutralizante.

El poder neutralizante del material encalante no es más que la expresión de su fuerza neutralizadora en término de carbonato de calcio, o sea, su equivalente en carbonato de calcio.

Por ejemplo:



Como se vê: 1 mol de Ca CO_3 neutraliza 2 de HCl,

1 mol de CaO neutraliza 2 de HCl,

1 mol de Ca (OH)_2 neutraliza 2 de HCl.

Por lo tanto:

1 mol de CaO equivale a un mol de CaCO_3

1 mol de Ca (OH)_2 equivale a 1 mol de CaCO_3

De acuerdo con sus pesos moleculares y las reacciones de neutralización se tiene:

CaO	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
56	74	100

Esto significa que: 56 partes de CaO neutralizan la misma cantidad de ácido que 100 partes de CaCO₃. Si 56 partes de CaO equivalen a 100 partes de CaCO₃, 100 de CaO equivaldrán a: X de CaCO₃

$$\begin{array}{ccc} \text{CaO} & & \text{CaCO}_3 \\ 56 & \text{-----} & 100 \\ 100 & \text{-----} & X \end{array}$$

$$X = \frac{100 \times 100}{56} = 178\% \text{ de CaCO}_3$$

Lo anterior indica que 100 partes de CaO puro tienen el mismo efecto que 178 partes de CaCO₃ puro. 74 partes de Ca (OH)₂ neutralizan la misma cantidad de ácido que 100 partes de CaCO₃ o sea, si 74 partes de Ca (OH)₂ equivalen a 100 partes de CaCO₃, 100 de Ca (OH)₂ equivale a X de CaCO₃.

$$\begin{array}{ccc} \text{Ca (OH)}_2 & & \text{CaCO}_3 \\ 74 & \text{-----} & 100 \\ 100 & \text{-----} & X \end{array}$$

$$X = \frac{100 \times 100}{74} = 135 \% \text{ de CaCO}_3$$

Ello indica que 100 partes de ese material encalante o sea de Ca (OH)₂ puro equivalen a 135 de CaCO₃ puro.

Los materiales que se usan en el encalado, suelen analizarse para conocer su poder neutralizante, haciéndose reaccionar con un exceso de HCl. Si se conoce la cantidad de HCl de una determinada concentración que se añade, parte del cual reacciona con el material encalante y el resto (el exceso) se valora con una solución de hidróxido de sodio de normalidad conocida, puede calcularse por diferencia el poder neutralizante del material.

7.2.5. Métodos para calcular la dosis de cal a aplicar

Existen diferentes métodos para calcular la dosis de cal que debe aplicarse con el propósito de eliminar los efectos perjudiciales de la acidez del suelo. Entre esos métodos existen diferencias esenciales que pueden conllevar a hacer recomendaciones de dosis de cal muy distintas lo cual tiene consecuencias económicas. Además, de las diferencias en las dosis de cal existen otras, pues un método no adecuado puede conllevar a hacer aplicaciones de cal en suelos sin necesidad de encalado y originar un sobreencalado. A continuación serán discutidos varios métodos frecuentemente empleados.

a) Método de la acidez hidrolítica

La solución de acetato de sodio o de calcio que se utiliza para la extracción por ese método no distingue al aluminio y arroja generalmente elevados valores derivados de los hidrogeniones que constituyen la acidez potencial del suelo. Sobre la base de esta determinación pueden recomendarse elevadas dosis de cal en suelos sin necesidad de encalado.

Problema tipo: Calcular la cantidad de material encalante de 130% de poder neutralizante, que es necesario aplicar para neutralizar la totalidad de la acidez hidrolítica de un suelo que contiene 3 meq de H^+ / 100g, siendo el peso de la ha-surco de 3×10^6 Kg y conociendo que un meq de H^+ se neutraliza con 50 mg de $CaCO_3$ puro.

Un meq de H^+ -----50mg de $CaCO_3$

3 meq de H^+ / 100g -----X

X = 150mg de $CaCO_3$

100g ss -----150 mg de $CaCO_3$

1000g ss (1Kg) ---- x

X = 1500mg de $CaCO_3$

1 Kg de suelo ----- 1.5g de $CaCO_3$

3×10^6 Kg de suelo -----X

X= $4,5 \times 10^6$ g de $CaCO_3$, puro.ha⁻¹.

100 material encalante -----130 de $CaCO_3$ puro.

X = ----- 4.5 t. de $CaCO_3$

X= 3.46 t de material encalante.ha⁻¹.

b) Método de la acidez de cambio

Este método permite hacer recomendaciones de dosis de cal menores que con la acidez hidrolítica y económicamente más justificadas.

Problema tipo: Calcular la cantidad necesaria a aplicar de un material encalante de 90% de poder neutralizante para neutralizar la totalidad de la acidez de cambio de un suelo en que ésta arroja un valor de 1.1 meq de H^+ y conociendo que un meq de hidrógeno se neutraliza con 50mg de $CaCO_3$ puro.

1 meq de H^+ -----50 mg $CaCO_3$ puro

1.1 meq de H^+ / 100g ss ----- X

X= 55 mg $CaCO_3$

100 g ss ----- 55 g $CaCO_3$

1000g ss ----- X

X= 550 mg de $CaCO_3$ / Kg ss

1 Kg ss ----- 550 mg $CaCO_3$

3×10^6 Kg ss ----- X

X = 1.65 t $CaCO_3$.ha⁻¹

100 material encalante ----- 90 CaCO₃, puro
 X ----- 1.65 t CaCO₃.ha⁻¹
 X=1.83 t del material encalante.ha⁻¹.

Como puede apreciarse toda la mecánica de este cálculo es la misma que la que se realiza a partir de la acidez hidrolítica.

c) Método del aluminio intercambiable

La determinación de la necesidad de cal se puede calcular considerando el nivel de aluminio intercambiable que pueden tolerar variedades o cultivos específicos. Los cultivos desarrollados originalmente en suelos calcáreos, tales como: algodón, sorgo, alfalfa; debería tener como meta 0 de saturación alumínica para que la aplicación dure por varios años. El maíz es medianamente tolerante a la saturación alumínica, por ello aunque encalar hasta 0 de saturación alumínica puede ser beneficioso, bajar la saturación a nivel de 20% podrá resultar más económico. Otros cultivos como arroz, caupí son más tolerantes. La piña a veces no responde a la cal, aún en suelos con altas saturaciones de aluminio.

En definitiva este método se dirige directamente a la causa que generalmente explica el bajo rendimiento de los cultivos en algunos suelos ácidos, racionando al máximo las dosis de cal a aplicar y evitando a la vez el sobreencalado, aunque se ha señalando que en muchos suelos pueden aplicarse encalados insuficientes y que la toxicidad de aluminio reaparece, además de la complicación analítica de la determinación del aluminio y la necesidad de introducir factores de corrección según las características de los suelos y de establecer diferentes niveles tóxicos según los distintos cultivares (Porta Casanellas,1999).

d) Método combinado de saturación de Al e insuficiencia de Ca y Mg

Orlando Filho y Rodella (1987), consideran recomendar cal a la caña de azúcar en función de la saturación por aluminio y los tenores de Ca y Mg cambiables del suelo, estableciendo diferentes dosis del material encalante en función del poder neutralizante del mismo (Cuadro 7.5).

Cuadro7.5: Recomendación de encalado para la caña de azúcar (Orlando Filho y Rodella ,1987)

Análisis de suelo			Poder neutralizante del material encalante			
Aluminio	Calcio	Magnesio	65	80	100	130
Porcentaje	cmol.L ⁻¹		t de material encalante por ha			
>70			5.0	4.0	3.2	2.5
70-50			4.0	3.2	2.6	2.0
49-30			3.0	2.4	2.0	1.5
<30	<1.0 Ca ²⁺ y/o < 0.4Mg		2.0	1.6	1.3	1.0
<30	>1.0	>0.4	0.0	0.0	0.0	0.0

Al %= Al/ (Al+Ca+Mg+K) x 100

El sistema anterior esta de acuerdo con lo expresado por Kamprath (1984), que considera que el objetivo fundamental de un encalado no es elevar el pH, sino eliminar los factores limitantes del crecimiento

e) Método del porcentaje de saturación de bases

Espíndola (1982) utiliza para establecer la recomendación de encalado, una fórmula en que incluye el valor T y V del suelo:

$$t \text{ de } \text{CO}_3 \text{ Ca puro. ha}^{-1} = T (V_2 - V_1) / 100$$

T= capacidad de intercambio catiónico del suelo.

V₁= porciento de saturación de bases inicial del suelo.

V₂= porciento de saturación de bases que se desea alcanzar.

El valor de V₂ puede variar con la exigencia de cada cultivo

Por ejemplo es de 60% en el caso de algodón.

El valor T se calcula por la siguiente ecuación:

$$T = H + Al + Ca + Mg + K.$$

f) Método de titulación

Los suelos chilenos, especialmente los derivados de materiales volcánicos, han sufrido procesos de acidificación progresiva, debido principalmente a una agricultura intensiva y a la aplicación de elevadas dosis de fertilizantes acidificantes, especialmente amoniacales. El método aplicable en estos suelos es el de titulación, que consiste en incubar el suelo con una base y luego determinar el pH. Para propósitos agronómicos, se determinó que por cada gramo de CaCO₃ aplicado por kilogramo de suelo, el pH aumentó 0,2 unidades, el contenido de Ca intercambiable aumentó en un 70% y el contenido de Al intercambiable disminuyó en un 50% de su valor previo, y que existe una variación de la capacidad tampón, del pH y del contenido de Ca intercambiable en los suelos dependiendo de su contenido de materia orgánica (Sadzawka, 2001; Pinochet et al., 2005).

g) Esquema de Palaveev

Otro método para calcular la dosis de material encalante a aplicar a partir del análisis de la acidez de cambio es el esquema de Palaveev en el cual se añade a la dosis necesaria para neutralizar la acidez de cambio; otras cantidades de cal que deben reponer las pérdidas de calcio que ocurren por diferentes vías (pérdida de Ca del campo con la porción cosechada, lavado, etc.).

7.2.6. Métodos de aplicación de cal

En Cuba no es común la presencia de aluminio tóxico en los suelos ácidos, por lo que la necesidad de encalado no esta determinada por este elemento. Se han reportado en esas condiciones buenos resultados tanto mediante la incorporación de la cal con toda la masa de suelo durante la preparación del terreno, como cuando se ha localizado en el surco durante la plantación de la caña de azúcar, lo que se ha

atribuido a la disminución de la acidez del suelo y al aumento del contenido fósforo asimilable y de calcio cambiante (Hernández, 1995).

La incorporación de la cal en la capa arable del suelo varios días antes de la plantación, ha dado buenos resultados, aunque en ocasiones la profundidad de la incorporación debe ser precisada, así cuando Oxisoles sumamente ácidos son encalados, la mayoría de las raíces se desarrollan en la capa arable, pues la alta saturación aluminica del subsuelo impide un desarrollo radical más profundo (Sánchez, 1981).

7.2.7. Sobreencalado

El encalado de los suelos hasta la neutralidad es una teoría derivada del medio-oeste de los EE.UU. en áreas con rotación de maíz y leguminosas. La alfalfa y el trébol requieren de un pH de 6.5 a 7.0 debido a sus altas necesidades de calcio. Las consecuencias principales del sobreencalamiento son: reducción del rendimiento, deterioro de la estructura del suelo y disminución de la disponibilidad del fósforo, boro, zinc, manganeso y hierro.

A veces los resultados del sobreencalado difieren de unas condiciones a otras. Según Bornman et al. (1998) ello se debe a la interacción del encalado con la planta en cuestión; a las características del suelo, especialmente de su capacidad amortiguadora para los cambios de pH y a la naturaleza del material encalante.

7.3. Formación y recuperación de suelos halo mórficos

7.3.1. El pH en extractos de pastas de suelos saturados

En relación al pH de extractos de pastas de suelos saturados se tienen los siguientes conceptos (Ibáñez, 2007):

- pH de 8.5 o mayores, indican casi siempre 15 por ciento o más de sodio de cambio (intercambiable) y la presencia de carbonatos de metales alcalino-térreos.

- En suelos con pH menor a 8.5, el porcentaje de sodio intercambiable puede o no ser mayor del 15.

- Suelos cuyo pH es menor de 7.5 casi nunca contienen carbonatos de metales alcalino-térreos, mientras que si el pH es menor de 7.0, el suelo seguramente contendrá cantidades considerables de hidrógeno intercambiable.

La sodificación es uno de los más extendidos y peligrosos procesos de degradación de suelos del mundo, el cual causa efectos negativos sobre la productividad y producción de los cultivos. La sodificación puede ser debida a la intervención humana o a factores naturales. En ambas situaciones, la teoría de formación de suelos indica que una específica combinación de factores formadores de suelo (clima, material parental, biota, topografía y tiempo) producirían un tipo particular de suelo sódico. En Venezuela, suelos sódicos y salino-sódicos han sido señalados en varias zonas de importancia agrícola con climas que van desde subhúmedo hasta semiárido (Guerrero, 1998; Guerrero et al., 2002; Guerrero et al., 2004).

7.3.2. El contenido de sales del agua de riego

La corriente eléctrica resulta del movimiento de partículas cargadas eléctricamente y como respuesta a las fuerzas que actúan en estas partículas debido a un campo eléctrico aplicado. Dentro de la mayoría de los sólidos existe un flujo de electrones que provoca una corriente, y a este flujo de electrones se le denomina conducción electrónica. En todos los conductores, semiconductores y en la mayoría de los materiales aislados se genera conducción electrónica; la conductividad eléctrica depende en gran medida del número de electrones disponibles para participar en el proceso de conducción. La conductividad se define como la facilidad con que una corriente eléctrica pasa a través del agua. El agua químicamente pura no conduce electricidad. Cuanto más elevada sea la conductividad mayor será el contenido de sales.

Las unidades de medida más frecuentes son milisiemens por centímetro (mS/cm) y microsiemens por centímetro (μ S/cm).

1mS/cm=1000 μ S/cm.

1dS/m=1mS/cm

1mho/cm=1000milimho/cm=1000000 micromhos/cm

1Ms/cm=1milimho/cm

1 μ S/cm=1micromhos/cm

Aguas de menos de 1.2 mS/cm o 1200 μ S/cm no suelen presentar ningún problema, por el contrario aguas con una conductividad por encima de 2.5mS/cm o 2500 μ S/cm no son aconsejables para el riego (Canovas, 1986). Comúnmente para evaluar la salinidad de las aguas de riego se determina además de la Conductividad Eléctrica, pH, Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Carbonatos, Bicarbonatos, Cloruros y Sulfatos, La suma de los aniones y cationes en ppm se denomina sales solubles totales (SST). Para corroborar la calidad de un análisis, se debe considerar que: la suma de aniones ha de coincidir, aproximadamente, con la de cationes, ambas expresadas en $\text{cmol}^{(+)}\cdot\text{L}^{-1}$. Generalmente se permite un error de un 5%. La segunda norma es que la suma de cationes expresada en $\text{cmol}^{(+)}\cdot\text{L}^{-1}$ multiplicada por un coeficiente que oscila entre 80 y 110 es similar al valor numérico de la conductividad eléctrica.

7.3.3. Clasificación de la calidad del agua

El sodio por sí solo provee poca información acerca de la calidad del agua, y su comportamiento depende más bien de los niveles de calcio y magnesio. Si el magnesio y calcio son altos, éstos atenúan el efecto dañino del sodio, esto explica que, para un RAS dado, la infiltración del agua aumenta conforme la salinidad se incrementa. De allí que un RAS alto pueda ser tolerado conforme la salinidad del agua de riego aumenta. Contrariamente, bajo RAS del agua puede ser peligrosa en el suelo si la CE es baja.

Las sales y minerales disueltas en el agua de riego son dejadas en la solución del suelo y su concentración aumenta a medida que el agua se evapora o es absorbida por las plantas, por ello el drenaje y la evapotranspiración se relacionan con la formación o recuperación de suelos halomorficos. Cuando se riega un suelo de buen drenaje, se alcanza un RAS comúnmente de 1.5 a 3 veces más alto que el del agua de riego. Con pobre drenaje, donde se acumula el agua en la superficie,

ésta proporción puede ser hasta 10 veces mayor. Cuando esta relación no se considera se puede utilizar la clasificación del Cuadro 7.6.

Cuadro 7.6: Riesgo de sodificación del suelo a partir del RAS del agua de regadío (Canovas, 1986).

Riesgo de sodio	
*RAS	Riesgo
0-10	Bajo
10-18	Medio
18-26	Alto
>26	Muy Alto

*Relación de absorción de sodio (RAS)= $\text{Na}/\{0.5 (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})\}^{1/2}$. En $\text{cmol}^{(+)}.\text{L}^{-1}$.

El cálculo de carbonato sódico residual (CSR) se emplea para predecir la tendencia del calcio y magnesio a precipitar en el suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas. Cuando esto ocurre, aumentara la proporción relativa de sodio presente en el suelo, es decir, aumentara el valor de RAS y por tanto, el riesgo de sodificación del suelo, ha pesar de no variar la cantidad de sodio presente. Para la evaluación de este indicador se puede utilizar la categorización del Cuadro 7.7.

Cuadro 7.7. Categorías para evaluar el carbonato de sodio residual del agua de regadío (Canovas, 1986).

Carbonato de sodio residual		
*CSR[$\text{cmol}^{(+)}.\text{L}^{-1}$]	Riesgo	
<1.25	Bajo	Recomendable
1.25-2.5	Medio	Poco recomendable
>2.5	Alto	No recomendable

*CSR=($[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$)-($[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$). Todos en $\text{cmol}^{(+)}.\text{L}^{-1}$.

Jackson (1962) considera que el agua no es adecuada para el riego, con valores superiores a: 2 mS/cm de conductividad eléctrica, 1280 ppm de sales solubles totales (SST), 65% de sodio, 1ppm de boro y 1.25 de CSR.

Ahmad (1965) establece el límite entre aguas apropiadas o no para el riego mediante un rango, por debajo del cual son adecuadas y por encima inadecuadas, los rangos son: 1-2 mS/cm 10-20 de RAS, 1.25-2.50 de CSR.

A pesar de que el contenido salino del agua de riego y la norma de riego utilizada es de suma importancia en la formación o recuperación de suelos halomórficos, otros factores deben ser considerados para decidir el uso del agua para el riego. La existencia de amplios rangos en algunos indicadores para decidir sobre la calidad del agua de regadío, puede explicarse precisamente por intervenir otros factores ajenos a las características del agua en su influencia sobre los posibles daños que por salinidad o sodicidad puede causar, por ejemplo, la misma agua puede producir un grave problema salino en un suelo muy mal drenado, mientras que en un suelo bien drenado, con aplicación de exceso de agua para lavar las sales, no se presentarían daños.

7.3.4. Principios generales sobre la formación y daños a cultivos en suelos halo mórficos

Las sales y minerales disueltas en el agua de riego son dejadas en la solución del suelo y su concentración aumenta a medida que el agua se evapora o es absorbida por las plantas. Aún cuando las labores agrícolas varían de una zona de bajo riesgo a otra, los principios generales que se mencionan a continuación relativos a salinidad o exceso de sodio, son de aplicación universal. (Richard, 1973).

- El desarrollo de la planta es una función del esfuerzo total de la humedad del suelo, que a su vez está representado por la suma de la tensión de humedad y la presión osmótica de la solución del suelo.
- En los suelos, las sales solubles son transportadas por el agua. Esto es obvio, pero básico en el control de la salinidad. La salinidad es controlable si la calidad de agua de riego es satisfactoria y si puede controlarse igualmente el flujo del agua a través del suelo.
- La concentración de sales solubles en la solución del suelo aumenta a medida que se va eliminado el agua de este por evaporación.
- La desecación del suelo superficial por transpiración y evaporación crea un gradiente de succión que producirá un movimiento ascendente muy notable de agua y sales solubles. Este ascenso, es un proceso por el cual muchos suelos se han salinizado.
- Se presentan reacciones de equilibrio entre los cationes de la solución del suelo y los que han sido absorbidos por el complejo de intercambio del propio suelo. De estas reacciones depende la necesidad de usar mejoradores para cambiar el estatus de cationes intercambiables del suelo.
- La absorción de un exceso de sodio perjudica el estado físico del suelo y puede ser toxico para las plantas. Si el contenido de sodio intercambiable, aumenta mucho en el suelo, o tiende a aumentar, se necesitaran prácticas adecuadas de mejoramiento, lavado y manejo, para que las condiciones sean óptimas con respecto al crecimiento de las plantas.
- El que las partículas del suelo estén floculadas o dispersas, depende en cierto grado del estado de intercambio catiónico y de la concentración iónica de la solución del suelo. Los que son floculados y permeables cuando salinos, se defloculan al lavarlos.

La clasificación de los suelos en salinos, sódicos y salino-sódicos ha sido tratada con anterioridad. En el caso de los suelos salinos la clasificación general de estos ($> 4\text{mmho/cm}$ y $< 15\text{ PSI}$), se debe precisar de acuerdo al cultivo de que se trate, como se ilustra en el Cuadro 7.8.

Cuadro 7.8. Clasificación de la Salinidad de suelos de acuerdo a la respuesta de los cultivos (Ibáñez, 2008) y foto de costra salina.

Tipo de Suelo	Salinidad	C.E. (dS/m)	Efectos
Normales	Muy ligera	0-2	Casi nulos
	Ligera	2-4	Puede afectar a cultivos sensibles
Salinos	Media	4-8	La mayoría de los cultivos son afectados
	Fuerte	8-16	Solo pueden prosperar cultivos tolerantes
	Muy Fuerte	> 16	Solo se desarrollan cultivos muy tolerantes



7.3.5. Recuperación de suelos halomórficos

En los suelos salinos, es necesario mejorar el drenaje y lavar las sales de la solución del suelo, con agua de riego de buena calidad, en los suelos sódicos y salino-sódicos se requiere primero desplazar el sodio cambiante, mediante la aplicación de compuestos como yeso, azufre, ácido sulfúrico o cal, para después lavar.

En cualquier caso es necesario establecer un adecuado sistema de drenaje para lavar las sales de la solución del suelo, en este sentido es importante el empleo de abonos orgánicos pues mejora la estructura del suelo, facilitando con ello la aireación y el drenaje. Cuando se aplica sulfato de calcio (yeso) para intercambiar el sodio cambiante, por calcio, se forma sulfato de sodio, el cual pasa a la solución del suelo y debe lavarse, mientras que el calcio que queda en el complejo de cambio puede beneficiar la formación de agregados y el drenaje.

El lavado de sales consiste en la disolución por el agua de las sales del suelo y su desplazamiento hacia capas más profundas, fuera del alcance de las raíces. Por sus especiales características, el riego localizado es muy recomendable cuando el agua de riego sea salina. Cuanto mayor sea el tiempo entre riegos, mayor será la salinidad del suelo. Los riegos frecuentes permiten mantener alta la humedad del suelo y baja la concentración de sales.

7.3.6. Tolerancia relativa de algunas plantas a la salinidad

La tolerancia a la salinidad, considerada desde el punto de vista de la producción de cosechas útiles por los cultivos, es diferente entre las especies de plantas; “*alta tolerancia*” presenta: algodón, melones, remolacha azucarera; “*media tolerancia*”: zanahoria, lechuga, cebollas, tomates, “*baja tolerancia*”: coles, limones, naranja, patatas (Buckmany Brady, 1967). Estas clasificaciones pueden ser muy útiles para seleccionar el cultivo a emplear cuando los suelos se salinizan y como es común los recursos son escasos para recuperarlos.

Un caso curioso se reporta con el cultivo del tomate (hasta cierto límite), pues un aumento en la salinidad de la solución nutritiva, en el tomate, conduce a altos contenidos en licopeno y b-caroteno, y vitamina C bajo condiciones de atmósfera controlada. Por ello se plantea la hipótesis de que el incremento de la salinidad en el

tomate mejora la calidad de la fruta para consumo fresco, en cuanto a su mayor capacidad antioxidante. Las capacidades antioxidantes del licopeno y beta-caroteno son probablemente el mecanismo por el cual los tomates previenen algunas enfermedades relacionadas con la producción de especies de oxígeno reactivo. Por ejemplo, se ha descrito que el licopeno reduce el riesgo de cáncer en la próstata. Además del licopeno y b-caroteno, en el tomate se encuentran compuestos fenólicos, los que también contribuyen al valor nutricional del tomate y mejorar los atributos de calidad sensorial (Martínez et al. ,2009).

Bibliografía Consultada

Anmad, N.:A review of salinity alkalinity status of irrigated soils of West-Pakistan.Agrochem. und Bodekd.14(1965):113-118pp.

Arzola, N.; Fundora, O.; Machado, J.: Suelo, Planta y Abonado.Editorial Pueblo y Educación.La Habana, 1981:461pp.

Arzola, N.; Fundora, O.: Manejo agronómico de algunos factores que influyen en la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Zulia, 2009.

Arzola, N.; Yera, B.: Uso de los residuos de origen orgánico en la agricultura. Sexto Congreso de la asociación de técnicos azucareros de Latinoamérica y el Caribe (ATALAC).Guayaquil, 2006.:289-298 pp.

Bertsch, F.: La fertilidad de los suelos y su manejo...Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, 1995:157pp.

Black, C.A.: Soil-Plant Relationships. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York (1968): 792pp

Bornman, J.; Bornman, L.; Barnard, R. O.: The effects of calcium carbonate and calcium hydroxide on plant growth during overliming. Soil Science 163 (6) (1998): 498-507pp.

Brady, N., and Weil, R.: The nature and properties of soils.12th ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.1999: 881pp

Buckman, H.; Brady, N.: Naturaleza y propiedades de los suelos.Edición Revolucionaria.La Habana, 1967.590pp.

Casanovas, J.: Calidad agronómica de las aguas de riego. Ministerio de Agricultura, pesca y Alimentación. Madrid, 1986.recomencriteriosinterpretacionaguas.doc

Cristancho,R.J.A.;Munevar,M.F.;Acosta,G.A.;Santacruz,A.L.;Torres,V.M.:Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces de la palma de aceite(Elaeis guineensis,Jacq)Revista Palmas 28(1)(2007a):24-30pp.

Cristancho, R.J.; Mosquera, R.M.; Castilla, C.C.; SilvaC.H.J.: Relación entre la saturación de Al, Mg, K y la tasa de crecimiento de la Pudrición del Cogollo de la palma de aceite en la zona oriental colombiana. *Revista Palmas* 28(2) (2007b):3-9 pp.

Espíndola, P.: Novo criterio para recomendacao de calagem. *Casa de Agricultura*, Año 4, No. 3 (1982): 5-6pp.

Essington, M.E.: *Soil and water chemistry*, CRC PressLLC, 2004.

Fassbender, H.: Química de los suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica. 1987:420pp.

Guerrero, J.: Génesis de Suelos Sódicos en Diferentes Ambientes Edafoclimáticos de Venezuela. Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Maracay. Aragua, Venezuela. 1998

Guerrero-Alves, J.; Pla-Sentís I.; Camacho, R.: A model to explain high values of pH in and álcali sodic soil. *Scientia Agrícola* 59(4) 2002:763-770pp.

Guerrero-Alves, J.; Pla-Sentís, I.; Camacho. R. :Génesis de un suelo sódico alcalino en Chaguaramas, estado Guárico, Venezuela. *Agronomía Trop.* 54(4) 2004:433-459pp.

Halvin, J.L.; Beaton, J.D.; Tisdale S.L.; Nelson, W.L: *Soil fertility and fertilizer. An introduction to nutrient management*. 6th ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 1999:497pp.

Hernández, J.: Evaluación, manejo y corrección de la fertilidad de los suelos Ferralíticos Cuarcíticos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Sancti Spiritus, 1995.

Honorato, R.: *Manual de edafología*. 4ªed. Universidad Católica de Chile Ediciones, Santiago, Chile. 2000.267pp.

Ibáñez, J.: Tipos de Suelos Salinos. Curso de diagnostico de suelos en campo 4 Enero, 2008. <http://www.madrimasd.org/blogs/u>

Ibañez, J.: Acidez y alcalinidad (pH) o reacción del suelo. Curso de diagnostico de suelos en campo. Abril, 2007. <http://www.madrimasd.org/blogs/u>

Jackson, M.L.: *Soil Chemical Analises*. Englewood Cliffs, 1962.

Kamprath, E.J.: Soil acidity and response to liming. *North Caroline State University Tech Bull* 4 (1967):25pp.

Kamprath, E. J.: Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34 (1970): 252-254pp.

Martini, J.A.: Algunas notas sobre problemas del encalado en los suelos de los trópicos. Turrialba 18 (3) (1968):249-256pag.

Martínez, J.; Araya, H.; Antunez, A.; Pertúzé, R.: Effect of saline stress on the agronomic and productive parameters and Healthy properties in two tomato genotypes:wildandcherrycroppedtypes.2009:<http://www.inia.cl/link.cgi/Lacruz/Investigacion/ProyectosenDesarrolloLaCruz/6460>

Matus, P.: Evaluation of separation and determination of fitoavailable and phytotoxic aluminium species fractions in soil, sediment and water samples by the five different methods.Journal of Inorganic Biochemistry 101(2007):1214-1223pp.

Mendoza, B.; Ramírez, R.: Influencia de los hongos micorrízico arbusculares sobre la producción de materia seca y absorción de fósforo por plantas de maíz fertilizadas con roca fosfórica. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Myers, R.J, K.: Manangement of soil acidity in the tropics.XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo.Simposium 1D-11.Acapulco. Vol. 5 a,1994:511-519pp.
Orlando Filho, J.; Rodella, A.A.: Correção do solo para a cana de açúcar na região centro-sul do Brasil. Araras, Planalsucar (1987):2pp.

Pinochet, D.; Ramírez, F.; Suárez, D.: Variación de la capacidad tampón en suelos derivados de cenizas volcánicas. Agricultura Técnica.Chile. 65(1) (2005):55-64pp.

Porta Casanellas, J.; López-Acevedo, M.; Roquero de Laburu, C.: Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 1999: 849 pp.

Ramírez R.; Rodríguez, H.; Williams, J.: Relación entre la capacidad de intercambio catiónico radical del sorgo y la tolerancia a la toxicidad del aluminio. Agronomía Tropical. 36(4-6) (1986) 115-128pp.

Richard: Sales solubles en el suelo Edafología. Salinidad de los suelos. Retención de agua. Humedad. Permeabilidad.1973:<http://html.rincondelvago.com/sales-solubles-en-el-suelo.html>.

Sánchez P.A.: Suelos del trópico, características y manejo. Editorial IICA. Costa Rica, 1981: 671 pp.

Sadzawka, A.; Flores.H.; Molina, R.; Porte, L.: Comparación de métodos de titulación para estimar los requerimientos de encalado en suelos volcánicos chilenos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Suárez, D.; Márquez, M.:Estimación de las necesidades de encalado. Agric. Téc. (Chile)(1992)52:388-393.

Sucromer: Estudio de suelos para el manejo integral de la caña de azúcar en el ingenio La Margarita. Veracruz, México, 2003.

Universidad de Extremadura: Área edafología y química agrícola: Gestión y conservación del suelo. Lección 3: Degradación del suelo. Degradación físico química, 2006. http://www.tdr.cesca.es/TDX/TDR_UM/TESIS/AVAILABLE/TDR-1020106-133045//Tasm15de16.pdf.

“Los procesos de oxido-reducción que alteran la disponibilidad de importantes nutrientes vegetales como el N, P, S, Fe, Mn, etc., son realizados por equipos enzimáticos contenidos en los microorganismos”.

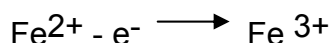
Lillian Frioni

CAPITULO 8. EL POTENCIAL REDOX DEL SUELO.

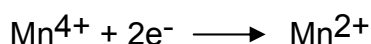
8.1. Generalidades

La pérdida y la ganancia de electrones están implícitas en toda reacción de oxidación-reducción; se reducirá aquella sustancia que tome electrones, mientras que se oxidará la que los ceda. La sustancia que se reduce actuará como agente oxidante, pues tomará electrones procedentes de otra sustancia que quedará oxidada, contrariamente esta última sustancia habrá actuado como agente reductor.

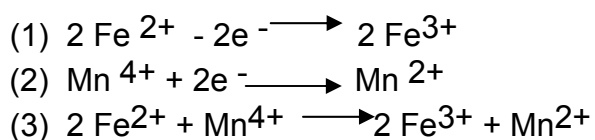
Para comprender lo anterior tomemos como ejemplo la oxidación del hierro ferroso:



Este elemento al ceder electrones ha aumentado su carga positiva pero a la vez ha actuado como agente reductor de otros elementos que poseen un mayor grado de oxidación que él, como podría ser el manganeso:



En las dos reacciones representadas anteriormente existe una transferencia directa de electrones, en la cual los electrones cedidos por el hierro han sido tomados por el manganeso resumiéndose ambas ecuaciones en la número (3).



El manganeso oxidado tiende a reducirse con más facilidad que el hierro y al hacerlo oxida al hierro que se encontraba en forma reducida.

La transferencia de electrones entre el hierro y el manganeso puede hacerse a través de un conductor metálico (transferencia indirecta) y medirse en forma de corriente eléctrica, lo cual reflejaría la intensidad del proceso; basado en ello puede determinarse en el suelo el potencial redox utilizando un electrodo de platino.

8.2. Medición del potencial redox del suelo

Si una sustancia inerte pero conductora de la electricidad tal como el platino, es puesta en contacto con el agua del suelo, el potencial electródico de la solución se reflejará en el electrodo. Esta tendencia característica de la solución de transferir electrones al electrodo puede medirse en forma de voltaje.

De insertarse un electrodo estándar con potencial conocido en el agua del suelo y medirse el voltaje producido a través de la celda formada por dicho electrodo y el platino en contacto con el suelo se determinará el potencial redox.

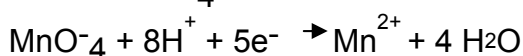
La fortaleza del proceso de oxidación o de reducción que se desarrolla en una solución se expresa a través del potencial redox (Eh), para la determinación del cual se establece la celda antes mencionada y se expresa el voltaje con relación al potencial del electrodo normal de hidrógeno considerado como cero. El valor del potencial redox es una constante característica para cada sistema, depende del potencial normal del par redox (Eo), de las constantes $R=8.315$ joules y $F=96\ 500$ Coulombs; de la temperatura absoluta (T); del número de electrones transferidos (n), y de la relación entre las actividades de las sustancias oxidadas (Aox) y las reducidas (Ared). Ello se rige por la fórmula de Nernst.

$$Eh = Eo + \frac{RT}{nF} \cdot \log \frac{Aox}{Ared}$$

Considerando que R y F son constantes y estableciendo un valor fijo de T de 25°C se deriva de la fórmula de Nernst, la siguiente relación convencional:

$$Eh = Eo + \frac{0.0591}{n} \cdot \log \frac{Aox}{Ared}$$

Garavito (1979) expresa que cuando existe pérdida o ganancia de oxígeno en el proceso redox y el ión H^+ está incluido en la ecuación, como por ejemplo en el sistema MnO_4^- / Mn^{2+} :



El potencial redox será:

$$E = Eo + \frac{0.0591}{5} \cdot \log \frac{(MnO_4^-)(H^+)^8}{(Mn^{2+})}$$

$$E = Eo + \frac{0.0591}{5} \cdot \log (MnO_4^-) - 0.096 \text{ pH}$$

Donde se aprecia que a mayor incremento del pH menor será el potencial redox.

En una solución donde sólo existan iones de un metal determinado, el potencial redox (Eh) aumentará o disminuirá en función de las relaciones entre las actividades de las formas oxidadas y reducidas de dicho metal. En un sistema tan complejo como el suelo el valor del Eh dependerá de una gran variedad de sustancias, siendo tanto mayor mientras más abunden sustancias oxidadas como: Fe^{+++} , Mn^{++++} , O_2 , NO_3^- , $SO_4^{=}$ con relación a las reducidas como: Fe^{++} , SH_2 , etc. Naturalmente las relaciones entre las actividades de cada uno de los componentes del sistema; será afectada por variaciones del potencial redox del sistema en su conjunto. Si el potencial redox del suelo disminuye se reducirá suficiente cantidad de Fe^{+++} como para que el par redox $(Fe^{+++}) / (Fe^{++})$ alcance un valor en concordancia con el nuevo sistema.

8.3. Variación del potencial redox del suelo

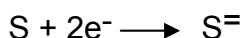
La inundación origina que el aire que se encuentre en los poros del suelo se desplace y salga a la atmósfera en forma de burbujas consumiendo los microorganismos aeróbicos rápidamente el poco oxígeno que aún permanezca en el suelo y al agotarse éste, los microorganismos anaerobios y aeróbicos facultativos utilizarán compuestos oxidados como aceptores de electrones, los cuales se van reduciendo siguiendo una secuencia termodinámica determinada según su potencial; primero comienza a reducirse el de mayor potencial, es decir el O_2 , al agotarse éste comenzará el NO_3^- , a continuación el MnO_2 , hasta que finalmente desaparecerá el CO_2 y el H^+ , apareciendo en su lugar gases como el metano y el hidrógeno molecular.

El metano producido naturalmente en las tierras húmedas, es un gran contribuyente al cambio climático, por ello la producción del arroz es una de las causas principales del aumento de las emisiones de metano, que son 21 veces más potentes que el anhídrido carbónico y contribuyen a elevar las temperaturas y a crear una peligrosa capa de ozono cerca del suelo (Redacción central, 2007).

El aniego conduce, como hemos visto, a que desaparezcan los compuestos oxidados y aparezcan compuestos reducidos en el suelo, siendo ello causa de que disminuya el potencial redox del mismo, el cual puede llegar a alcanzar valores negativos en esos casos.

Las transformaciones y la secuencia de estas en un suelo anegado son como sigue: primero en sólo 1 ó 2 días de aniego desaparece el oxígeno molecular, aún sin agotarse éste comienza la reducción del nitrato y del manganeso fácilmente reducible y por último se reduce el hierro férrico. Lógica consecuencia de la disminución de la concentración de los compuestos oxidados y del aumento de los reducidos después del aniego es la disminución que ocurre en el potencial redox al transcurrir el tiempo. No todas las reacciones de oxidación-reducción están influidas por la reacción del suelo pues las semirreacciones redox pueden dividirse en dos grupos generales respecto a la influencia del pH.

1.- *Reacciones en que no tiene lugar modificación del contenido de oxígeno de las sustancias*, las cuales están muy poco influidas por el pH de la disolución; como ejemplo de este grupo tenemos la semirreacción que pone en juego dos estados de oxidación diferentes de un ión sencillo, como:



2.- *Reacciones en que cambia el contenido de oxígeno de las sustancias*, en que el valor del potencial redox puede variar con el pH del medio, pues la reducción de cualquiera de éstos compuestos oxidados que se encuentren en el suelo requiere de iones H^+ , los cuales se transforman en agua ó en hidrógeno molecular.

Como todas esas reacciones consumen iones hidrógeno podrá ser mayor la reducción en suelos ácidos que en aquellos de pH elevado, por ello, es frecuente en el cultivo del arroz de aniego que aparezca en estos suelos la toxicidad de elementos que son más solubles y asimilables por las plantas en estado reducido como es el caso del hierro y del manganeso. Es a la vez evidente que el encalado puede disminuir en estos casos la concentración de Fe^{2+} o Mn^{2+} y ser un método para combatir dicha toxicidad (Tanaka y Yoshida, 1970).

8.4. Relación entre Eh y pH

Por originar la reducción, disminución en la concentración de iones hidrógeno del suelo, el pH aumenta después del aniego, contrariamente a lo que ocurre con el potencial redox, existiendo igualdades entre ambos indicadores: $Eh = 0.65 - 0.06 \text{ pH}$. La abundancia en estado reducido de una sustancia dependerá de la posición que ella ocupe dentro de la secuencia en que se reducen los diferentes compuestos del suelo y de la abundancia de las que posean mayor potencial que ella; por ejemplo como el manganeso (MnO_2) comienza a reducirse primero que el hierro $Fe(OH)_3$ su mayor abundancia en el suelo retardará la aparición de Fe^{2+} contribuyendo ello, conjuntamente con el encalado al combate de la toxicidad por hierro en el cultivo del arroz. De forma similar, la acumulación de SH_2 en el suelo anegado, produce la enfermedad fisiológica del arroz conocida como Akiuchi, la que puede combatirse no solo mediante el drenaje (aireación del suelo) sino también de añadirse compuestos de mayor Eh que el $SO_4^{=}$, como serían: NO_3^- , MnO_2 , $Fe(OH)_3$, etc., mientras que el enfoque opuesto podría realizarse en caso de deficiencia de algunos de éstos nutrimentos (Cuadro 8.1).

Cuadro 8.1. Sistema de oxidación- reducción típico del suelo y su potencial redox (Ponnamperuma citado por Russel, 1973).

SISTEMA REDOX	Eh (mV a 25°C)	
	pH 5	pH 7
(1) $O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$ Eh = $1.23 + 0.0148 \log P(O_2) - 0.059 \text{ pH}$	930	820
(2) $NO_3^- + 2H^+ + 2e^- = NO_2^- + H_2O$ Eh = $0.83 - 0.0295 \log NO_2^-/NO_3^- - 0.059 \text{ pH}$	530	420
(3) $MnO_2 + 4H^+ + 2e^- = Mn^{++} + 2H_2O$ Eh = $1.23 - 0.0295 \log Mn^{++} - 0.119 \text{ pH}$	640	410
(4) $Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- = Fe^{++} + 3H_2O$ Eh = $1.06 - 0.059 \log Fe^{++} - 0.177 \text{ pH}$	170	- 180
(5) $SO_4^{=} + 10H^+ + 8e^- = H_2S + 4H_2O$ Eh = $0.30 - 0.0074 \log H_2S/SO_4^{=} - 0.074 \text{ pH}$	-70	- 220
(6) $CO_2 + 8H^+ + 8e^- = CH_4 + 2H_2O$ Eh = $0.17 - 0.0591 \log P(CH_4)/P(CO_2) - 0.059 \text{ pH}$	- 120	- 240
(7) $2H^+ + 2e^- = H_2$ Eh = $0.00 - 0.059 \text{ pH}$	- 295	- 413

Como se puede apreciar en el Cuadro 8.1, se requiere la presencia del ión hidrógeno para que ocurra la reducción de cualquier compuesto en el suelo, de lo que se infiere que a igualdad de otras condiciones, mientras más ácido sea el suelo mas fuerte será

el proceso de reducción y la presencia de compuestos en forma reducida. Desde otro punto de vista, la reducción conlleva al consumo del ión hidrógeno, por tanto cuando un suelo se reduce incrementa su pH y disminuye su contenido de aluminio tóxico. Como las formas reducidas de muchos elementos son más móviles y solubles que las oxidadas, también aumenta la solubilidad de compuestos en que estas forman parte, por ello en suelos donde predominen uniones del hierro con el fósforo (P-Fe), incrementará, con el aniego, el contenido de fósforo asimilable.

8.5. Eh y aireación del suelo

El valor del potencial redox (Eh) aumenta con la aireación del suelo, mientras que disminuye hasta valores negativos cuando el aire de este desaparece, es por ello que el riego puede disminuir en mayor medida el potencial redox mientras mayor sea la norma aplicada, pero sólo se obtendrá una brusca disminución de éste indicador cuando se saturen todos los poros del suelo con agua, pues los macroporos son determinantes en el valor del potencial redox del suelo.

Si la hipoxia persiste las plantas adquieren características típicas de déficit hídrico, las hojas se secan y finalmente muere. Esto se debe a que las raíces al carecer de oxígeno no respiran y no se forma ATP, que es el portador de energía requerido para que los iones puedan penetrar a través de la membrana citoplasmática en contra de un gradiente de concentración, el agua no penetra desde el exterior a la célula por no existir suficiente concentración iónica dentro de ella, no hay absorción de agua y se cierran los estomas y la planta se seca.

En la respiración aeróbica de las plantas, por cada molécula de glucosa se generan 38 ATP, en condiciones de hipoxia se inhibe Krebs, se pasa a una respiración anaeróbica en la que se pueden generar metabolitos tóxicos, como etanol, la respiración anaeróbica tiene tres consecuencias:

1.-Escasez de ATP (gasto de reservas sin producir ATP)

2.-Producción de sustancias tóxicas

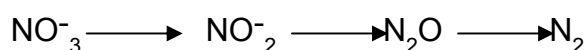
3.-Incremento en la producción de etileno, disminuye el crecimiento y aumenta el diámetro de los tallos, aumento de auxinas, cierre de los estomas, menor fotosíntesis, aparición de sustancias tóxicas.

El cultivo del arroz es capaz de transportar oxígeno de las hojas y tallos a las raíces, por ello, puede sobrevivir bajo condiciones de hipoxia. En esas condiciones de aniego existirá oxígeno disuelto en el agua, el cual se difundirá en el suelo principalmente en los primeros milímetros de la superficie, sin existir, prácticamente, intercambio alguno por debajo de la capa de suelo ubicada a más de 1 cm de profundidad; por tal razón en el cultivo del arroz bajo aniego se han enmarcado esquemáticamente dos capas u horizontes; a la primera, superficial (de apenas 1 cm) se le denomina: horizonte de oxidación, pues permite que en ella continúen viviendo microorganismos aeróbicos y se presentan compuestos oxidados; justamente debajo de ella y con un espesor mucho mayor se encontraran microorganismos anaerobios, los cuales utilizarán los compuestos oxidados que allí se encuentran (NO_3^- , MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{SO}_4^{=}$ etc.) como aceptores de electrones producidos durante la respiración. En esta segunda

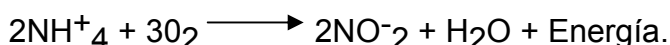
capa se presentan compuestos reducidos y de ahí su nombre "Horizonte de reducción". Debajo de este horizonte se encuentran el subsuelo que puede estar oxidado o reducido según la influencia que tenga el horizonte mencionado anteriormente.

8.6. Eh y nutrición vegetal

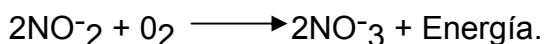
Desde el punto de vista práctico para la nutrición de la planta de arroz el horizonte de reducción marca la mayor atención por ser en él donde se desarrollan la mayoría de las raíces, además por el delgado espesor del "horizonte de oxidación", los nutrientes aplicados con los fertilizantes pasarán fácilmente a mayor profundidad sin recibir su influencia. Por estas razones cuando se aplica un fertilizante nitrogenado que posea el N como nitrato gran parte se desnitrificará en la capa de reducción según la siguiente ecuación:



Lo anterior demuestra que un nutriente de tanta importancia para el rendimiento del arroz como el nitrógeno deberá aplicarse en forma amoniacal, no obstante si el campo se drena (aireándose el suelo) ocurrirá la nitrificación del amonio como se ilustra en las siguientes reacciones:



Nitrosomonas.



Nitrobacter.

y el nitrógeno en forma nítrica quedará expuesto a pérdidas por desnitrificación después del reaniego. Si bien lo anterior puede controlarse evitando lo más posible el drenaje y el reaniego en los campos de arroz, existe un proceso que no puede controlarse y es el hecho de que aunque se aplique todo el nitrógeno en forma amoniacal, si ello se realiza superficialmente, ocurriría la nitrificación de parte del nitrógeno aplicado en el horizonte de oxidación y al pasar este en forma nítrica al horizonte de reducción se desnitrificará y pasará a la atmósfera en forma gaseosa.

Las características especiales en que se desarrolla la planta de arroz explican que se hayan reportado muchos trastornos nutricionales (Tanaka y Yoshida, 1970), especialmente en Asia, por recaer en este continente más del 90% de la producción mundial de arroz.

A pesar de la gran necesidad de hierro del cultivo del arroz, en algunos de estos trastornos nutricionales el contenido de hierro sobrepasa los límites de toxicidad. Un contenido de hierro Fe^{2+} demasiado elevado en el medio en que se desarrollan las raíces o dentro de la planta puede actuar tóxicamente (Ponnamperuma, 1964), el bronceado es un síntoma que parece deberse a dicha toxicidad en el arroz, no

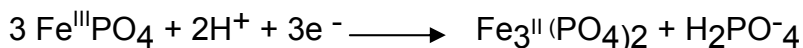
obstante su diagnóstico a partir del contenido de Fe^{2+} soluble del suelo no resulta sencillo por variar el límite de toxicidad con muchos factores como son: la concentración de otras sustancias tóxicas, de manganeso, de silicio y de fósforo, (Ponnamperuma, 1964). En general, expresan Ponnamperuma y Ikeashi (1979) existen grandes variaciones en el límite de toxicidad de hierro en el suelo, el cual puede oscilar entre 50-1700 ppm de Fe^{2+} , aunque de existir deficiencia de manganeso solamente 5 ppm de Fe^{2+} pueden actuar tóxicamente.

Dentro del conjunto de factores que favorecen la toxicidad por hierro en el arroz puede mencionarse un pH ácido, abundancia de hierro activo y de materia orgánica de fácil descomposición y falta de compuestos que se reduzcan primero que el hierro en el suelo. Basado en ello pueden recomendarse las medidas para su tratamiento (encalado, drenaje, no aplicar materia orgánica de fácil descomposición y aportar sustancias que se reduzcan primero que el hierro).

La toxicidad por hierro en el arroz se ve favorecida por insuficiencia de nutrimentos (K, P, Mn, Ca, Mg) lo que origina una disminución de la respiración de la raíz y de su capacidad de rechazar al hierro (Tanaka y Tadano, 1972) e incluso dentro de la propia planta la insuficiencia de fósforo (menor formación de fosfato de hierro) y de manganeso (menor oxidación del hierro) incrementan la movilidad del hierro y su toxicidad.

En un suelo Gley donde existía una fuerte reducción del suelo, en una región arrocería de Cuba, se presentó una fuerte depresión de los rendimientos del cultivo, llegando incluso a morir las plantas más afectadas, en tanto que, con el aumento del grado de intensidad de la sintomatología de las plantas de arroz (anaranjamiento) incrementaba el contenido de hierro, el cual llegaba a superar hasta 10 veces el límite de toxicidad en las plantas más afectadas, mientras que el contenido de fósforo y potasio disminuía, lo cual se atribuyó a que cantidades excesivas de Fe^{2+} en el suelo afectaron la respiración normal de las raíces y la asimilación de estos nutrientes, en particular del fósforo cuyo contenido en el suelo era muy bajo (Ponnamperuma, 1964; Arzola, 1980, 1981 y 1983, Arzola y Bravo 1985; Pagel y Arzola, 1983)

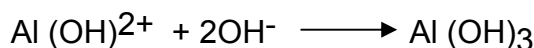
La reducción del hierro presente en los fosfatos férricos del suelo incrementa la disponibilidad del fósforo para el cultivo como se aprecia en la siguiente reacción:



El aniego origina un marcado aumento de la disponibilidad del fósforo del suelo. En suelos insuficientes en fósforo asimilable este aumento resulta muy beneficioso: por ello en ocasiones no existe respuesta a la fertilización fosfórica cuando se cultiva arroz de aniego, pero sí en otros cultivos como maíz.

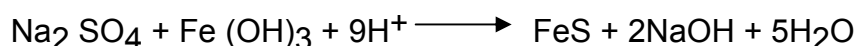
Dada la gran cantidad de factores que afectan la asimilabilidad del hierro del suelo para las plantas de arroz, fue necesario complementar este método con estudios en campo y en macetas y utilizar el análisis de la planta por integrarse en su composición todo el conjunto de factores que influyen en la absorción.

El aumento del pH que ocurre en los suelos ácidos después del aniego, origina que sea mínima la probabilidad de daños debido a toxicidad por aluminio, ya que este elemento precipita como hidróxido de aluminio.



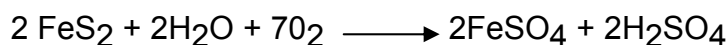
Debe tenerse presente que en la mayoría de los suelos anegados el sistema $\text{Fe (OH)}_3 - \text{Fe}^{2+}$ es el predominante y que la reducción del Fe (OH)_3 implica la neutralización de iones hidrógeno (Cuadro 8.1), por ello incrementa en los suelos ácidos después del aniego el pH hasta valores alrededor de la neutralidad, pero en el caso de suelos calcáreos el pH disminuye por la mayor presión parcial de CO_2 (Ponnamperuma et al., 1966).

En condiciones aeróbicas los sulfatos representan la forma estable del azufre. Estos pueden ser reducidos a sulfuros por los microorganismos bajo condiciones anaerobias como se ilustran en la siguiente reacción:



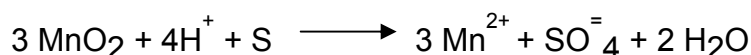
En esa ecuación se requiere de iones hidrógeno los cuales pueden provenir de la materia orgánica que actúa como un agente reductor en los suelos, además el consumo de iones hidrógeno implica un aumento del pH después de la reducción de este elemento.

En los suelos donde abundan compuestos de azufre como los manglares pueden abundar los sulfuros por las condiciones de aniego; pero si estos suelos se drenan el pH puede disminuir hasta valores extremadamente bajos pues al oxidarse los sulfuros se forma ácido sulfúrico.

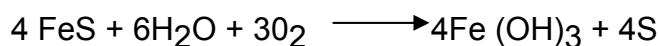


Estos suelos presentan la dificultad de que si bien se acidifican extremadamente cuando se airean, en condiciones de reducción el $\text{S}^{=}$ formado resulta tóxico para las raíces (Ponnamperuma, 1964) excepto de existir suficientes cantidades de hierro y manganeso que lo precipiten como SFe ó SMn (Black, 1968).

La aplicación de un agente oxidante puede originar la oxidación del azufre como se ilustra en la siguiente ecuación con el MnO_2 que posee un elevado potencial:



En este caso actúa el MnO_2 como agente oxidante, reduciéndose el manganeso de Mn^{4+} a Mn^{2+} , lo cual favorece la asimilabilidad de ambos nutrientes por absorber la planta el manganeso como Mn^{2+} y el azufre como $\text{SO}_4^{=2}$. Como la aireación del suelo provoca la oxidación de las piritas pasando el hierro del sulfuro ferroso a la forma férrica ocurren cambios de coloración del suelo al variar la aireación, los que pueden servir de indicador de su estado redox.



Otra modificación que ocurre en esos casos extremos de reducción es la formación de una serie de compuestos orgánicos como: metano, alcoholes, cetonas, ácido butírico,

propiónico, oxálico, etc, los cuales pueden afectar el desarrollo de las raíces de las plantas de arroz.

Por otra parte, el metano en mucho mayor medida que el CO_2 , desempeña un papel importante en la atmósfera; ambos gases absorben la radiación infrarroja y tienen efecto invernadero, además el metano origina producción de ozono troposférico que es otro gas con efecto invernadero, el cual es detrimental para todos los organismos vivos (Hutsch et al., 1994). El incremento de la solubilidad del hierro (Fe^{2+}) y el manganeso (Mn^{2+}) con la inundación puede originar el intercambio de éstos con cationes cambiables (Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+) que se encuentran en el complejo de cambio del suelo.

La práctica de permitirle al suelo dedicado al cultivo de arroz que esté un período de tiempo al año en barbecho o rotar con otro cultivo puede favorecer la desaparición de compuestos reducidos que se han acumulado en el mismo lo cual sería de provecho especialmente en suelos con tendencia a presentar acumulaciones tóxicas de determinados compuestos (Fe^{2+} , SH_2 , etc.). También resulta favorable en estos casos, el encalado de los suelos ácidos, la utilización de agentes oxidantes, el drenaje y la fertilización especialmente con fósforo y potasio (Tanaka y Tadano, 1972; Arzola, 1980).

La rotación de la caña de azúcar con arroz es realizada en áreas de abasto de caña de azúcar de diferentes ingenios, lo que permite obtener las ventajas mencionadas (Figura 8.1), pero mejor sería la rotación, si en lugar de pertenecer ambos cultivos a una misma familia botánica, se diferenciaban, pues mientras más se aparten taxonómicamente las especies de planta que se rotan, mejores resultados podrán alcanzarse.



Figura 8.1. Arroz bajo aniego en áreas aledañas a la ciudad La Troncal, Ecuador (Arzola, 2006).

Suelos Sulfatados Ácidos es el nombre común que se les da a suelos que contienen sedimentos ricos en hierro y azufre, que cuando son aireados por distintas prácticas, el sulfuro de hierro (FeS) se oxida química y biológicamente (*Thiobacillus*

ferrooxidans, *Thiobacillus thiooxidans*) y forma horizontes sulfúricos extremadamente ácidos. Estos sulfuros oxidados producen ácido sulfúrico con un pH menor de 3.5. El ácido originado, también, ataca a otros minerales del suelo y a las partículas de arcillas de tipo 2:1 liberando iones trivalentes de Al, que a pH menores de 3.5 se inestabilizan y sufren cambios, formando precipitados de hierro y aluminio (jarosita, alunita, variscita, etc.); los cuales, en cierta medida pueden fijar elementos como el Fe, K, P (Ludwig, 1999).

Las condiciones que favorecen la producción y liberación del sulfuro de hidrogeno al ambiente son la abundancia de materia orgánica, que es la fuente de energía para los microorganismos y la disponibilidad de agua en el suelo para que se mantengan hidratados y prevalezcan condiciones de anaerobiosis en el suelo para producir sulfuro de hidrógeno. El encalado es una práctica utilizada con el propósito de recuperar estos suelos para el cultivo de plantas económicas, pero los requerimientos de cal son mucho mayores que los de un suelo ácido normal. Por ejemplo, en este suelo de Colombia para subir el pH a 5.5 es necesario la aplicación de 40 t de cal/ha (Castro et al., 2001).

La curva de solubilidad del aluminio con creciente aplicación de cal es normal porque el aluminio precipita como gel y a pH mayores de 5.5 se hace insoluble. Es de notar que a pH menores de 4 el aluminio se hace más soluble en su forma monomérica y alcanza concentraciones tóxicas hasta de 10 cmol.kg^{-1} . Además, a medida que el aluminio se va haciendo insoluble con el aumento del pH, el calcio se va solubilizando en un principio, pero, a pH mayor de 5.5 el calcio tiende a estabilizarse lo que puede indicar la formación de sulfato de calcio insoluble (Castro et al., 2001).

8.7. Eh óptimo para el rendimiento de los cultivos

El rendimiento óptimo de un cultivo se puede esperar generalmente con un potencial redox de un valor medio, pues si este es demasiado elevado podrán ocurrir deficiencias nutricionales (por ej. de Fe y Mn) mientras que si es demasiado bajo puede aparecer desórdenes nutricionales debido a deficiencias de oxígeno y excesos de determinadas sustancias, más lo que se entiende por valor medio puede diferir marcadamente entre el arroz y el resto de los cultivos.

La planta de arroz es la mejor adaptada a vivir bajo condiciones reductoras del suelo por poder transportar el O_2 de la atmósfera a través de sus hojas y tallos hasta sus raíces, lo cual le permite elevar el potencial redox alrededor de sus raíces; además, este cultivo tiene mayor demanda de hierro soluble (Fe^{2+}) que el resto.

El potencial redox del suelo puede variar generalmente entre -0,4 y + 0,8; los suelos bien aireados presentan valores entre + 0,4 y + 0.8 V. mientras que aquellos sometidos por largo tiempo a condiciones de aniego pueden alcanzar valores de hasta -0.35 V. El valor límite del potencial redox entre suelos en que predomina la oxidación (condiciones aeróbicas) y aquellos en que predomina la reducción (condiciones aerobias) corresponde a +0.23 V. a pH 7.

En todos los cultivos se atiende con interés la posibilidad de existencia de un potencial redox muy bajo pues con potenciales menores del límite anterior + 0.23 V puede afectarse el rendimiento, debido a deficiencia de O_2 , exceso de CO_2 , inhibición de la respiración radical y acumulación de sustancias reducidas como Mn^{++} , Fe^{++} , H_2S , etc. que actúan tóxicamente.

En algunos suelos pesados del trópico, como los Vertisuelos por formarse profundas grietas durante la época de seca se posibilita la aireación hasta los horizontes inferiores, atribuyéndose a ello el aumento de productividad de éstos suelos en Sudán cuando incrementa su contenido de arcilla (Finck, 1963).

8.8. Relación aire/agua del suelo

El valor del potencial redox depende en gran medida de esta relación, sin embargo, poco se ha tratado hasta ahora sobre el efecto directo de los extremos de esta relación sobre el crecimiento y desarrollo vegetal; una relación demasiado alta (sequía), origina que la membrana celular formada por una doble capa de fosfolípidos varíe la orientación de sus cabezas hidrófilas que se encuentran hacia el exterior de la célula, hacia el interior y que las colas de lípidos queden hacia el exterior, lo que destruye la selectividad de dicha membrana y permite la entrada de sustancias tóxicas a la célula y la salida de otras que le son necesarias, por otra parte se activan las ribonucleasas y el RNA mensajero no llega a dar la información para formar proteínas, quedan aminoácidos libres, que facilitan el daño por enfermedades (teoría de la trophobiosis), la célula pierde su turgencia para el alargamiento celular; se cierran los estomas y falta no solo agua sino también anhídrido carbónico para la fotosíntesis y el sobrecalentamiento por la poca transpiración, favorece la respiración y la fotorrespiración; así mientras se forman menos compuestos orgánicos por la fotosíntesis, se destruyen más por estos dos últimos procesos. La sequía significa carencia de agua y poca asimilabilidad de los nutrientes presentes en el suelo.

Una baja relación aire/agua, provoca exceso de humedad, lo cual es perjudicial, ya que la insuficiencia de oxígeno en el suelo, afecta la respiración radical, falta energía para la asimilación de nutrientes, la menor concentración iónica de las células de la raíz origina menor absorción de agua, por tal razón, aunque ello resulte paradójico, la planta sufre por falta de agua. Al no existir la respiración aeróbica, las raíces realizan la respiración anaeróbica y se forma etanol tóxico para las raíces de las plantas.

Por la estrecha relación entre el Eh y la relación aire/agua del suelo es necesario tener presente las consecuencias de la sequía y el exceso de humedad sobre el rendimiento de los cultivos, pero no menos importante, son las consecuencias ambientales que ello implica, pues sequía significa mayor aireación y mineralización de la materia orgánica del suelo, desprendiéndose anhídrido carbónico que pasa a la atmósfera y aumenta el efecto invernadero, mientras que el exceso de humedad ocasiona formación de metano con consecuencias peores que el anhídrido carbónico.

Un interesante estudio donde se tiene en consideración el rendimiento del cultivo y el medio ambiente para establecer la mejor práctica de manejo en lo referente a la profundidad del drenaje se realizó con la palma de aceite africana, concluyéndose que: altas tablas de agua de 35-45 cm., podían originar una tasa más lenta de mineralización de la materia orgánica y liberarse el nitrógeno más lentamente para la planta, lo que estaba más acorde con sus necesidades nutricionales, mientras paralelamente se reducía la emisión de anhídrido carbónico a la atmósfera, de esta forma se requería de menos fertilizante nitrogenado y se protegía la atmósfera (Hasnol et al., 2007; Tarmizi, 2009).

Bibliografía Consultada

Arzola, N.: Untersuchungen über Washstumsstörungen von Reis auf einen Boden im Anbaugebiet Majagua/Kuba. Leipzig Karl-Marx-Universität. Diss, 1980.

Arzola, N.: Estudio de las afectaciones del rendimiento del arroz en un área nombrada Majagua. Parte II: Comparación del suelo con problemas con dos suelos normales, Revista Centro agrícola, Año 7, No. 3, 1981.

Arzola, N.: Estudio de las afectaciones del rendimiento del arroz en un área nombrada Majagua. Parte I: Relación entre la afectación y la intensidad de los sistemas, Revista Centro agrícola, 1983.

Arzola, N.; Bravo, A.: Estudios de las afectaciones del rendimiento del arroz en un área nombrada Majagua. Parte III: Efecto de la fertilización fosfórica en el suelo problema anegado, Revista Centro Agrícola, (1) (1985) 55 _ 69 pp.

Arzola, N.: Foto de Hacienda arrocería aledaña a la ciudad La Troncal, Ecuador, 2006.

Black, C.A.: Soil-Plant Relationships. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York (1968): 792pag.

Caravito, F.: Cambios físico-químicos en suelos inundados .Arroz 24(1975)26-31pp.

Castro, H.; Gómez, M.; Contreras, P.: Dinámica de un suelo sulfatado ácido (*typic sulfaquept*) a la aplicación de correctivos calcáreos en boyaca-colombia. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Chang, S.C.; Jackson, M.L.: Fractionation of soil phosphorus .Soil Sci. 84(1957)133-136.

Finck, A.: Tropische Boden Einführung in die bodenkundlichen Grundlagen tropischer und subtropischer Landwirtschaft. Paul Parey Verlag. Hamburg und Berlin, 1963:205pp.

Flores, T.: El riego en la nutrición del arroz .Juventud Técnica 110(1975)17-19pp.

Garavito, F.: Propiedades Químicas de los Suelos. Editorial Andes. Bogotá, Colombia, 1979.321pp.

Hasnol, O.; Tarmizi, A.M.; Khairuman, H.: Performance of Oil Palm on Deep Peat in Relation to Soil Compaction and Planting Techniques.In:Proc.of the Malaysian Soil Science Conference (SOIL 2007), 17-19 April, 2007.Mukah, Sarawak.

Hutsch; B.W.; Webster, C.P.; Powison, D.S.: Nitrogen Fertilization and Methane Oxidation in Agricultural Soils 15th World Congress of soil Science. Acapulco Volume 5a. 1994.

Kiuchi, T.: Fertilization for lowland rice. Agriculture Asia. Special Issue 6(1968)42-54pp.

Ludwig, B.: Pyrite oxidation in a sediment sample of an open cut brown coal mine. J. Plant Nutr. Soil Science. vol.162, 1999: 499-509pp.

Mitsubabayashi, M.; Ito, R.; Takase, T.; Nomoto, T.; Yamada, N.: Theory and practice of growing rice. Fuji Publish Co Ltd. Tokio, 1963.

Pagel, H.: Bodenkunde der Tropen und Subtropen. Leipzig, Karl-Marx Universität. Lehrbrief 4, 1974.

Pagel, H.; Arzola, N.: Über die Ursachen der Wachstumsstörungen von wasserreis auf einen Boden in anbaugbiet Majagua Kuba, Wissenschafts Zeitschrief der NJ, Berlin. Math. Nat. R. XXXXI, 1983.

Ponnamperuma, F.N.: Review of the symposium on the mineral nutrition of the rice plant. The mineral international Rice Research Institute. Johns Hopkins Press. Baltimore, 1964, 461- 482pp.

Ponnamperuma, F.N.; Martínez, E.; Loy, H.: Influence of redox potential and partial pressure of carbon dioxide on pH values and the suspension effect of flooded soils. Soil. Sci. 101 (1966): 421-231pp.

Ponnamperuma, F.N.; Ikeashi, N.: Adverse soil tolerance. Annual Programm Review. IRRI, 1979.

Redacción Central: El cultivo del arroz, un culpable del deterioro climático. Los Tiempos, 2/05/2007: http://www.lostiempos.com/diario/actualidad/vida-y-futuro/20070502/el-cultivo-del-arroz-un-culpable-del-deterioro_9648_10754.html

Russell, E.W.: Soil conditions and plant growth. 10th Edition Longman. London, 1973:415pp.

Sahu, B.N.: Bronzing disease of rice in Orissa as influence by soil types and manuring and its control. J. of the Indian Soc. of soil Sci. 16(1968)41-54pp.

Strickland, R.W.: The effect of drainage on physiological disorders of rice grown on the subcoastal plains of the Adelaida River. Austral J. Exptl. Agric. and Animal Husbandry 8(1968)212-222pp.

Tanaka, A.; Yoshida, S.: Nutritional disorders of the rice plants in Asia. Tech. Bull. 10 IRRI, 1970.

Tanaka, A.; Tadano, T.: Potassium in relation to iron toxicity for the rice plant. Potash Review. 9/21 (1972) 1-12pp.

Tarmizi,A.,Otman,H.,Mohd,F.:Haniff,M.;Pilus,M.;Bakar,I.;Wosten,H.: Proceedings of Agriculture,biothechnoplogy &sustainability Conference.Volume 1.Malasysian Palm Oil Board.PIPOC,2009:301-314pp.

Yoshida, S.; Douglas, T.; Cook, T.H.; Chai, K.; Gomez, A.: Laboratory manual for phisiological studies of rice.IRRI, 1972.

“Las ventajas de aprovechar los residuos orgánicos en la agricultura radican en su: bajo precio, lenta liberación del nitrógeno, riqueza en micronutrientes, neutralización de la acidez del suelo, aporte de carbono orgánico y mejora de las propiedades físicas del suelo”

T.Konno-M.Uwasara-Y.Ozaki

CAPITULO 9. APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA AGRICULTURA.

9.1. Generalidades

Cualquier proceso de la actividad humana que conduzca a la formación de un residuo que no pueda ser aprovechado con algún propósito ni reciclado y que en alguna medida dañe o represente un peligro para el propio hombre o para cualquier ser vivo considerado beneficioso para este, debería estar prohibido mediante leyes internacionales.

El aprovechamiento de los residuos orgánicos, no significa solamente una mejor protección para la biosfera, sino también, ahorro de materias primas, situación esta que se agudiza cada vez más en el Planeta, pues sus recursos materiales no son ilimitados. Por otra parte, la aplicación de los residuos en la agricultura representa para esta una nueva fuente de materia orgánica, nutrientes y agua, en tanto que, al no verterse a las aguas superficiales las preserva de la contaminación, lo que beneficia la pesca, el turismo y la recreación. Un aspecto muy importante del aprovechamiento agrícola de los residuos radica en que con este procedimiento no se vierten a las aguas potables, con lo cual se protege la salud del hombre. Arzola y Corona (1992) reportan que al disminuir el oxígeno disuelto ($r = -0.50^*$), aumentar la DQO ($r = 0.53^*$) y el amoníaco ($r = 0.44^*$) en el agua potable, incremento la incidencia de cáncer de mama.

Todo el fertilizante mineral no puede ser reemplazado por fuentes orgánicas, sin embargo, todas las fuentes orgánicas deben ser utilizadas, para reciclar los nutrientes, garantizar un entorno saludable y proteger la fertilidad de los suelos y otros recursos naturales (Arzola, 1991; Leng et al., 2009). Este principio planteado por ese autor para la palma de aceite africana, bien podría generalizarse para los diferentes cultivos.

Para alcanzar todos los beneficios que del uso agrícola de los residuos se pueden alcanzar es necesario conocer sus características y establecer normas de manejo científicamente fundamentadas, pues su uso indiscriminado puede acarrear serios males, ya que los residuos orgánicos son de muy variados orígenes y composición, pudiendo existir en determinados casos metales tóxicos los cuales deben ser evaluados antes de la aplicación, también existen consideraciones sanitarias que no deben obviarse pues en China la aplicación de excrementos humanos sin procesar adecuadamente se considera causa de epidemias como el cólera, la enteritis, la disentería bacilar, la fiebre tifoidea y paratifoidea, por ello, se pretende en esta oportunidad contribuir con la información que se brindara al adecuado aprovechamiento de estos residuos que no son mas que materia prima para nuevos ciclos productivos.

Si el ama de casa cuenta con un espacio para jardín y éste es árido podrá hacerlo productivo en grupo con su familia reutilizando el desecho orgánico que sale de la

cocina y a la vez estará concientizando a los futuros ciudadanos, además se contribuye a que los niños, adolescentes tengan el amor a la ecología a temprana edad (Daniela Fernández et. al., 2001).

9.2. Efectos de los abonos orgánicos sobre propiedades del suelo

En condiciones naturales se establece entre el suelo y la vegetación que sobre él se desarrolla un sistema casi cerrado pues la vegetación toma nutrientes del suelo, forma biomasa y sus restos orgánicos se incorporan de nuevo suministrando nutrientes y humus. Cuando el hombre elimina esa vegetación y cultiva el suelo, altera ese equilibrio pues en la cosecha se lleva parte de los nutrientes y de la materia orgánica que anteriormente se incorporaba, además, los cultivos son generalmente menos eficientes en absorber la radiación solar que los bosques, situación que es más aguda en el trópico y que origina:

- d) Una menor formación de biomasa y aporte de materia orgánica al suelo;
- e) Mayor temperatura del suelo lo que provoca mayor tasa de descomposición de la materia orgánica y mayor evaporación del agua.

Bajo condiciones de laboreo en el trópico, el menor aporte de restos orgánicos y la mayor descomposición de estos en el suelo no sólo por la mayor radiación solar, sino también por la mejor aireación, origina que disminuya el contenido de materia orgánica.

Como la materia orgánica representa la principal reserva de carbono de la biosfera, y constituye la principal fuente de Carbono y Nitrógeno en los ecosistemas terrestres, de su conservación depende en gran medida la vida del planeta. Para conservarla es necesario dirigir permanentemente el proceso de transformación de los restos orgánicos hacia la formación de sustancia húmicas estables y con ello disminuir la emisión de gases a la atmósfera contribuyendo a atenuar el efecto invernadero y elevar la productividad de los ecosistemas terrestres (Martínez et al., 2001).

El incremento de temperatura (de acuerdo con IPCC, la temperatura media global ha aumentado alrededor de 0,6 °C a lo largo de los últimos cien años) es sólo uno de los indicios del cambio climático, existen otros fenómenos colaterales. Una de las situaciones más problemáticas del cambio climático proviene del hecho de que cualquiera de las moléculas que forman los gases de efecto invernadero, una vez emitida, permanece en la atmósfera gran cantidad de tiempo (el CO₂, unos 4 años) antes de ser captada por un sumidero. La Tierra necesita más de cien años para adaptarse a la alteración de sus emisiones y estabilizar de nuevo su concentración atmosférica. En consecuencia, si el día de hoy se lograra estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero su concentración atmosférica seguiría aumentando a lo largo de casi dos siglos (Judith et al., 2007).

9.2.1. Efectos sobre propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo son responsables del transporte del aire, del agua, del calor y de las sustancias solubles a través del suelo (Sánchez, 1981), incluso las posibilidades de desarrollarse el sistema radical de las plantas es frecuentemente

dependiente de las propiedades físicas de la capa arable o de los horizontes inferiores del suelo.

Dentro del conjunto de propiedades físicas del suelo, la estructura desempeña un papel sobresaliente, pues la proporción de macro y microporos que es determinante en la relación, agua-aire del suelo es en gran medida dependiente de ella.

La mayor estabilidad estructural con el incremento del contenido de materia orgánica del suelo, se atribuye por una parte, a su acción cementante en la formación del agregado y por la otra, a disminuir la mojabilidad de este por crearse una película a su alrededor que lo protege del contacto con el agua.

Cairo (1982) encontró en 5 tipos de suelos de la región central de Cuba (Ferralítico, Ferrítico, Hidromórfico, Vertisuelo y Rendzina) correlación positiva y significativa entre sus contenidos de materia orgánica y 5 de 7 indicadores estructurales evaluados, lo cual evidencia la estrecha relación entre ambas propiedades y destaca los beneficios que de la materia orgánica se pueden derivar en aumentar la posibilidad de laboreo, disminuir los riesgos de erosión y regular el régimen del aire y agua de estos suelos.

Las relaciones anteriores resultan especialmente importantes en suelos pesados como los de la costa norte de la provincia de Villa Clara en Cuba, pues en ellos todos los factores que propicien la agregación de las partículas aumentan el porcentaje de macroporos y con ello su aireación, y el rendimiento de la caña de azúcar (Cairo,1982).

9.2.2. Efecto sobre el valor T del suelo

Los abonos orgánicos al aportar materia orgánica a los suelos posibilitan la formación de humus el cual, entre sus muchas propiedades incluye la de presentar radicales orgánicos fenólicos y carboxílicos que se cargan negativamente, incrementándose con ello la C.I.C. del suelo. En general los diferentes residuos orgánicos, líquidos y sólidos poseen ya al poco tiempo de su aplicación un efecto favorable sobre la C.I.C. de los suelos, pero ese efecto es más evidente e importante en aquellos suelos en que la fracción mineral posee una baja C.I.C (Arzola, 1989).

La presencia de humus es importante en la formación de la estructura de los suelos y por ello la aplicación de abonos orgánicos incrementa el porcentaje de agregados estables en agua, el espacio poroso y disminuye la densidad aparente de los suelos, lo cual es de importancia en el desarrollo del sistema radical y en el rendimiento de los cultivos.

9.2.3. Aporte de nutrimentos de los abonos orgánicos

Los abonos orgánicos son de baja concentración en nutrimentos en comparación con los fertilizantes minerales, así por ej., la cachaza que no es de los abonos orgánicos más pobres en nutrimentos contiene 16 veces menos nitrógeno que la urea; 13 veces menos fósforo que el superfosfato triple y 128 veces menos potasio que el cloruro de potasio. Al comparar residuos orgánicos entre sí se obtiene amplias variaciones en su composición, aporte de nutrimentos a igualdad de dosis, así como en la equivalencia de esos nutrimentos como fertilizantes minerales y dinero, apreciándose también en esa comparación, que con muchos de ellos se pueden aportar a los suelos cantidades de nutrimentos similares ó incluso superiores que con la fertilización mineral debido a las elevadas dosis que de ellos se aplican. (Arzola y Yera, 2006).

Con la aplicación de un material orgánico al suelo puede ocurrir la "mineralización" o la "inmovilización" del nitrógeno y dentro de los factores que influyen se le brinda mucha atención a la relación C/N del material añadido. No existe (por los múltiples factores que influyen) un valor preciso, que permita definir solamente a partir de la relación C/N, cuando ocurrirá y con que intensidad uno u otro proceso, aunque los siguientes rangos pueden servir de orientación (Arzola, 1989):

Relación C/N del material orgánico añadido	Clasificación
< 15	Mineralización muy probable
15-25	Zona dudosa.
>25	Inmovilización muy probable.

Materiales orgánicos con una estrecha relación C/N posibilitan que los microorganismos transformen mayor cantidad de nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral, que el necesario para constituir su biomasa, quedando de esa forma nitrógeno mineral en exceso disponible para las plantas (proceso de mineralización). Por el contrario, materiales orgánicos de amplia relación C/N no poseen un contenido suficiente de nitrógeno para constituir la biomasa microbiana y estos deberán tomar nitrógeno mineral del suelo para constituir su cuerpo (proceso de inmovilización) lo que ocasiona insuficiencia de ese nutrimento en las plantas, sino se realizan aplicaciones adicionales de fertilizantes nitrogenados.

La influencia de los abonos orgánicos sobre la asimilabilidad del fósforo del suelo no depende solamente del contenido que ellos posean de ese nutrimento y de su relación C/P, pues estos tienen efectos adicionales sobre la asimilabilidad del fósforo en el suelo como son la solubilización de los fosfatos cálcicos por los ácidos producidos durante su descomposición, el reemplazamiento de los fosfatos retenidos a las cargas positivas de materiales fijadores del suelo por los aniones orgánicos formados durante la descomposición de la materia orgánica, con lo cual no sólo aumenta la asimilabilidad del fósforo nativo del suelo sino que se bloquean los puntos de fijación del fósforo y queda un mayor porcentaje del fertilizante fosfórico aplicado disponible para las plantas.

La respuesta a la aplicación de los abonos orgánicos se deriva con más frecuencia de los aportes de nitrógeno y fósforo, pero de ser el contenido de potasio de un suelo el factor limitante del rendimiento del cultivo, las respuestas se pueden asociar con el aporte que de él y de elementos antagónicos con él, realice el abono aplicado.

Los abonos orgánicos aportan también al suelo elementos secundarios. En el caso de microelementos cuya forma asimilable es la reducida (Fe^{2+} , Mn^{2+}) el proceso de oxidación de la materia orgánica fresca puede originar que se reduzcan estos elementos y aumente su disponibilidad.

9.2.4. Efectos de los abonos orgánicos sobre organismos patógenos de las plantas

El suelo es en general un reservorio para numerosos organismos causantes de enfermedades y de plagas que dañan los cultivos.

El principal papel lo desempeñan organismos fungosos causantes de enfermedades de la raíz, del pie o de la marchitez, los cuales aumentan su patogenicidad con el monocultivo de plantas susceptibles a su ataque, pero la aparición de estos patógenos puede variar según el tipo y estado del suelo. Hay determinados suelos

que por sus características biológicas, físicas y químicas oponen mayor resistencia que otros sobre la base de ese hecho, demostrado por numerosas investigaciones ecológicas, fue difundido por Reinmuth (1963), el concepto de "Potencial antifitopatogénico del suelo" el cual puede ser diferente para cada patógeno.

El abonado orgánico es una importante medida para modificar el potencial antifitopatogénico del suelo, así es conocido que la aplicación del estiércol actúa favorablemente desde el punto de vista fitosanitario, disminuyendo los organismos causantes de enfermedades del pie del Trigo *Cerosporella herpotrichoides* Fron, *Pohicolus graminis* Sacc. y *Helminthosporium sativum*, P, Ket B, el ataque de patógenos *Phythium debaryanum* Hesse y *Rhizoctonia solani* Kuhn, el causante de enfermedades de la col *Plasmodiophora brassicae* Wor, así como otros hongos fitopatógenos del suelo.

El efecto de un abonado orgánico puede compararse con el de los fungicidas. Un organismo causante de enfermedades en las plantas como el *Rhizoctonia solani* Kuhn, puede por ej., con el abonado con diferentes sustancias orgánicas, reducirse tan fuertemente como mediante el tratamiento del suelo con Pentacloronitrobenzol (Papavizas et al., 1962). El efecto depresivo de la fertilización sobre los patógenos se ha atribuido a la estimulación de la microflora del suelo antagónica con ellos.

9.2.5. Efectos de los abonos orgánicos sobre la salinidad del suelo

La aplicación de abonos orgánicos mejora la estructura, aireación y la permeabilidad de los suelos, ello es de especial interés en lugares salinos en que es necesario lavar las sales de la solución del suelo, para transformarlos en normales, proceso que requiere no solamente de suficiente agua de buena calidad para el riego, sino de un adecuado sistema de drenaje y de permeabilidad para que el agua al percolar lave las sales (Arzola, 1989).

9.3. Empleo de residuos de la agroindustria de la caña de azúcar como enmendantes de suelo.

La mayoría de los nutrimentos que llegan al ingenio con los tallos cosechados, aparecen en los residuos y subproductos derivados del proceso de obtención de azúcar. Algunos de estos, como la miel y el bagazo se emplean como materias primas en nuevos ciclos de producción, quedando finalmente disponibles para cualquier uso provechoso que se les pueda dar, la cachaza, la ceniza de los hornos, el residuo de la fabricación de azúcar crudo (R.C.), el de las destilerías de alcohol (D.A.), el de la elaboración de levadura *torula* (L.T.) el final de las papeleras (R.P.) y el del almacenamiento del patio de bagazo (P.B.).

A consecuencia de su elevada carga orgánica (D.B.O) el vertimiento de estos residuos a las aguas superficiales, resulta perjudicial para la fauna acuática, pues origina que disminuya el contenido de oxígeno, elemento que resulta indispensable para la respiración de los seres vivos. Una solución a ese problema ecológico sería aprovecharlos con algún fin económico, como bien podría ser, como fuente de materia orgánica, nutrimentos y agua para los cultivos. De esta forma se crea un sistema cerrado que protege al entorno de la contaminación (Figura 9.1).

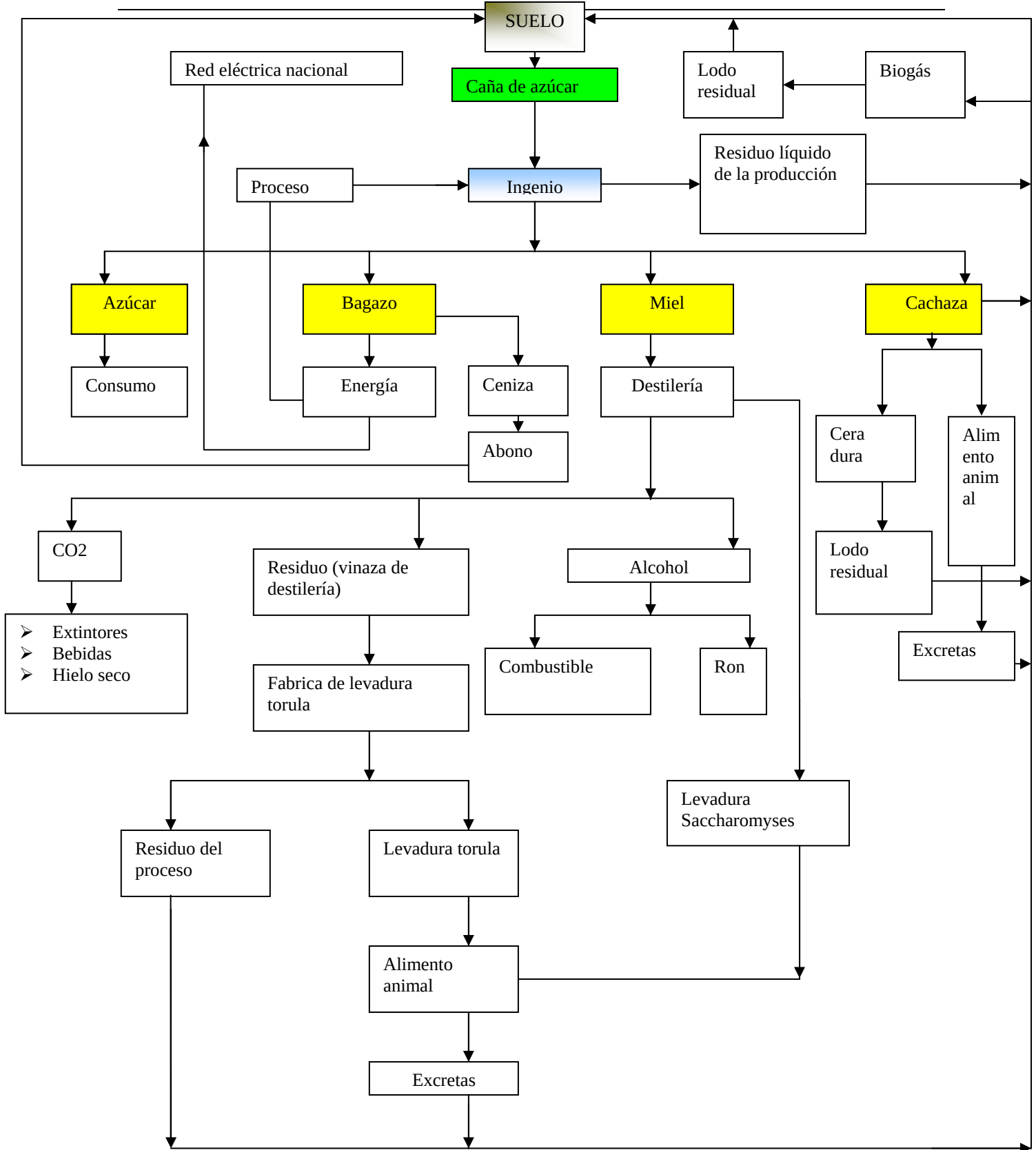


Figura 9.1.Ciclo cerrado de la producción de la agroindustria de la caña de azúcar (Arzola, 2006).

Debido a que la composición de los diferentes residuos y de las condiciones edafoclimáticas donde ellos se utilizan, son muy variadas, deben establecerse normas que consideren las dosis, métodos de aplicación, complementos nutricionales y otros aspectos.

9.3.1. Cachaza

9.3.1.1. Composición

La cachaza está formada por un conjunto de sólidos que sedimentan durante la clarificación del guarapo y que incluyen: fibra, cera, grasa, materia terrosa, azúcares, fosfatos de calcio y compuestos nitrogenados.

En su composición elemental se presentan una gran variedad de nutrimentos requeridos por el cultivo y que abarca tanto macro como microelementos. Dentro de los macroelementos primarios predomina el fósforo y nitrógeno (entre 2-3 % en base seca) con respecto al potasio (0.5% en base seca).

9.3.1.2 Efecto sobre los rendimientos del cultivo

La cachaza beneficia propiedades químicas, físicas y físico-química del suelo, razón por la cual se presenta respuesta a su aplicación dentro de un amplio rango de variación de características de los suelos: su mayor efectividad se presenta en aquellos casos en que los factores edáficos que limitan el rendimiento son precisamente los que se modifican favorablemente con su aplicación, tal es el caso, de suelos ácidos, de malas propiedades físicas, pobres en materia orgánica y fósforo asimilable, pero bien abastecidos de potasio (Arzola y Monomou, 1981; Arzola y Alfonso, 1982).

En ocasiones los incrementos de rendimiento con el empleo de la cachaza pueden superar el 100%, lo que significa que esta enmienda es imprescindible si se desea producir caña en tales localidades, aunque por lo general estos incrementos se encuentran alrededor del 25%. Las dosis necesarias, así como los incrementos de rendimiento, varían en dependencia de las características de cada lugar, aunque en general se requiere de dosis extremadamente elevadas ($120-250 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), con el propósito de alcanzar los mayores rendimientos (Arzola, 1968; Arzola, 1976; Arzola y Cairo, 1981; Arzola y Paneque, 1990).

Tradicionalmente la cachaza ha sido incorporada antes de la plantación con toda la capa arable del suelo requiriéndose cuando se emplea ese procedimiento de aplicar muy elevadas dosis para alcanzar elevados rendimientos, es por ello que, con el propósito de disminuir los elevados gastos de transportación y aplicación que esto ocasiona se ha introducido en la agricultura un método de aplicación que ha sido denominado (localizado) y que consiste en tapar los esquejes de caña una vez colocados en el surco con la propia cachaza (Arzola, 1986 y Arzola et al., 1996).

Es de señalar, que por cualquiera de los dos métodos de aplicación de cachaza mencionados con anterioridad, se obtienen ganancias, lo que demuestra lo ventajoso que resulta el aprovechamiento de este residuo de la agroindustria de la caña de azúcar como abono orgánico, incluso en áreas alejadas apreciablemente del ingenio. Otro aspecto a destacar es que las ganancias son en todos los casos mucho mayores

por el método localizado, lo que confirma su ventaja sobre el incorporado (Arzola, 2000).

Las dosis con la que se obtiene el mayor provecho económico (óptimas) así como las ganancias disminuyen al aumentar la distancia hasta el lugar de aplicación, no obstante, el empleo de 50t de cachaza localizada por ha, resulta generalmente una buena opción. Con esa dosis, debido a la alta retención de agua de la cachaza, es posible realizar la plantación en lugares sin regadío, aún cuando falte algo más de un mes para el comienzo de la época de lluvia.

9.3.2. Ceniza

Durante la combustión del bagazo y de la paja de la caña, se pierde el C y el N, destruyéndose así el carácter orgánico de estos; queda entonces la ceniza que está compuesta por sílice, bases, fósforo y otros elementos.

La composición de la ceniza es variable, siendo los beneficios agrícolas que de su empleo se derivan, debidos bien a mejoras de las propiedades físicas de los suelos pesados o al suministro de nutrimentos como potasio (alrededor de 2% de K_2O en b.s.), fósforo (alrededor de 1% de P_2O_5 en b.s.), calcio y otras bases que tienden a su vez a aumentar el pH del suelo (Arzola, 2000).

9.3.3. Compost

9.3.3.1. Generalidades

El proceso de compostaje acelera las transformaciones que ocurren en los materiales orgánicos, obteniéndose finalmente productos con mejores propiedades que los iniciales, por tal razón su empleo favorece tanto la fertilidad de los suelos como el rendimiento de los cultivos, con respecto a otras fuentes orgánicas. La agroindustria de la caña de azúcar, brinda una serie de residuos o subproductos que pueden utilizarse para el proceso de compostaje, como son: cachaza, ceniza, residuos agrícolas (cogollo y paja), residuos líquidos de diferentes tipos así como excretas animales.

La tecnología y las diferentes variantes a utilizar con el propósito de elaborar compost en cualquier lugar en que se dispongan de residuos como los mencionados anteriormente están establecidas en un instructivos elaborados al respecto (ICIDCA, 1991). El proceso de compostaje se desarrolla con una flora microbiana muy compleja, variada y característica de cada una de las etapas. Se plantean cuatro etapas fundamentales: mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración.

Los mesófilos presentan temperaturas óptimas a los 25-40°C y máximas entre 35 y 47°C. La mayor parte de las eubacterias (incluyendo las patógenas) pertenecen a esta categoría. La mayor parte de los microorganismos que viven en ambientes templados y tropicales, incluyendo los simbioses y parásitos, pertenecen a esta categoría.

Las únicas formas de vida capaces de vivir por encima de 65°C son todas procariotas. Los termófilos presentan óptimos a 50-75°C y máximos entre 80 y 113°C. Dentro de esta categoría se suele distinguir las termófilas extremas (=hipertermófilas), que pueden llegar a presentar óptimos cercanos a los 100°C, y que taxonómicamente pertenecen al dominio de las *Archaea*.

Durante la primera etapa se produce el desarrollo de la flora mesófila, aumenta la temperatura y disminuye el pH. En la etapa termofílica se desarrollan temperaturas elevadas por la acción biológica de las bacterias formadoras de esporas y actinomicetos, llegando a alcanzar hasta 60 y 70°C.

Una vez que comienza a agotarse el material biodegradable se produce el enfriamiento y por último durante la maduración (que se desarrolla en un ambiente mesófilo) se producen complejas reacciones de condensación que conducen a compuestos estables y complejos conocidos como humus; principalmente ácidos húmicos. El proceso de compostaje es resumido por Velarde (2000) en la Figura 9.2.

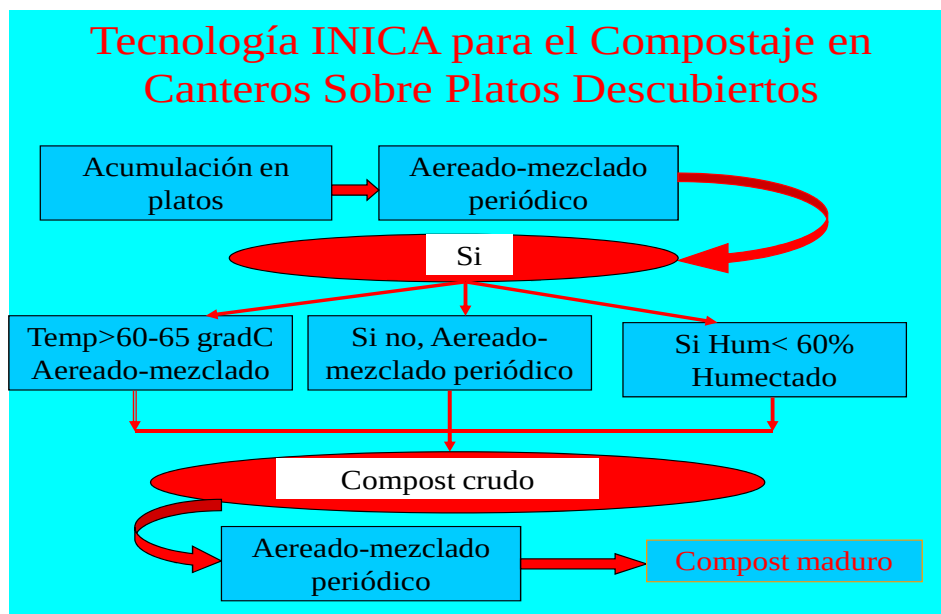


Figura 9.2. Tecnología INICA para el proceso de compostaje con residuos de la agroindustria azucarera (Velarde, 2006).

Si la relación C/N inicial es demasiado elevada (> 40) los microorganismos tendrán que pasar por innumerables ciclos de vida, para alcanzar una relación C/N entre 10-15, lo que ocasiona un alargamiento en el proceso de producción del compost y afecta su calidad. Una relación C/N muy baja, provoca pérdidas excesivas de nitrógeno en forma de amoníaco, las cuales ya de que por si son elevadas (del orden de 50 % de nitrógeno inicial). El peso del material se reduce, durante el proceso del composteo en 40-50 % del peso inicial. Para prevenir el sobrecalentamiento y dificultad de aireación, el máximo de la pila será de 2.5 m. de ancho y 1.5 m. de alto y de 10 a 100 m. de largo.

Con el objetivo de disminuir el tiempo de elaboración del compost se ha propuesto, la utilización de un inoculó comercial, el cual consiste de una amplia gama de hongos, bacterias, algas verdeazules, enzimas y actinomicetos. Compuestos enzimáticos que se añaden al compost, con el propósito de acelerar la degradación de macromoléculas existentes en los residuos orgánicos, lo que paralelamente facilita el crecimiento de microorganismos capaces de transformar sustancias químicas complejas en elementos simples, que una vez dispuestas en el suelo son fácilmente asimilables por las plantas.

El compost elaborado utilizando la cachaza en un 85 % de la mezcla inicial, el 15 % restante los residuos de centro de acopio, bagazo o estiércol vacuno: contiene alrededor del 25 % de humedad, reacción de neutra a alcalina, abundante materia orgánica, predominio de ácidos húmicos sobre los fúlvicos y elementos mayores y menores (Cuadro 9.1).

Cuadro 9.1.Composición del compost elaborado en el INICA (base peso seco).

Componente	Rango
pH	6.5 - 8.4
Materia Orgánica (%)	52 - 96
N (%)	1.2 - 2.3
P (%)	0.3 - 3.4
K (%)	0.3 - 0.7
A. Húmico/A. Fúlvico	1.4 - 2.5

9.3.3.2. Cantidad a emplear de dos sustratos para la mezcla inicial

En casos, en que no existe una definición sobre la cantidad de dos sustratos a emplear para elaborar el compost, pero se conoce la relación C/N de cada uno de ellos, su contenido de humedad y la relación C/N deseada (30/1)(Cuadro 9.2), se pueden utilizar las ecuaciones que aparecen en el Cuadro 9.3, en ese ejemplo se pretende elaborar 1000 kg de compost(Arzola y María Fernanda Aicivar,2010).

Cuadro 9.2.Composición en base seca de dos sustratos orgánicos diferentes que serán empleados para elaborar compost

Sustrato	Porcentaje		Relación C/N	Porcentaje	
	C	N		M. húmeda	M. seca
Sustrato 1	60	3	20/1	70	30
Sustrato 2	40	1	40/1	40	60

Cuadro 9.3. Ecuación para calcular volumen de sustrato 1 y 2 para conformar la mezcla

$20X + 40Y = (30)1000\text{kg}$
$X + Y = 1000\text{kg}$
X=kg del sustrato 1
Y=kg del sustrato 2
20=Relación C/N del sustrato 1
40=Relación C/N del sustrato 2
30/1=Relación C/N deseada
$20X + 40(1000 - X) = 30000\text{Kg.}$
$20X + 40000 = 30000\text{Kg}$
$X = -10000 / -20 = 500\text{kg del sustrato 1}$
$Y = 1000 - 500 = 500\text{kg del sustrato 2}$

Esos sustratos están en base seca, por ello debe calcularse la mezcla en base fresca, es decir atendiendo al contenido de humedad de cada uno de estos sustratos, esto es:

Sustrato1= (500kg) (100)/30=1667kg

Sustrato 2= (500kg) (100)/60=833 kg.

Total= 2500kg de mezcla con la humedad natural de cada sustrato

9.3.3.3. Necesidad de añadir nitrógeno mineral a la mezcla inicial

Si la relación C/N es demasiado elevada para elaborar compost, superior a 35/1, se requiere disminuir la misma hasta un rango aceptable (35/1-25/1) y con ese propósito podría añadirse algún sustrato orgánico de una menor relación C/N o fertilizante nitrogenado en una cantidad suficiente como para reducir dicha relación hasta el valor deseado, considérese 30/1.

En este ejemplo se ilustrara con tres posibles sustratos, los que en cualquiera de sus posibles combinaciones superan la relación C/N 30/1 que se estableció como deseada. Los tres sustratos poseen la composición que aparece en el Cuadro 9.4.

Cuadro 9.4. Composición de tres sustratos procedentes de Ingenio Ecudos S.A (en base seca)

Sustrato	%C	%N	C/N	Humedad (%)
Sustrato a	35.2	1.1	32.0	79.7
Sustrato b	55.7	0.2	278.5	49.2
Sustrato c	11.6	0.08	145.0	77.6

Para preparar 1000kg de la mezcla en base húmeda, se debe fijar la mayor cantidad posible del Sustrato a (cachaza) que es el de menor relación C/N y calcular lo que se aporta en cada caso de sustrato en base seca (Cuadro 9.5).

Cuadro 9.5. Aporte de materia seca por tres sustratos que conformarán la mezcla inicial

Sustrato	Kg en 1000kg de mezcla húmeda	Kg de la mezcla seca
Sustrato a	800	162.4
Sustrato b	100	50.8
Sustrato c	100	22.4
Total	1000	235.6

Una vez conocido lo anterior, se calcula el total de carbono y nitrógeno proveniente de cada sustrato y se suma, para ello se debe partir del análisis en base seca y procederse como sigue:

Sustrato a=162.4x 35.2/ 100=57.16 kg de C Sustrato a=162.4X1.1/100=1.78 kg de N
 Sustrato b=50.8x 55.7/100=28.29 kg de C Sustrato b=50.8x 0.2/100=0.10 kg de N
 Sustrato c= 22.4x 11.6/100= 2.59 kg de C Sustrato c=22.4x.08/100=0.01 kg de N

Total=88.04 kg de carbono

Total=1.89 kg de N

Se procede ahora a despejar el nitrógeno necesario para alcanzar la relación C/N deseada (30/1). Primero se calcula el total de nitrógeno requerido para obtener la relación 30/1.

$88.04/N=30$ de donde: $N=88.04/30=2.93$ kg de N se requieren en total

Ahora se calcula la diferencia entre el total de nitrógeno requerido, menos lo aportado con los sustratos: $2.93-1.89=1.04$ Kg. de N. Esa cantidad de nitrógeno se transforma a la fuente que se utilizara, por ejemplo urea: $1.04 \times 100/46=2.27$ kg de Urea/ t de compost húmedo o 235.6 Kg. de compost abs.seco.

Como comprobación de la veracidad de los cálculos anteriores, divide la cantidad total de carbono entre la de nitrógeno $88.04/2.93=30.04$. Si no se hubiera añadido ese nitrógeno la relación C/N hubiera sido, $88.04/1.89=46.58$

Considerando la necesidad de incorporar nitrógeno (Urea) al compost con el fin de equilibrar la relación C/N, que al final del proceso nos conducirá a obtener un producto con mayor valor agregado y una mineralización adecuada.

9.3.3.4. Beneficios del compost

Durante la formación del compost, las transformaciones que tienen lugar, presentan ciertos aspectos en común con los mecanismos de humificación en el medio natural y se diferencian fundamentalmente por la concurrencia de unas condiciones ecológicas menos complejas, la ausencia de un sustrato mineral predominante y la duración mucho más reducida del proceso. La formación de humus y en especial del ácido húmico, tiene efecto altamente beneficioso en los suelos. Entre sus principales características se encuentran las siguientes:

- Son estables y resistentes a la biodegradación en el suelo y consecuentemente a la descomposición microbial.
- Le imparten buenas propiedades físicas al suelo que implican mejor aireación y menos compactación.
- Eleva la capacidad de intercambio catiónico del suelo, lo que influye grandemente en la nutrición de las plantas.
- Tienen cantidades balanceadas de los principales elementos de la nutrición de las plantas: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.
- Bajo su influencia un gran número de sustancias orgánicas son producidas (fitohormonas, vitaminas, etc.), las que son tomadas por las plantas y consecuentemente estimulan su producción y reproducción.

La materia orgánica y las sustancias húmicas en particular, tienen un efecto estimulador en el crecimiento de los microorganismos capaces de fijar el N del aire.

Los nutrientes contenidos en el compost se incorporan al suelo de una forma gradual, lo que está más acorde con las necesidades de las plantas que en el caso de los fertilizantes minerales que se solubilizan rápidamente, además el compost disminuye las pérdidas de nutrientes del suelo y hace más eficiente la asimilación por las plantas, de los nutrientes aportados con los fertilizantes minerales.

Arzola (2000) reporta que fue suficiente la aplicación de solo 5 t.ha⁻¹ de compost para sustituir la fertilización mineral completa en caña planta. Con la aplicación de compost incluso en dosis bajas (4 t.ha⁻¹), se encontró un efecto beneficioso sobre la formación de agregados en el suelo, lo que podría corresponderse con mayor aireación, mayor permeabilidad y menor compactación del suelo. Estas condiciones permiten un mejor crecimiento del sistema radical del cultivo y un menor arrastre o erosión del suelo (Cuadro 9.6).

Cuadro 9.6. Comparación del efecto del compost y los fertilizantes minerales sobre las propiedades físicas de un Ferralsol (CAI "Manuel Fajardo" La Habana) (Arzola, 2000).

Tratamientos (NPK y compost)	Agregados de mayor importancia agronómica (%)	Fracción de agregados más estables al agua (%)	Coeeficiente de estructuración
I - 0 - 0 - 0	6.57	5.42	7.31
II - 75 - 50 - 120	6.68	5.31	7.04
III - 4 t c.ha ⁻¹ + 40 -10 - 108	10.82	9.58	9.43
IV - 5 t de c.ha ⁻¹	8.00	6.52	10.87

c = compost

En el ejemplo anterior, el compost aplicado localizado en el surco, en plantación, a razón de 5 t.ha⁻¹ (compost elaborado sin añadirle inoculo), duplicó la producción de caña por unidad de superficie agrícola y sustituyó la fertilización mineral.

En retoños, el efecto de la aplicación de compost, sobre el rendimiento, también resultó favorable en un Gleysol, aunque los incrementos obtenidos, tanto en producción de caña como de azúcar por unidad de superficie agrícola, no fueron tan pronunciadas como los mencionados anteriormente en caña planta. (Figura 9.3).

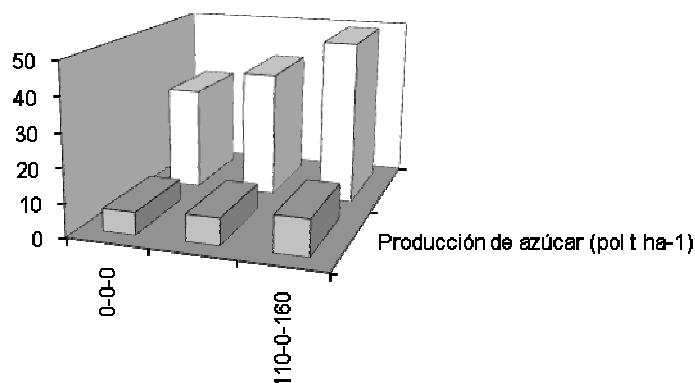


Figura 9.3. Comparación entre la aplicación de compost y la fertilización mineral (Arzola, 2000)

Desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento de los residuos para elaborar compost, resulta favorable, por evitarse con ello que los mismos contaminen las aguas y mejorarse a su vez la fertilidad del suelo.

Una de las mayores dificultades que se ha presentado para la elaboración comercial del compost es que requiere de mucha mano de obra y que con ese procedimiento

manual no se realizan las labores con la calidad adecuada, por ello en busca de una mejor calidad y resultado económicos, han sido confeccionados en Cuba y en Brasil, todos los equipos e implementos necesarios para la elaboración de este valioso abono (Figura 9.4).



Figura 9.4. Aereador de compost C715 creado en el INICA,Cuba a la izquierda (Velarde, 2000) y composteador brasileño foto a la derecha.

9.3.4. Residuos líquidos

Muy variados son en sus características los residuos que se obtienen a partir del proceso agroindustrial de la caña de azúcar que abarcan desde algunos menos abundantes como los del patio de bagazo de las fábricas de papel que se comporta similar al agua de riego por ser pobre en nutrientes (Arzola y Yera,1995b) los propios de la fabricación de papel a partir del bagazo que deben ser utilizados con mucha discreción si se fertirriegan dada la presencia de sodio, cuando el proceso seguido es el de la sosa(Arzola,1985;Arzola y Yera,1995c), hasta otros residuos muy comunes que serán comentados seguidamente.

9.3.4.1. Vinaza

Las vinazas constituyen el principal residual líquido obtenido de la fermentación de los azúcares para obtener alcohol. Según Orlando et al. (1983), por cada litro de alcohol producido, se obtienen 13 L de vinaza, por tanto, una destilería que produzca 1000 hectolitros de alcohol por día, originará 13000 de vinazas, con una carga contaminante equivalente a la de 1.7 millones de habitantes (David, 1981). Aunque no contienen virus o bacteria patógenas, su gran efecto se debe a la materia orgánica que afecta la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

La composición química es variable en dependencia de factores, tales como el origen de los materiales y el tipo y operación del proceso de destilación.El potasio inorgánico es el componente más abundante. La mayoría del nitrógeno se encuentra en forma coloidal y es lentamente mineralizado. Tanto el potasio como el calcio y el magnesio

se encuentran en forma soluble. Las vinazas también contienen fósforo así como otros elementos, tales como Mn, Ca y Zn. Su contenido de materia orgánica es elevado fluctuando entre 19 y 45% (Ferreiro y Moiteiro, 1987).

Los residuos de la destilería son particularmente ricos en potasio, por ello, podrían emplearse conjuntamente con la cachaza, en los suelos insuficientes en ese nutrimento para lograr un abonado más balanceado, mientras que desde otro punto de vista, el efecto tan pronunciado que ellos poseen sobre el contenido de potasio cambiante del suelo, sugiere que su análisis podría servir para diagnosticar la necesidad de priorizar su empleo, en áreas pobres en ese elemento o de rotar aquellas que han alcanzado un contenido muy elevado del mismo.

Las dosis de vinaza que se aplican con camiones tanques a las áreas cañeras de Brasil, varían entre 50 y 200 m³ ha⁻¹ dependiendo esto de la concentración de potasio (Crisóstomo et al., 1984).

Uno de los factores que se considera en Brasil importante para definir la dosis de vinaza a emplear es la materia prima utilizada en la fabricación del alcohol, ya que con ella varía el aporte de nutrimentos y en particular el potasio de la vinaza (miel o guarapo).

Innes (1951) reporta que los estudios realizados con la vinaza en Jamaica, donde abundan suelos insuficientes en potasio, han demostrado que este residuo incrementa el abastecimiento potásico de estos suelos, el contenido de este elemento en las plantas y los rendimientos agro-azucareros de la caña de azúcar.

Da Gloria et al. (1978), encontraron que las aplicaciones de vinaza incrementan significativamente los contenidos de materia orgánica y el valor T del suelo, así como los rendimientos agrícolas y azucareros de diferentes cepas.

Copersucar (1988), reporta incrementos de hasta 30% en las toneladas de caña por hectárea, con dosis de 150 m³.ha⁻¹, tanto en suelos arenosos como arcillosos. Según Silva (1982), la causa de esta respuesta se debe a aumentos de la materia orgánica del suelo y de los nutrientes, así como a la conservación de la humedad del suelo.

Las aplicaciones de este residual a largo plazo ejerce una fuerte influencia sobre las características químicas del suelo. Aumento de la saturación por potasio en el complejo de cambio, de la capacidad de intercambio catiónico, zinc, cobre, hierro y magnesio extractable, conductividad eléctrica, pH, así como del nitrógeno y el carbono orgánico.

La acumulación de sales en el suelo con su uso sistemático y sin control origina la necesidad de rotar las áreas, para evitar que disminuya la capacidad productiva de estos (Machado et al., 1991, 1992, 1994).

La vinaza posee un efecto beneficioso sobre las propiedades físicas del suelo, lo que resulta de interés en suelo donde el mal drenaje y la falta de aireación limitan los rendimientos del cultivo. Camargo et al. (1983), han observado mejor estructura y agregación de las partículas, así como de la permeabilidad del suelo.

La necesidad de complementar la vinaza con determinados nutrimentos, dependerá del tipo y dosis de vinaza y de los contenidos de nutrientes presentes en el suelo. Esto explica que mientras Crisóstomo et al. (1984) recomienden aplicar como complemento de esta de 90 a 100 kg de N.ha⁻¹, Gloria y Magro (1976) reporten buenos resultados cuando al añadir fertilizante fosfórico.

El potasio no se requiere como complemento de la vinaza y debe servir como indicador sobre la posibilidad de continuar aplicando la misma en las áreas cañeras, lo que se explica por las elevadas cifras que de este nutrimento se suministran al

suelo (Orlando, 1983). Un exceso de potasio, puede originar insuficiencia de Ca y Mg en el cultivo, así como mayor cantidad de sales y almidón en el jugo de la caña, lo que afecta la calidad de la caña como materia prima para la industrial siendo esta una razón por la cual, deben regularse las dosis de V.D. atendiendo a ese indicador o molerse esta conjuntamente con caña procedente de áreas no fertirrigadas.

David (1981) señala que las vinazas mezcladas en proporción de una parte de ella por 9 o 10 de agua e incluso en una dilución mayor, resultan adecuadas para ser aplicadas a los suelos, mencionando el inconveniente de la fuerte acción corrosiva de este residuo debido a su bajo pH.

La vinaza (obtenida a partir de miel final) aplicada pura a razón de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ o fertirrigada después de diluida en proporción de 1 parte de vinaza por 5 de agua, en un vertisuelo, mejoró la relación agua-aire del suelo y atenúo los procesos de dilatación-contracción, favoreciéndose así las propiedades físicas que limitaban el rendimiento de la caña de azúcar en esas condiciones edáficas (Lorenzo y Cabrera, 1990).

La irrigación de la vinaza diluida con residuos de la agroindustria de la caña de azúcar, es más barata que su traslado con vehículos al campo y requiere de menor gasto de energía, pero tiene desventajas en la homogeneidad de la aplicación y en el estricto control de la dosis.

En Brasil, las vinazas salen del proceso agroindustrial de obtención de alcohol, con más de 90 grados de temperatura, de allí pasan a unos intercambiadores de calor, con el doble objetivo, de aprovechar la energía calorífica excedente y de disminuir la temperatura con que llega a los depósitos que es de unos 50 grados, para su conducción por viaductos de fibra de vidrio, hasta unos 2 Km. de distancia a un depósito central en que por gravedad es llevada a los puntos de carga y aplicada posteriormente a los campos (Figura 9.5).



Figura 9.5. Embalse impermeabilizado para la recepción de la vinaza en Brasil (Grupo de técnicos de PDVSA-AGRÍCOLA, 2008).

A partir de las lagunas se suministran vinazas por gravedad al punto de abastecimiento de los camiones, cada uno con dos tanques cisternas (Figura 9.6). El tiempo para cargar las cisternas es de 6 a 8 minutos pues se cuenta con dos salidas en cada punto de llenado.



Figura 9.6. Llenado para el traslado de la vinaza para su aplicación en las áreas agrícolas en Brasil (Grupo de técnicos de PDVSA-AGRÍCOLA, 2008).

Otra opción para aprovechar la vinaza es concentrarla, hasta obtener un líquido oscuro, viscoso, de olor agradable que puede ser utilizado como fertilizante, principalmente por su contenido de potasio, lo que ocasiona un elevado gasto energético, pero queda un producto más concentrado. De su comparación con el cloruro de potasio, se obtiene el siguiente resultado:

1. Fertilizante potásico

1 saco de KCl=50 Kg.

El KCl contiene 60% de K_2O

1 saco de KCl=50X60/100=30kg de K_2O

El peso molecular del K_2O es 94 de ello 78 es K, por tanto:

1 saco de KCl=30X78/94=24.9 Kg. de K

1 saco de KCl vale 40 USD

1 Kg. de K vale =40/24.9=1.6 USD

2. Vinaza concentrada a 60 ° Brix

50 Kg de vinaza concentrada.

La vinaza concentrada contiene 8% de K

50 kg de vinaza concentrada =50X8/100=4kg de K

50 kg de vinaza concentrada vale=4X1.6=6.4 USD

1 Kg. de vinaza concentrada vale=6.4/50=0.13 USD

3. Comparación entre vinaza concentrada a 60 ° Brix y el KCl

El componente principal de la vinaza concentrada es el potasio y por ello sobre esa base se calculó su precio, también aporta materia orgánica y otros nutrientes en pequeñas cantidades. A pesar de ese proceso la vinaza concentrada es (24.9/4=6.2) 6.2 veces menos concentrada que el KCl, en definitiva el costo de transporte y aplicación de la misma con relación al KCl sería 6 veces superior, por ello aunque la vinaza podría continuar evaporándose para obtener un polvo más concentrado, debe

tenerse presente que su aprovechamiento agrícola es una vía para proteger el entorno de la contaminación, lo que no está económicamente cuantificado.

9.3.4.2. Levadura *Torula*

La vinaza se utiliza con buenos resultados para sustituir la miel en la elaboración de la levadura *torula*, que es un microorganismo unicelular que en presencia de oxígeno puede reproducirse muy rápidamente consumiendo azúcares reductores contenidos en la miel final o en la vinaza. Para este consumo se hacen aportes de nitrógeno y de fósforo asimilables mediante sales nutrientes (fosfato de amonio, sulfato de amonio y urea). El producto final es un sólido pulverulento de color beige claro, con un contenido de proteína bruta base seca de 47.8 % mínimo.

Vázquez (1977) define la *torula* como un microorganismo que posee un elevado contenido de proteínas, una fuente de gran valor alimenticio, que mezclado con otros alimentos brinda pienso que sirve de alimento a la masa avícola y al ganado porcino. Aproximadamente 4.5 toneladas de miel de purga más sulfato y fosfato de amonio y urea producen una tonelada de levadura seca, con valor proteico entre 46 y 52 %.

De la elaboración de levadura *torula* también queda un residuo líquido (RLT), pero es menos agresivo y contaminante que la vinaza, además se puede utilizar en muchas mayores normas de riego que la vinaza, sin perjuicio para los suelos y por el contrario beneficiando sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

La miel subproducto de la industria azucarera, en la cual se concentra casi todo el potasio que llega al ingenio, es la materia prima fundamental para la obtención de alcohol, cuyo residuo es la vinaza y cuando esta última se emplea para producir levadura *torula*, queda un residuo líquido ácido y rico en nutrientes, en correspondencia con las materias primas empleadas.

Los resultados obtenidos por Arzola (1989), Arzola y Yera (1995a) y Arzola (2000) con el empleo del residuo de *torula* en el cultivo de la caña de azúcar muestran que incrementa el nivel de materia orgánica, los agregados estables, el contenido de nitrógeno, de fósforo y en especial de potasio cambiante del suelo, mientras que el pH disminuye.

La primera característica del suelo que es modificada con el fertirriego con R.L.T. es el contenido de potasio cambiante y en solución, por ello, la determinación del contenido de este nutriente en el suelo, podría ser un factor importante para diagnosticar la necesidad de priorizar su empleo en áreas insuficientes en potasio o para definir hasta cuando se podría continuar aplicando el mismo, sin necesidad de rotar las áreas, ya que ningún efecto negativo secundario debe aparecer hasta tanto no se alcance determinado contenido de potasio cambiante en el suelo.

En tres cosechas realizadas a un experimento realizado en un Ferralsol, se encontraron los mayores incrementos de rendimiento con el empleo de este residuo con dosis de 1000 a 3000 m³.ha⁻¹ en cada cosecha, además el rendimiento fue superior que cuando se regó con agua y se aplicó fertilización mineral completa. Para un segundo ciclo de 3 cosechas de la misma plantación, durante el cual no se fertirrigó con R.L.T., continuó existiendo un efecto residual beneficioso. Las elevadas normas de riego con que se han alcanzado los mayores rendimientos en el estudio anterior coinciden con el insuficiente abastecimiento potásico de ese suelo, pero aún así, desde el punto de vista de la aplicación sistemática de este residuo en una misma área no sería aconsejable superar la dosis de 500 m³. ha⁻¹ por cosecha, y sería

preferible diagnosticar su empleo en dependencia del contenido de potasio cambiante del suelo (Arzola et al., 1986; Arzola y Yera, 1995a).

Paneque et al. (1989) reportan que la aplicación de R.L.T. en un vertisuelo, incremento significativamente los contenidos de potasio, fósforo y materia orgánica, mientras que prácticamente no modificó el contenido de sales solubles.

Lorenzo y Cabrera (1990) encontraron que R.L.T. actuó como un mejorador de la estructura en un Ferralsol, lo que se manifestó en un aumento en la composición de la estructura del suelo, de los agregados agrónomicamente más valiosos (incrementos del coeficiente de estructura, K_e) y de la estabilidad estructural, índices que pueden repercutir de forma muy positiva en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo. Este autor afirma que los resultados obtenidos en relación a la densidad del suelo con el empleo de R.L.T., indican que su utilización en gran escala en áreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar durante décadas puede ser una vía para reducir la compactación a que están sometidos estos suelos, lo que repercute en el rendimiento.

9.3.4.3. Procedimiento para proyectar el fertirriego de los residuos de la producción de alcohol y torula en la agricultura

1.- Conocer el flujo de residual de la fábrica en m^3 (durante la zafra) y definir el número de embalses para el riego de una destilería, si es uno, dos, tres. Todos los cálculos se realizarán para un embalse. Si son 3 embalses el flujo total de la fábrica se divide entre tres y sobre esa base se realiza el cálculo (q en m^3). Se seleccionarán para este análisis solo aquellas áreas que se cosecharán o plantarán en el periodo que dure esa zafra.

2.- Se multiplica la cantidad total de caña a moler en una zafra por el factor establecido para calcular la vinaza o RLT que se producirá.

3.- Establecer la prioridad de las UMMA para la fertirrigación, en función de: Cultivo (1.- caña, 2.- pastos, 3.- otros cultivos), cercanía al punto de carga de la gandola, y el algoritmo para establecer la prioridad de empleo de cada residuo.

4.- Para determinar la dosis o norma de vinaza o residuo de levadura torula que se debe aplicar para una cosecha, se considerará el contenido de potasio cambiante del suelo, la exportación por la cosecha en kg de K_2O / t de tallo cosechado (C) y el rendimiento en t de caña/ha (TCH), como aparece en el Cuadro 9.7.

Cuadro 9.7. Categorías de K intercambiable de los suelos y dosis de potasio a emplear con el fertirriego (Arzola y García, 2011).

Categorías	Descripción	*K Intercambiable ($cmol^{(+)} \cdot kg^{-1}$)	Dosis de K_2O /ha	Valores de C
I	Muy Alto	> 0.70	(TCH)(C_1)	$C_1 = 1.00$
II	Alto	$0.41 - 0.70$	(TCH)(C_2)	$C_2 = 1.75$
III	Medio	$0.20 - 0.40$	(TCH)(C_3)	$C_3 = 2.25$
IV	Bajo	< 0.20	(TCH)(C_4)	$C_4 = 2.75$

* Extracción con acetato de amonio 1N de pH 7, rangos de abastecimiento de potasio cambiabile del suelo (INICA, 1993; Fundora, 1988).

La multiplicación de (TCH)(C) será la exportación en kg de K₂O/ha, cifra que es inferior al valor de exportación medio de una cosecha de caña(2.15 kg de K₂O/ha) para las categorías de muy alto y alto y superior en las categorías de medio y bajo contenido de potasio del suelo

Una vez que se conoce el valor de la exportación en kg de K₂O/ha, se procede a determinar la dosis o norma de residuo a utilizar para suministrar esa cantidad de potasio y para ello se debe conocer el contenido de potasio del residuo y aplicar la formula siguiente:

$$m^3/ha/cosecha = (TCH) (C)/ \text{kg de K}_2\text{O por m}^3 \text{ de residuo.}$$

En suelos con una CIC < 15 cmol ⁽⁺⁾.kg⁻¹ no se aplicara ninguno de estos residuos si el suelo posee un contenido de K₂O superior a 1 cmol ⁽⁺⁾.kg⁻¹, entre 15-30 cmol⁽⁺⁾.kg⁻¹ de CIC no se aplicaran si el suelo posee un contenido de K₂O superior a 2 cmol ⁽⁺⁾.kg⁻¹ y en suelos con una CIC > 30 cmol ⁽⁺⁾.kg⁻¹ no se aplicaran estos residuos si el suelo posee un contenido de K₂O superior a 3 cmol ⁽⁺⁾.kg⁻¹

9.3.4.4. Residuo liquido del proceso de extracción del jugo de la caña

Durante el procesamiento de la caña de azúcar para extraer el jugo, se obtienen en la fábrica, diferentes residuos líquidos procedentes de: limpieza de la caña, purificación, talleres, laboratorio, servicios sanitarios, calderas y comedor. Este residuo no se destaca por su aporte de nutrientes y materia orgánica y resulta una fuente de agua que puede utilizarse en el riego en áreas cercanas el ingenio, siempre que se emplee una trampa de grasa, no se unan a la misma acido clorhídrico e hidróxido de sodio procedente de la limpiezas de la industria y no se presenten contenidos de azucares a niveles tales que al descomponerse provoquen altas concentraciones de ácidos orgánicos tóxicos para las raíces de las plantas (acido acético, propiónico, fórmico, etc.)(Arzola et al., 1986; Arzola y Yera, 1995b).

9.3.4.5. Premisas para el fertirriego de los residuos líquidos

En ningún caso se incluirá en los residuos que se fertirrigarán, procedentes de las diferentes fábricas (Destilería, Fábrica de torula, Fábrica de proceso de la caña), los residuos siguientes:

- Grasas o aceites (se deben hacer trampas de grasa), pues destruyen la fertilidad del suelo y afectan los cultivos.
- Reactivos de las limpiezas químicas de estas fabricas (Acido clorhídrico, sosa, etc.), pues destruyen la fertilidad del suelo y afectan el rendimiento de los cultivos.
- Grandes vertimientos de residuos concentrados en azucares, pues se forman ácidos orgánicos (acético, fórmico, propiónico, etc.) tóxicos para las raíces de las plantas y se acidifica el residuo, problema que se acentúa mas al aumentar el tiempo de retención en el embalse (Arzola et al., 1986; Arzola y Yera, 1995b).
- Vertimiento de metales pesados, procedentes de cualquier área de las fábricas
- Residuos de albañales que contengan organismos patógenos, así como detergentes u otros productos que resultan tóxicos.

-Residuos de Laboratorios que analicen muestras microbiológicas de enfermos o que viertan reactivos químicos altamente tóxicos, para cualquier organismo vivo.

9.4. Estiércoles de la cría de animales como abonos

9.4.1. Origen y composición

El estiércol está constituido por los excrementos sólidos y líquidos de los animales y por los materiales vegetales que se emplean como cama, los cuales, al mismo tiempo que le proporcionan lecho

El estiércol está constituido por los excrementos sólidos y líquidos de los animales y por los materiales vegetales que se emplean como cama, los cuales, al mismo tiempo que le proporcionan lecho al ganado, retienen sus deyecciones. El estiércol puede variar ampliamente en composición atendiendo a la especie de animal de que provenga.

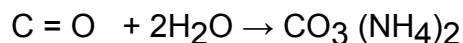
Con excepción de las aves que defecan por una cloaca en los demás casos se distinguen las deyecciones sólidas (heces) y las líquidas (orina). La orina representa en todos los casos menos de un 40% de la suma de ambas fracciones, sin embargo es de gran importancia en lo que al contenido de nitrógeno y potasio se refiere.

La especie de animal, su alimentación, edad, el tipo y proporción de cama utilizada en el establo y el régimen de explotación, no son los únicos factores que influyen en la composición del estiércol, pues éste después de ser obtenido fresco, generalmente es llevado al estercolero donde se fermenta antes de aplicarse a los campos. La fermentación permite obtener un producto seco de buenas propiedades físicas, lo cual facilita su manipulación y aplicación, se destruyen durante ese proceso organismo patógeno y semillas de malas hierbas y se estrecha la relación C/N, lo cual facilita el suministro de nitrógeno a las plantas abonadas.

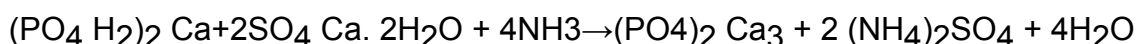
La gran cantidad de factores externos que influyen en la composición del estiércol y principalmente la especie animal de que provenga origina las grandes variaciones que en su composición se reportan. De todos los estiércoles, el más comúnmente utilizado como abono orgánico es el vacuno, pero el ovino se caracteriza por una mayor riqueza nutricional (Arzola, 1985).

9.4.2. Pérdidas de nutrientes del estiércol

En el establo puede ocurrir la pérdida en mayor o menor proporción de la orina dependiendo del poder absorbente de la cama utilizada y como en la orina se encuentra alrededor de un 50% del nitrógeno y del potasio excretado por el animal se deben preferir materiales como la turba que son muy absorbentes (se le señala el inconveniente de que se ensucia mucho el ganado). El nitrógeno de la orina se encuentra en formas poco estables como: urea, ácido úrico y ácido hipúrico. Estos se transforman hasta llegar a nitrógeno en forma amoniacal; por ejemplo, la urea se descompone en carbonato de amonio y éste en CO_2 y NH_3 que por ser gaseosos se pierden.



Con el propósito de evitar las pérdidas por volatilización se recomienda utilizar el superfosfato simple a razón de 45Kg por tonelada de estiércol (4.5%), lo que se explica por la siguiente reacción:



A pesar de que el fosfato monocálcico se transforma en fosfato tricálcico insoluble, éste procedimiento es ventajoso pues garantiza una mayor riqueza del estiércol en nitrógeno. Otro procedimiento es la inclusión de zeolitas en la cama del establo, por la gran capacidad para absorber amoníaco que posee ese mineral y por poder retener en forma cambiante el potasio de la orina.

9.4.3. Métodos de preparación del estiércol

El estiércol fresco es traído del establo al estercolero donde se transforma en "hecho" mediante la actividad de los microorganismos. Existen tres métodos de preparación que se pueden resumir como sigue:

-Método en caliente.

Se hacen pilas sueltas de 80cm. de alto hasta que se alcancen unos 60°C (4-6 días) entonces se superponen capas hasta unos 4m. de alto. De ésta manera la preparación es más rápida aunque hay mayores pérdidas de nitrógeno y de materia orgánica que por otros métodos. Las pérdidas de nitrógeno por volatilización se pueden reducir manteniendo húmeda la pila y añadiendo superfosfato simple si es que no se aplicó en el establo.

-Método en frío.

Se hacen grandes pilas prensadas para que predomine la descomposición anaeróbica (30°C), por ese método se pierde menor cantidad de nitrógeno aunque se requiere de más tiempo para la preparación del estiércol.

-Método intermedio.

Se hacen pilas sueltas hasta que se alcance una temperatura de 60-70°, entonces se les da un riego y se prensan para evitar las grandes pérdidas de nitrógeno.

9.4.4. Efectos de la aplicación del estiércol sobre las características del suelo y el rendimiento de las plantas

Arteaga (1988) reportó que el abonado con estiércol vacuno en la Bermuda Cruzada incrementó los contenidos de fósforo y potasio, no afectó los de nitrógeno y cobre y disminuyó el de manganeso, lo que explica que la estercoladura sea eficiente para sustituir parcialmente la fertilización mineral fosfórica y potásica, pero que deba complementarse con nitrógeno para alcanzar rendimientos máximos. Cuando se aplican en pasto pangola 25 t de estiércol ha^{-1} (base seca), se requiere añadir al menos 300 Kg. de N ha^{-1} para lograr máximos rendimientos.

La dosis de 25 t de estiércol. ha^{-1} en base seca incorporada antes de la siembra resultó económicamente óptima, aunque el máximo rendimiento se alcanzó con 45 t de estiércol ha^{-1} (Arteaga, 1988). El efecto de la estercoladura es por lo general más marcado el primer año después de su incorporación, aunque su efecto residual puede alcanzar cuatro años.

En base a la experiencia y la experimentación agrícola de campo se determinan las dosis de abonos orgánicos a emplear bajo condiciones edafoclimáticas y para distintas especies de planta, pero una recomendación sobre bases científicas, es aún imposible, por existir muy poca información sobre la velocidad de degradación biológica de los materiales orgánicos. Por ser el nitrógeno el nutrimento a que con mayor frecuencia responden los cultivos y el más susceptible de sufrir pérdidas, las dosis de aplicación podrían basarse en la fracción de nitrógeno que es disponible para el cultivo, siendo conocido que los coeficiente de disponibilidad y el efecto residual del nitrógeno contenido en los distintos abonos orgánicos difiere.

En un estudio en México, el cultivo de alfalfa presentó un incremento de sus rendimientos por el efecto de la aplicación de fertilizante fosfórico y potásico, sin embargo, la mayor respuesta del cultivo de alfalfa se presentó con la dosis óptima económica de fertilizante de 40 Kg. ha^{-1} de nitrógeno, 180 Kg. ha^{-1} de fósforo, 180 Kg. ha^{-1} de potasio y 80 t ha^{-1} de estiércol de bovino, con un rendimiento de alfalfa de 91.5 t ha^{-1} (para tres cortes) (Romero et al., 2001).

Lo biodegradable que resulte un abono orgánico depende no sólo de la especie animal de que provenga, sino también de factores externos, así por ejemplo: la adición de antibióticos en el alimento animal, altera los procesos digestivos y se modifica por ello la biodegradación del estiércol.

Las discrepancias encontradas posiblemente se deben a la composición tan variada que puede tener el estiércol por depender ésta de multitud de factores, y ser muy diferentes las condiciones de cultivo, suelo y clima donde este abono orgánico se ha estudiado. Por estas razones no existe un completo acuerdo entre los investigadores sobre las causas que originan la respuesta de los cultivos a la estercoladura.

En muchos estudios no se ha encontrado influencia del estiércol sobre la composición química de los pastos, no obstante de existir buenas condiciones físicas del suelo, el valor del estercolado medido en rendimiento por unidad de superficie depende principalmente de la cantidad de nutrimentos que se suministra al cultivo.

9.4.5. Efectos del estiércol vacuno sobre la composición botánica del pasto

Siendo el estiércol vacuno un resultado de la digestión del animal el cual puede haber consumido semillas de diferentes especies de plantas, que de aparecer en el estiércol

y ser aportadas a los campos podrían originar la infestación de estos con malas hierbas, es una preocupación lógica conocer cómo influye la aplicación de estiércol sobre la composición botánica del pasto.

Arteaga et al. (1981) reportan que utilizando estiércol conservado o preparado, la pureza del pasto mejora con el aumento de la dosis aplicada para cada variante de fertilización mineral, resultando la combinación de elevadas dosis de abono orgánico y mineral la mejor variante, por impedir el deterioro de los pastos con el tiempo y alargar la vida útil de la explotación.

9.4.6. Purín

En explotaciones en que se obtiene el estiércol vacuno con muy pequeñas cantidades de cama, las deyecciones líquidas y el agua empleada en la limpieza en el establo, no pueden ser completamente absorbidas y se recogen los mismos en una fosa, donde quedan sujetos a un proceso bastante anaerobio. Se aconseja diluir el residuo que se recoge en la fosa de las vaquerías en cinco veces su volumen con agua antes de regarlo a los campos, el riego debe hacerse preferiblemente en épocas en que no pade el ganado y realizar una ligera labor superficial que lo entierre someramente para evitar las pérdidas de nitrógeno por volatilización.

La disponibilidad del nitrógeno contenido en la orina, puede alcanzar un 80% o más, mientras que en la porción sólida de las excretas es de un 30% o menor, lo cual, pone en evidencia la importancia de la forma líquida como fuente de nitrógeno para las plantas, además casi todo el potasio se encuentra en la orina.

9.4.7. Uso integral de los residuos pecuarios

La utilización de los residuos pecuarios biodegradables (no peligrosos) pueden ser separados en excretas secas y húmedas. Las primeras se pueden utilizar para elaborar compost y aplicarse como abonos, mientras que los sedimentos de las húmedas sirven para elaborar compost o criar lombrices, las que dejan a su vez un excelente abono; la porción líquida en un biodigestor produce biogás y quedan los lodos que son un excelente abono orgánico (Botero, 2006).

9.5. Los residuos urbanos como abono y agua de regadío

9.5.1. Generalidades

En los centros urbanos la actividad del hombre origina gran cantidad de desechos tanto sólidos (basura urbana) como líquidos (agua de alcantarilla o albañales) los cuales deben ser eliminados de las ciudades buscando un mínimo de contaminación del medio ambiente.

La eliminación de los desechos urbanos representa un gasto social y un peligro potencial creciente para el medio ambiente pues con el aumento de la población y de su nivel de vida crece también la cantidad de desechos, los cuales muchas veces vienen acompañados con residuos industriales. El aprovechamiento de estos residuos podría contribuir o disminuir al gastos socialmente necesario para su evacuación de las ciudades y el peligro de convertir cada día mayores zonas del planeta en

basureros y de transformar lagos, ríos y bahías en aguas albañales: una posibilidad en ese sentido es el empleo de los mismos en la agricultura.

9.5.2. Riego con aguas albañales

En algunos lugares de Europa el riego con agua de alcantarilla se realiza desde hace siglos, así en Breslau, Alemania esta práctica comenzó en el siglo XVI, aunque los campos regados más intensamente explotados han sido los de los alrededores de París y Berlín. En París en el año 1904 se regaban unas 4800 ha de tierra aumentando esta cifra a 52 500 ha en el año 1939, pero por no disponerse de más tierras cultivables cercanas a París que tuvieran posibilidades de regadío se construyó una gran estación de depuración biológica y el agua de alcantarilla una vez purificada es vertida al Sena quedando de ese proceso de depuración unos cienos que forman una pasta cremosa que cuando se deja uno o dos meses en depósitos en que se efectúa una digestión da lugar a un barro activado muy apropiado como abono (Ignatieff y Page, 1964; Bertin, 1965).

La utilización de los desagües como agua de regadío en los campos ha sido una práctica muy difundida en los países con densa población y fuertemente industrializados de Europa, pero en la actualidad escasean cada vez más las superficies agrícolas cercanas a los centros industriales y urbanos, por ello, se recurre a la purificación biológica de las aguas, no obstante en esas grandes instalaciones surge el problema de cómo eliminar el fango residual, existiendo como única vía adecuada (incluso desde el punto de vista económico) el empleo de los mismo en beneficio de la agricultura por su aporte en materia orgánica y nutrimentos.

En los países del tercer mundo existen más razones que en Europa para hacer uso de las aguas de alcantarilla en la agricultura pues muchos pueblos y ciudades poseen zonas agrícolas aledañas con posibilidades de riego: el menor desarrollo industrial sugiere que hay menos posibilidades de contaminación con metales pesados y compuestos tóxicos en dichas aguas: económicamente esos países de Europa están situados en el trópico, existiendo mayor necesidad de aportar materia orgánica al suelo y de ahorrar dinero en la compra de fertilizantes químicos por ser estos países más pobres.

Las aguas albañales que no contienen cantidades excesivas de metales potencialmente tóxicos, ni toxinas orgánicas pueden aplicarse en la agricultura siendo su aporte de nitrógeno un indicador muy importante para su dosificación.

Si se realizan aplicaciones muy elevadas se acumula exceso de nitrato en el suelo presentándose exceso de nitrógeno en el cultivo y enriqueciéndose el agua subterránea con cantidades de nitrato suficientes como para sobrepasar el máximo permisible para preservar la salud humana (10 ppm de N-NO_3), mientras que pequeñas aplicaciones originan insuficiencia de nitrógeno en el cultivo.

Las aguas albañales no se caracterizan por ser concentradas en materia orgánica y elementos nutritivos pero su estrecha relación C/N (<5) evidencia que ocurrirá el proceso de mineralización del nitrógeno orgánico una vez que ellas se apliquen al suelo.

Las aguas albañales de la ciudad de Santa Clara en Cuba se almacenan en una micropresa desde donde se distribuyen para ser regadas por aspersión a diferentes cultivos. (Yuca, boniato, maíz, frijoles, tomate, col, pimiento, etc.). Estas aguas presentan un valor de carbonato de sodio residual elevado, pero no se han modificado

con su empleo las características del suelo, a pesar de haberse regado los campos regularmente durante varios lustros (Arzola y Yera, 2006).

Aunque se agregan con el uso continuo de las aguas albañales cantidades notables de nutrimentos, las que de hecho pueden ser aprovechados por las plantas son un tanto menores, debido ya que el gran volumen de agua aplicada puede producir el lavado de importantes porciones de nitrógeno e igualmente de algún potasio. En campos situados al noroeste de París se ha originado deficiencia de Mn, aunque de aplicarse ese nutrimento foliarmente se elimina ese efecto, incluso en campos regados con aguas albañales durante 80 años (Ignatieff y Page, 1964).

Para un empleo amplio de las aguas albañales es necesario tener un mapa hidrológico de la localidad ya que con la aplicación de sólo $100 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ si el manto freático es alto es posible su contaminación. Otra variante para la aplicación de las aguas albañales es su traslado mediante tanques rastras a los campos, pero ello origina que hasta un 50% de todos los gastos para el empleo de las mismas sean debidos al acarreo.

Las heces fecales y la orina pueden no incorporarse a las aguas albañales y regarse directamente. Los excrementos humanos (heces y orina) deben almacenarse 3 ó 4 meses antes de ser aplicados a los campos, para destruir con ello, las bacterias patógenas, parásitos protozoarios, huevos de áscaris y angulostoma, mientras la elevada concentración de sales puede eliminarse por medio de la dilución con agua.

El contenido de nutrimentos excretado por toda la población del planeta anualmente, corresponde aproximadamente a 520, 155 y 35 millones de dólares por concepto de N, P y K respectivamente, pero un correcto aprovechamiento de ese recurso, requiere de medidas sanitarias que garanticen la salud de la población (Arzola y Yera, 2006).

9.5.3. Fango de aguas albañales

Los diferentes métodos empleados en el tratamiento de las aguas albañales dan origen a varios tipos de fango, los cuales han sido utilizados en la agricultura, y son una fuente de nutrimentos para las plantas aunque en ocasiones la presencia de elementos y compuestos tóxicos limita su uso extensivo y por ello, deben analizarse éstos y los suelos, y cuidar de que no se alcance los valores límites de toxicidad en el suelo.

Aplicaciones elevadas de lodos albañales pueden originar que incremente el contenido de nitrato del agua del suelo, aunque el peligro es menor si el lodo está seco por su mayor relación C/N. Se consideran adecuadas aquellas aplicaciones que no superen los 200 m^3 de fango digerido (5% de materia seca $\cdot \text{ha}^{-1}$, anualmente). Con esa dosis se cubren las necesidades de nitrógeno (equivale a 200 o 400 Kg de N/ha) y de fósforo, se incrementa el rendimiento de los cultivos y se obtiene un efecto residual beneficioso durante 5 años sin contaminar el manto freático (El Bassam y Tietjen, 1977)

El valor principal del fango como abono radica en su paulatino aporte de nitrógeno y fósforo, además es un método fácil de deshacerse de este material a un costo mínimo. Los tratamientos usuales de las aguas albañales y de sus productos derivados, inclusive la digestión y el secado, aunque reducen el número de organismos patógenos no los eliminan totalmente, no obstante, muchos expertos consideran que el fango seco, y en especial el secado artificialmente por calor, puede ser usado sin peligro como fertilizante en cualquier cultivo (Ignatieff y Page, 1964).

En los EE.UU se utiliza la técnica a nivel industrial de transformar los lodos mezclándolos con aserrín y compostándolos, ello permite obtener un producto estable como resultado de la acción de los microorganismos aeróbicos que originan temperaturas en el rango de la pasteurización (55° a 70°C) con lo cual se destruyen organismos patógenos. El producto final es incoloro y sirve de acondicionar del suelo y fuente de nutrimentos para las plantas.

En una experiencia de campo de larga duración realizada para evaluar biosólidos (lodo de depuradoras) y compost de residuos sólidos urbanos sobre las principales propiedades químicas de un suelo degradado de la Comunidad de Madrid (*Lithic xerorthents*). Existió un considerable aporte de metales pesados con ambos residuos, en consecuencia los metales asimilables aumentaron con el tiempo, a pesar de ello, parece no existir un riesgo potencial ambiental, aunque será necesario continuar con este estudio para observar la evolución de los diferentes metales pesados a medio y largo plazo con objeto de detectar posibles modificaciones que pudieran incidir en la movilidad y biodisponibilidad de estos (Martínez et al., 2001).

9.5.4. Basuras urbanas

La composición de las basuras urbanas es muy variable en dependencia de las costumbres de la población, su nivel de vida, el clima y otros factores. A modo de ilustración en Managua, Nicaragua se obtuvo la siguiente composición de la basura de esa ciudad (Thienhus et al., 1983).

<u>Desecho</u>	<u>Porcentaje en peso</u>
Vidrio	5%
Metales	7%
Plásticos	4%
Trapos	8%
Papel y cartón	11%
Otras materias orgánicas.	63%

La utilización de la basura urbana puede originar inmovilización del nitrógeno y el fósforo y toxicidad por el Cl sino se espera cierto tiempo después de su aplicación para que termine el proceso de inmovilización, comience la mineralización del nitrógeno y el fósforo y se lava el cloro (Koma Alimu et al., 1977).

Es preferible cuando se pretende emplear basura como abono orgánico compostar ésta para obtener un producto con propiedades físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para su utilización debiendo separarse antes o después de la fermentación aquellos materiales que dificultan su aprovechamiento como abono (Vidrio, Metales, Plástico).

El compost o composte es una mezcla de materias orgánicas de origen vegetal o animal, o de ambas, parcialmente desintegradas y puede contener también ceniza y cal. El composte se puede preparar basado en basuras urbanas y excrementos humanos en fosas de unos 8 metros de largo, 2 de ancho y uno de profundidad con capas alternas de desperdicios domésticos (15cm.) y de excrementos humanos (2-3cm.). Una vez llena la fosa se cubre con una capa de 20 cm. de basura y otra de 5 cm. de tierra, dejando que se descomponga por espacio de 4 a 6 meses, después de lo cual se extrae el abono y se esparce en los campos (Ignatieff y Page, 1964).

Los residuos urbanos contienen cantidades más elevadas de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) que los suelos, por ello su aplicación a razón de 100 t/ha incrementa marcadamente la concentración de (HAP) en los suelos, pero es alentador que ello no suceda en las plantas donde dichos compostes se han empleado. Cuando el composte se elabora utilizando la basura urbana con excrementos humanos se prefieren los métodos aeróbicos a los anaeróbicos para compostar pues el proceso dura menos tiempo y el mal olor no se produce (Flait et al., 1977).

En Alemania el método más usado es mezclar 3 partes de basura orgánica con una parte de agua negra para formar briquetas, las cuales después de 2 semanas de compostar se pulverizan (Thienhaus et al., 1983). Para países tropicales donde los fertilizantes resultan escasos y costosos y es difícil mantener un nivel de materia orgánica en los suelos y protegerlos de la erosión el composte es de gran interés.

9.5.5. Soluciones posibles con los residuos urbanos

Los desechos del metabolismo humano podrían ser separados en sólidos y líquidos, mediante el empleo de servicios sanitarios ecológicos, que hagan posible obtener biogás, y emplear los lodos en la agricultura. Ya se trabaja con una visión mayor, como es, lograr viviendas urbanas, parques y en resumen ciudades que armonicen con el medio ambiente, el entorno y el paisaje (Lina Maria et al., 2010; Gómez et al., 2010; Naranjo y Cristóbal Ríos, 2010).

Los residuos de las limpiezas en los hogares, contienen detergentes, grasa, polvo, etc. y sólo podrían ser utilizados en el fertirriego de los cultivos si sus componentes son biodegradables, no contienen compuestos tóxicos y las grasas son segregadas mediante trampas. De reunir los residuos líquidos de las industrias urbanas esos requisitos podrían unirse a estas.

Otro enfoque sería el tratamiento biológico de las aguas residuales, cuyos principios fundamentales han sido extendidos en las últimas décadas y ya existen ecuaciones que interpretan con aproximación satisfactoria los fenómenos que gobiernan los procesos de tratamientos de aguas residuales (Crites y Tchobanoglous, 2000; Ramón y Gualdrón, 2010). Entre otras tecnologías se encuentran los procesos de oxidación avanzada como el ultrasonido, la ozonación, la oxidación catalítica, la degradación con rayos ultravioletas y con luz solar, la sonólisis y la fotólisis en la degradación de contaminantes persistentes (Jáuregui-haza et al., 2010).

La basura urbana podría ser separada en dos componentes desde los hogares, básicamente en: biodegradable (orgánica) y no biodegradable (metales, cristales, etc.). La última es materia prima para determinadas industrias y la biodegradable podría ser utilizada como fuente de energía o materia prima para elaborar compost.

En Bogotá por ejemplo, desde el año 2004, se realiza el Programa Distrital de Reciclaje, con el propósito de lograr aprovechar los residuos que se producen, generando un manejo ambientalmente responsable de los mismos, incluyendo a la población de recicladores y generando un valor agregado a la cadena productiva (Moscoso y Pedraza, 2010).

9.6. Plantas acuáticas

Las plantas acuáticas que normalmente cubren ríos y lagunas y son indeseables, pueden ser cosechadas mecánicamente. Estas plantas poseen diferentes ventajas sobre el medio ambiente y beneficio económico, entre ellas se puede citar su utilización como abono orgánico.

Bibliografía Consultada

Arteaga, O.; Chongo, R.; Portieles, J.M.: Consideraciones sobre el uso del estiércol vacuno como fertilizante para pastos. Boletín de reseñas. Suelos y Agroquímicos. La Habana, Cida, 1981.

Arteaga, O.: Utilización eficiente del estiércol vacuno como fertilizante para la producción de forraje, en suelos Pardos Grisáceos de Cuba. Tesis en opción al grado de Candidato a Doctor. U.C.L.V., 1988.

Arzola, N.: Utilización de la cachaza en el cultivo de la Caña de Azúcar, Serie Caña de Azúcar No. 10, 1968.

Arzola, N.: La cachaza como fertilizante en suelos ferralíticos rojos, Serie Caña de Azúcar No. 64, 1976.

Arzola, N.: Comparación del estiércol vacuno y el ovino como abono orgánico, Revista Centro Agrícola, (2) 12(1985) 89-96 pp.

Arzola, N.: Efecto de dos métodos de aplicación de la cachaza sobre algunas características del suelo, Boletín INICA, No. 3(1986) 38-49 pp.

Arzola, N.: Aprovechamiento de residuos de origen orgánico en la Agricultura. Curso de postgrado impartidos en el ISACA. Ciego de Ávila. (1989): 120pp.

Arzola, N.; Monomou, S.: Transformación de la cachaza en dos tipos de suelos cubanos. Revista Centro Agrícola, (8) 1(1981)87-103 pp.

Arzola, N.; Alfonso, J.: Evaluación de la aplicación de agua de cachaza en condiciones de producción Revista Centro Agrícola 9(2)(1982)89-111pp.

Arzola, N.: Estudio sobre la posibilidad de aprovechamiento de residuos de la Papelera Damují como abono, Revista Centro Agrícola, (1) 12(1985) 25-36 pp.

Arzola, N.: Utilización de los fertilizantes convencionales y no convencionales en la agricultura cañera cubana. Memoria II Congreso ATAC, Cuba 1991.

Arzola, N.: Empleo de fuentes alternativas de nutrientes en caña de azúcar. Cuba Azúcar. No 4.Vol 29(2000):48-51pp.

Arzola, N.; Cairo, P.: Monografía sobre los suelos y la fertilización de la caña de azúcar, Revista Centro Agrícola, (1) 12(1985)1-131 pp.

Arzola, N.; Reyes, C.; González, S.: Caracterización en la zafra de las aguas residuales de varios centrales de la Provincia Cienfuegos, Boletín INICA, No. 1(1986) 31-42 pp.

Arzola, N.; Paneque, V.: La cachaza como enmienda orgánica y fertilizante de la caña de azúcar. INCA. Folleto Divulgativo, 1990.

Arzola, N.; Corona, D.: Influencia de elementos naturales sobre el cáncer en el hombre. Forum de Ciencia y Técnica. Cienfuegos, 1992.

Arzola, N.; Yera, B.: Utilización del residuo de elaboración de levadura torula para la fertilización de la caña de azúcar. Centro Azúcar. Año 22. No 2(1995a):73-77pp.

Arzola, N.; Yera, B.: Posibilidad de empleo en el fertirriego de la caña de azúcar del efluente del patio de bagazo y el de elaboración de azúcar crudo del central. Centro Azúcar. Año 22. No 2. (1995b) 87-91pp.

Arzola, N.; Yera, B.: Perspectivas para el aprovechamiento del residuo de la papelera "Sergio Gonzáles" en la irrigación de la caña de azúcar. Revista Centro Azúcar 1/95(1995c) 23-29 pp.

Arzola, N.; Blanco C.; Julia Martín: Mayores ganancias mediante el empleo de cachaza en los cañaverales. Revista Cuba & Caña, No. 1, 1996.

Arzola, N.; Yera, B.: Uso de los residuos de origen orgánico en la agricultura. Memorias del 6^{to} Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe (ATALAC). Guayaquil, Ecuador, 2006:289-298pp.

Arzola, N.; María Fernanda Alcivar: Instructivo para la elaboración de compost. Avances en el manejo de los suelos y el empleo de los fertilizantes y enmiendas en el ingenio Ecudos S.A. La Troncal. Memorias del curso de postgrado "Manejo de Suelos, Fertilizantes y Enmiendas". Ecuador, 2010 (CD con ponencias).

Arzola, N.; García, E.: La agroindustria de la caña de azúcar como alternativa de protección ambiental y producción de alimentos en Venezuela. Diversificación 2011. Barquisimeto, Venezuela, 2011.

Bertín, L.: La tierra nuestro planeta. Editorial Labor. S.A. Barcelona. 1965:19-65pp.

Botero, R.: Manejo de excretas en sistemas agropecuarios integrados amigables con el ambiente tropical. Segunda cumbre internacional de agricultura sostenible. Guayaquil, 2006 (CD con ponencias)

Cairo, P.: Relaciones entre la materia orgánica y las propiedades estructurales de los suelos. Centro Agrícola 9 (2) (1982) 73-79pp.

Carnargo, O. A. de J.; Valladares, M. A.: Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo. Campinas Inst. Agrônômico. Boletim Técnico 76(1983): 30 pag.

Crites, R.; Tchobanoglous, G.: Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Editorial MCGRAW – HILL INTERAMERICANA. 2000.

Daniela Fernández, D.; Claudia I.; Peláez C.; Elizabeth Lázaro T.; Graciela Delgadillo G.; Soledad Carreto G.: Recuperación de un suelo abandonado y contaminado. XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo (CLCS).Varadero, Cuba.2001.

David, E.: Caña de azúcar y alcohol. Revista ATAC N° 40(1981) 4-7pp.

El Bassam, N.; Tietjen, C.: Municipal slugged as organic fertilizer with special reference to the heavy metals constituents. IAEA (1977) 253-256pp.

Ferreiro, E.; Monteiro, A. : Boletim Técnico Coopersucar. Sao Paulo. Brazil, 1987

Flaig, N.; Nagar, B.; Socating, H.; Teitjen, C: Organic materials and soil productivity. FAO Soils Bulletin, 1977.

Jáuregui-haza, U.; Aguilera, Y.; Katia González: La sonólisis y la fotólisis en el tratamiento de aguas residuales.VI Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medioambiente.15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura.Cujae.Habana.2010 (CD con artículos).

Judith Carreras García; Ana Aladro León; Laura Martín Murillo; Anabella Rosemberg: Consecuencias del cambio climático el contexto Andaluz. Implementación del Protocolo de Kioto en Andalucía y diálogo social. Depósito Legal: M-4521-2007

Gloria, N. A.; Magro, J!.-A.: Utilização agrícola de resíduos da usina de açúcar e destilaria na usina da Pedro Serrano. Em: Seminário Coopersucar de Agroindústria Açucareira, 4, Água de Kindoria, Anais São Pulei Coopersucar(1976): 163-180pp.

Gloria, N. A.; Santa Ana, A. G.; Figueiredo, A. A. M.; Filho, O.;Biagil, E.: Uso de vinhaça em Ca fia de usina de Pedro Serrano. Brasil Acuc. 92(2) (1978) 40-49pp.

Gómez,J.M.;Corral,R.;Arredondo,S.P.;Sáncho-Ferrer,L.;Gómez,L.A.:Cooperación y Desarrollo en Construcción Ecológica.Experiencia de Alternativa Sostenible. VI Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medioambiente.15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura.Cujae.Habana.2010 (CD con artículos).

ICIDCA: Instructivo para la elaboración de Compost (Abono Orgánico) a partir de la agroindustria azucarera. La Habana, 1991: 38pp.

Koma Alimu, Fx.; Soe Agnic, I.E.; Janssen, B.H.: Evaluation of municipal refuse of agricultural use of sewage sludge: II. Effet on soils N and P. J. Environ. Qu'al.6 (1977) 345-352pp.

Leng, T. ; Shukri, M. ; Ong, K.P. ; Zainuriab, A. : Alternative oil palm fertilizer sources and management. Proceedings of Agriculture, biotechnoplogy & sustainability Conference. Volume 3. Malasyian Palm Oil Board. PIPOC, 2009:1413-1443pp.

Lina María Muñoz Campillo; Giraldo, M.; Mary Ofelia Martínez Osorio: Vivienda social urbana para mejorar el confort ambiental en el trópico húmedo. VI Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medioambiente. 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cujae. Habana. 2010 (CD con artículos).

Lorenzo, R.; Cabrera, S.: Influencia de la vinaza como enmendante orgánico y en disoluciones sobre las propiedades agro físicas de un suelo Oscuro plástico. Informe al PCT 008. La Habana. 1990.

Machado, J.; Arzola, N.; Rodríguez, R.: Efecto de la aplicación del residuo líquido de la destilería "Melanio Hernández" sobre un suelo Pardo sin carbonatos. Parte II. Influencia del residuo sobre algunas características del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar, Revista Centro Azúcar, 1/91(1991) 53-61 pp.

Machado, J.; Arzola, N.; Rodríguez, R.: Efecto de la aplicación de residuos líquidos de la destilería "Melanio Hernández" sobre un suelo Pardo sin carbonato; Parte I, Caracterización del residual. Revista Centro Azúcar 2-3/92(1992)61-64 pp.

Machado, J.; Arzola, N.; Rodríguez, R.: Efecto de la aplicación del residuo líquido de la destilería "Melanio Hernández" sobre un suelo Pardo con carbonato. (III). Revista Centro Azúcar 1/94(1994) 30-39 pp.

Martínez, F.; Calero, B.; Calderon, E.; Valera, M.; Ticante, J.: Transformación de los restos orgánicos en los suelos y su impacto ambiental. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Martínez, F.; Cuevas, G.; Iglesias, M.T.; Walter, I.: Efectos de la aplicación de residuos orgánicos urbanos sobre las principales características químicas de un suelo degradado. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Moscoso, A.; Pedraza, G.: Evaluación ambiental y operativa del plan maestro de residuos reciclables en la ciudad de Bogotá (Colombia). VI Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medioambiente. 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cujae. Habana. 2010 (CD con artículos).

Naranjo, R.; Ríos Albuerne, C.: Los elementos del paisaje y su importancia en la arquitectura sustentable. VI Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medioambiente. 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cujae. Habana. 2010 (CD con artículos).

Orlando, F.: Nutrição e adaptação de cana-de-açúcar no Brasil. Sepngg, Planalsucar-Piracicaba, Sp.(1983): 368 pp.

Orlando, F. J.; Silva L. C. F.; Zambello, E.: Agricultural utilization of vinasse in Brazil by means of tank-truck. Sugar Cane (2) (1983): 4-8pp.

Paneque, V.; Martínez, N.; González, R.; Velazco, Ana; Gómez: de la Naval, B.: Utilización de los residuales líquidos de la industria azucarera y sus derivados en el riego y la fertilización de la caña de azúcar como alternativa para disminuir los riesgos de contaminación ambiental. INCA. La Habana (1989):40 pp.

Papavizas, G.C.; Davey, C.B.; Woodord, R.S.: Comparative effectiveness of some organic amendments and fungicides in reducing activity and survival of *Rhizoctonia solani* in soil. Can. j. Microbiol. 8 (1962) 915-923pp.

Ramón J.A.; Gualdron L.D.: Determinación de la estequiometría y cinética de reacción del proceso de degradación aerobia y anaerobia en el tratamiento biológico del agua residual en reactores continuos y discontinuos. VI Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medioambiente. 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Cujae. Habana. 2010 (CD con artículos)

Reinmuth, E.: Phytopatologische Probleme auf dem Gebiet der Bodenfruchtbarkeitforschung. Wiss. Z. Univ. Rostock, Math.- Nat, Reihe 12 (1963) 269-277pp.

Romero, G.; Cruz, A.; Saldaña, A.; González.: Fertilizante y estiércol de bovino sobre el rendimiento de alfalfa. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Sánchez, P.A.: Suelos del trópico. Características y manejos. Traducción al español. Editorial IICA San José, 1981. 671 pp.

Thienhaus, S.; Cattuse, J.; Montenegro, N.; Sánchez, W.; Barrios, A.: El compost abono orgánico efectivo para horticultura en Nicaragua. Anteproyecto para la Jornada Estudiantil Universitaria (Material mimeografiado) Managua, 1983.

Torres, A. y Rivero, C.: Efecto de la incorporación de residuos orgánicos marcados con ^{15}N sobre el nitrógeno en dos suelos venezolanos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba. 2001.

Velarde, E.: Tecnología Ceres para la producción de compost con aereador C715. Ciudad Habana, 2000

“Es importante aprender métodos y técnicas de investigación, pero sin caer en un fetichismo metodológico. Un método no es una receta mágica. Más bien es como una caja de herramientas, en la que se toma la que sirve para cada caso y para cada momento”

Ander-Egg

CAPITULO 10.MÉTODOS Y MEDIOS PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE NUTRIMENTOS DE LOS CULTIVOS.

10.1. Introducción

El rendimiento de un cultivo depende de un factor interno, determinado por su potencial genético y de un gran número de factores externos. De estos últimos, unos pueden ser modificados por el hombre y otros no, lo que se fundamenta en el concepto de agrosistema. Turrent (1985) expresa al respecto lo siguiente:

a.- Un agrosistema de una región agrícola, es un cultivo en el que los factores de diagnóstico (inmodificables) fluctúan en un ámbito establecido por conveniencia.

b.- Dentro del agrosistema, cualquier fluctuación geográfica o sobre el tiempo, en la función de respuesta a los factores controlables de la producción, será considerada debida al azar en el proceso de generación de tecnología de producción.

El concepto anterior, puede ser de utilidad para delimitar la aplicabilidad de los resultados experimentales obtenidos bajo condiciones edafoclimáticas y de manejo previo específicos, así como para proyectar las áreas que deberán considerarse diferentes, con el propósito de establecer una red geográfica experimental en una región o país.

Desde otro punto de vista, una vez establecidos los agrosistemas, los factores que pueden ser modificados por el hombre, son los de mayor interés práctico, por ello deben ser estudiados y en caso de que alguno(s) limite(n) el rendimiento del cultivo corregirse adecuadamente. Un ejemplo al respecto, es el estado nutricional de las plantas y su corrección mediante la aplicación de abonos y enmiendas.

Con el propósito de aplicar racionalmente los abonos y enmiendas en los cultivos económicos, existen diferentes métodos, los que por sus principios, pueden formar tres grupos.

- Métodos biológicos. Con la insuficiencia o exceso de un elemento esencial para las plantas, se afecta su crecimiento y rendimiento, esto es utilizado para conocer el efecto de diferentes tratamientos con fertilizantes en los experimentos de campo, por otra parte, aparecen en algunos órganos alteraciones en forma o coloración, que se conocen como síntomas visuales. En ambos casos es la propia planta la que sirve de indicadora sobre su estado nutricional.

- Métodos químicos. Mediante soluciones químicas, se pueden extraer los nutrientes presentes en los suelos ó los órganos de las plantas. La concentración de los mismos expresará el estado nutricional de la plantación.
- Métodos microbiológicos. Los elementos que resultan esenciales, tanto para las plantas como para los microorganismos, alteran a ambos en caso de insuficiencia o exceso, por tal razón las alteraciones en el desarrollo o peso de los microorganismos incubados en los suelos que se estudian, podrá ser un indicador que refleje el estado nutricional de las plantas.

10.2. Métodos biológicos.

10.2.1. Síntomas visuales.

La insuficiencia o el exceso de cualquier elemento esencial, alterará el metabolismo de las plantas, lo que se reflejará en la acumulación o disminución de determinadas sustancias, que producirán alteraciones en color o forma de determinados órganos (con frecuencia en las hojas). Estos síntomas se diferenciarán de acuerdo a la función fisiológica que realice el elemento en la planta, siendo por ello específicos y pudiéndose apreciar visualmente. Las limitaciones de este método con vistas a detectar insuficiencias nutricionales radican, principalmente en los cuatro aspectos siguientes:

- a.- Si la insuficiencia no es severa, disminuirá el rendimiento del cultivo, a pesar de que no aparezca ningún síntoma visual. En tal caso no se detectará que es necesario aplicar el nutriente y sin embargo se afectará el rendimiento.
- b.- Cuando aparece el síntoma, la planta ha permanecido hasta ese momento bajo condiciones de insuficiencia nutricional. Durante el tiempo transcurrido pueden haber ocurrido afectaciones irreversibles en la constitución de las plantas y disminuir el rendimiento que finalmente se alcance.
- c.- Síntomas similares a los producidos por la insuficiencia de determinado nutriente suelen aparecer por causas ajenas a la nutrición (bajas temperaturas, daños mecánicos, daños por insectos, etc.). Además la identificación resulta muy compleja en aquellas ocasiones en que aparecen combinadas simultáneamente insuficiencias de más de un nutriente.
- d - El diagnóstico depende totalmente de la experiencia y conocimiento del que realiza la evaluación, el cual aún cuando identifique certeramente los síntomas, no puede precisar la dosis de nutriente a aplicar.

Como ventaja de este método puede señalarse que no se requiere de ningún instrumento y que puede realizarse con rapidez en condiciones de campo, además existen plantas muy sensibles a determinadas insuficiencias, que son conocidas como indicadoras y contribuyen apreciablemente a incrementar la precisión de este método (Figura 10.1).



Ca-Tomate



N-Maíz



K-Papa



N-Pino

Figura10.1. Diferentes síntomas de deficiencias nutricionales en cultivos (Bergmann, 1986).

En el caso de deficiencia de un sólo nutrimento o simples, existen posibilidades de identificación de las mismas, a pesar de que se trate de elementos esenciales que coincidan en la formación de algún compuesto en la planta que resulte decisivo en sus sintomatologías. Por ejemplo el N, Mg, S, Mn y Fe intervienen en la formación de la clorofila, siendo la desaparición del color verde de las hojas, característico en todos esos casos. A pesar de ese aspecto común, existen otros que los diferencian y permiten el diagnóstico, como podrá comprenderse al describir los síntomas de ellos:

Nitrógeno. Al faltar la clorofila, aparece la amarilleces de la xantofila y los carotenos, lo que comienza por las hojas más viejas por traslocarse este elemento hacia las más jóvenes.

Magnesio. El síntoma más conocido de deficiencia de este elemento es una clorosis internerval que comienza por las hojas basales y se propaga a las superiores, a medida que la deficiencia se agudiza.

Azufre. Al igual que en las plantas deficientes de nitrógeno se presenta una clorosis seguida en algunos especies por la producción de pigmentos antociánicos, pero se diferencia porque en caso de deficiencia de azufre la clorosis comienza por las hojas más jóvenes, abarcando toda la planta en los casos severos.

Hierro. Se caracteriza por una intensa clorosis internerval especialmente en las hojas más jóvenes, aunque si la deficiencia es muy aguda los nervios secundarios y terciarios pueden también presentar clorosis.

Manganeso. Similar al hierro, pero no en las hojas tan jóvenes, además aparecen manchas cloróticas y necróticas en las zonas internervales de las hojas.

La utilidad de la diagnosis visual, será mayor cuando se trate de una deficiencia simple, no interfieran factores ambientales o de otro tipo, la planta en cuestión sea más sensible a mostrar síntomas y la experiencia del evaluador sea mayor.

Los síntomas visuales son de especial interés en la corrección de insuficiencia de microelementos en algunos cultivos y en la orientación sobre las causas que provocan disminuciones apreciables de los rendimientos en alguna localidad, no obstante, en cualquier circunstancia son una alternativa en manos del agricultor, que no cuesta nada y cuyo diagnóstico es fácilmente comprobable mediante la aspersión o inyección de las plantas con una solución que contenga el nutrimento considerado como causante de los síntomas.

En última instancia, este método servirá de orientación inicial y una vez complementado con otros, permitirá precisar la causa y/o corrección de síntomas atribuidos a una insuficiencia nutricional.

10.2.2. Experimentos de campo

10.2.2.1. Generalidades

En este caso, es la planta, en sus condiciones naturales de crecimiento, la que responde sobre los resultados que podrán alcanzarse con la aplicación de determinados tratamientos (dosis, fuente, momento ó lugar de aplicación). Por esa razón, a pesar de ser este método costoso y el que requiere de mayor tiempo, es por su confiabilidad, el preferido para hacer recomendaciones de fertilizantes en un agro sistema y para la calibración de métodos de diagnóstico químico y biológico.

Entre los componentes de la tecnología agrícola en un cultivo, en que existe fuerte interacción con los factores no controlables de la producción (clima, suelos, manejo previo) se encuentran los fertilizantes. Esto significa que pequeñas diferencias en clima, suelo y manejo pueden originar modificaciones apreciables en los requerimientos de fertilizantes de un cultivo, de lo que se deriva que:

a.- El área que se seleccione para el establecimiento de los experimentos de campo deberá ser lo más uniforme posible en cuanto a características del suelo, topografía ó cualquier otro factor no controlado, para que las variaciones que se obtengan en los rendimientos sean originadas fundamentalmente por los tratamientos comparados.

b.- Las condiciones edafoclimáticas y el manejo previo de las áreas en que se establezcan los experimentos, deberán ser lo más similares posibles a aquellas en que se aplicarán los resultados experimentales. Es decir, representativas del agrosistema que se estudia.

En cualquier experimento, debe procurarse que aquellas variables ajenas a los tratamientos comparados, tengan la menor influencia sobre los resultados que se alcancen, por ello el área debe seleccionarse cuidadosamente, buscándose la mayor homogeneidad del suelo. Además, deberá escogerse un diseño experimental, que permita distribuir las parcelas experimentales en el campo, de forma tal que se

minimicé la variabilidad atribuida a errores provocados por dicha heterogeneidad del suelo y que maximicé la debida a los tratamientos.

Aún cuando para el experimento se logre una correcta selección del área, se escoja un adecuado diseño experimental y se utilicen prácticas agrícolas eficientes y comunes para todas las parcelas (excepto las establecidas en los tratamientos), seguirá existiendo cierta variabilidad desconocida en los resultados, lo que no sólo se deberá a la influencia de factores externos, sino también a la diversidad de características de los seres vivos.

Lerch (1987) expone que suponiendo que se cumplan con todo rigor las condiciones para poder reproducir las experiencias, se sabe que en cada ensayo la reacción de los seres vivos no será exactamente igual, ya que existe una variabilidad natural derivada de las complicadas relaciones de los sistemas macromoleculares. Ello se comprende con claridad en la siguiente afirmación realizada por este autor:

"No son exactamente iguales ni dos plantas de la misma especie, ni siquiera dos hojas de la misma planta, ni dos simples células de la misma hoja en todos los detalles de su estructura y dimensiones."

A pesar de esa variabilidad el rigor en el montaje, conducción y cosecha de un experimento logra que el resultado obtenido sea reproducible bajo igualdad de condiciones, lo que constituye un requisito básico de todo experimento (Lerch, 1987).

Es también requisito que el resultado encontrado sea representativo, pues para poder generalizar es necesario que el conjunto de partida sea igual (o equivalente) al conjunto total de los elementos. Si no se generaliza, no se conocerá lo que va a pasar, sino sólo lo que ya pasó, por tanto, no existirían leyes ni predictibilidad en ninguna esfera del conocimiento humano (Rojo, 1987).

10.2.2.2. Factores a estudiar

Los experimentos en dependencia del número de factores que serán estudiados, pueden ser divididos en dos grupos, que son: 1- aquellos en que se considera un sólo factor (Ej. diferente dosis de nitrógeno) los que son denominados uní factoriales y 2.- aquellos en que se considera la interacción entre diferentes factores (Ej. combinación de dosis de N, P y K) conocidos como poli factoriales.

10.2.2.2.1. Uní factoriales

Estos experimentos contienen menor número de tratamientos y ocupan menor área, lo que no sólo resulta en un menor gasto y mayor uniformidad de las labores agrícolas, sino también en menor heterogeneidad de la superficie del suelo, con lo que disminuye el error experimental.

10.2.2.2.2. Polifactoriales

En estos experimentos, varían al mismo tiempo, dos o más factores, siendo el caso más sencillo el factorial 2^2 , donde se forman sólo cuatro combinaciones de tratamientos. Suponiendo que se ensayan 2 niveles de nitrógeno (N_0 y N_1) y dos de potasio (K_0 y K_1), las combinaciones comparadas serían: $N_0 K_0$, $N_0 K_1$, $N_1 K_0$ y $N_1 K_1$. Estos experimentos tienen como desventaja, el presentar un elevado número de tratamientos cuando se estudian muchas combinaciones de factores; por ejemplo, de

desearse estudiar 4 niveles diferentes de cada uno de los 3 elementos mayores primarios, resultaría un factorial 4^3 , donde se formarían 64 combinaciones o tratamientos. Esto en la práctica resulta muy laborioso, difícil de interpretar y complicado desde el punto de vista de la heterogeneidad del suelo, debido a la gran superficie requerida, aunque este inconveniente se atenúa con los diseños factoriales incompletos, en que sólo se consideran algunas combinaciones de los niveles de los factores.

Antes de decidirse por la realización de un experimento unifactorial o polifactorial, el especialista deberá tomar en consideración la información local existente, por ejemplo, si se desea determinar la dosis de fertilizante mineral a emplear, podrían existir dos opciones:

1ra. Sólo uno de los nutrimentos, se encuentra al mínimo, dentro del conjunto de elementos esenciales para las plantas, mientras que estos últimos están a un nivel adecuado u óptimo. En este caso, bastaría con el establecimiento de un experimento unifactorial, donde los tratamientos estarían conformados por diferentes dosis del elemento limitante caso de existir deficiencia de varios nutrimentos, la situación anterior generalmente se logra artificialmente, mediante la aplicación a todas las parcelas, de un nivel suficiente de cada uno de ellos (niveles de fondo), excepto del que está sometido a estudio.

2do. Existe insuficiencia de dos ó más nutrimentos, por lo que la cantidad óptima de uno de ellos, dependerá de la dosis que se aplique de los restantes, pues existirá interacción requiriéndose de un estudio polifactorial.

10.2.2.3. Diseños experimentales

- Diseños de bloques completos al azar

Las parcelas se agrupan en dos o más bloques completos, es decir, en unidades compactas, en cada una de las cuales están representadas, una sola vez, todos los tratamientos por ensayar; son apropiados para los casos en que se observa una cierta variación del material experimental, siendo función de los bloques absorber tal causa de variación.

En este caso, las parcelas incluidas en un bloque, comprenden todos los tratamientos comparados, constituyendo una réplica. Este diseño es muy empleado en los experimentos sobre fertilización, pudiendo mencionarse en este grupo: el bloque al azar, el cuadrado latino y el rectángulo latino.

Es de señalar, que de acuerdo a la forma en que varían las características del suelo, en el área experimental, deberá seleccionarse el diseño. Lerch (1987) expresa que el cuadrado latino sólo es eficaz, cuando las filas y columnas del campo experimental, se colocan perpendicular a las dos dimensiones en las cuales cambian las condiciones del suelo.

-Diseños aleatorios de bloques incompletos

No todos los tratamientos se encuentran representados en cada bloque y aquellos que lo están representados en uno en particular, se ensayan en él una sola vez. Son apropiadas para los casos en que, siendo relativamente grande el número de

tratamientos por ensayar, alojarlos en bloques completos daría lugar a un mayor nivel de heterogeneidad, por lo que se procede a alojarlos en bloques más pequeños.

10.2.2.4. Evaluaciones y procesamiento de la información

Durante el desarrollo y crecimiento de las plantas, se realizan evaluaciones en las parcelas experimentales, las que dependerán de las características y propósitos de la investigación. Dentro de estas evaluaciones pueden mencionarse, el porcentaje de germinación, la altura, la composición de las plantas ó del suelo y principalmente los componentes del rendimiento ó simplemente el rendimiento y la calidad del producto agrícola.

La información experimental obtenida deberá procesarse biométricamente con el propósito de determinar la influencia que los tratamientos comparados poseen sobre las variables evaluadas.

Partiendo de la premisa de que la información obtenida se ajusta a la curva normal de probabilidades y de que las varianzas son homogéneas es que puede realizar su procesamiento biométrico.

A los datos experimentales, se les realizará primeramente un análisis de varianza y sólo de superar significativamente la F calculada (Cuadrado medio debido a tratamientos) a la F.05 (Cuadrado medio debido al error) de la tabla es que se procederá a dar los pasos que se relacionan a continuación:

10.2.2.4.1. Experimentos uní factoriales

De tratarse de un experimento en que se compara una variable discreta (Ej. colocación del fertilizante; 1.- enterrado en el surco, 2.- superficial en el surco, 3.- enterrado a ambos lados del surco, 4.- superficial a ambos lados del surco), se deberá efectuar alguna prueba de comparación de medias (Duncan, Tukey, Scheffer, Newman Keulls) para determinar cual o cuales tratamientos permiten alcanzar los mejores rendimientos y calidad del producto agrícola.

De tratarse de una variable continua (ej. diferentes dosis de nitrógeno) se determinará el valor mínimo de la misma, con que se alcanzan los mayores rendimientos (o mejores resultados dependiendo del indicador en cuestión) para lo cual, pueden ajustarse las medias de rendimiento (Y) y dosis del nutrimento (X) a una curva de respuesta ó a un modelo discontinuo rectilíneo.

-Curva de respuesta

Se conoce con el nombre de curva de respuesta a la fertilización la relación existente entre el aumento de las dosis del nutrimento y los incrementos de rendimiento del cultivo. Este incremento que resulta de cada adición sucesiva del nutrimento, es cada vez menor, por lo que se ha expresado bajo la denominación de "Ley de los aumentos decrecientes".

Existen diferentes ecuaciones que satisfacen el principio anterior, pudiendo seleccionarse la que mejor expresa los resultados de una data experimental, mediante el cálculo del índice de determinación (R^2), cuyo valor implica un mejor ajuste, mientras más se aproxime a 1; siendo la fórmula para calcularlo la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{(Y \text{ observada} - Y \text{ calculada})^2}{(Y \text{ observada} - Y \text{ media})^2}$$

$$Y \text{ media} = \frac{Y \text{ observada}}{n}$$

De los diferentes modelos (Mitscherlich, curva cuadrática, raíz cuadrada, exponencial, logarítmico) la curva cuadrática se destaca, por su facilidad de ajuste, simplicidad para determinar los niveles del nutrimento agrónomicamente óptimos y admitir datos de declinación de los rendimientos en la zona de exceso nutricional.

Las ecuaciones cuadráticas ($Y = a + bx - cx^2$) permiten predecir el rendimiento (Y), al incrementar la dosis de aplicación de un nutrimento (x). Existe un valor de x con el cual se alcanza un rendimiento máximo (Y), siempre que el coeficiente "b" sea de signo positivo y el "c" lo sea negativo, para ello basta hallar la primera derivada igualarla a cero y despejar x como se ilustra a continuación:

$$y = a + bx - cx^2$$

$$\frac{dy}{dx} = b - 2cx = 0$$

$$x = b/2c$$

De igualarse la primer derivada no a cero, sino a la relación entre el costo de la unidad de abono (q) y el precio de la unidad del producto (p), puede determinarse el nivel óptimo, que es el que brinda el máximo beneficio neto, para la relación q/p existentes, o sea:

$$b - 2cx = q/p$$

De donde:

$$x = \frac{b - q/p}{2c}$$

- Modelo discontinuo rectilíneo

El modelo discontinuo rectilíneo, se fundamenta en un enunciado de Liebig conocido como "ley del mínimo", según el cual, el rendimiento de un cultivo aumentará, sólo si se adiciona al suelo, el elemento que se encuentra al mínimo con respecto a los requerimientos nutricionales del cultivo. Esto significa que cuando el elemento limitante (Ej. N) se añade al suelo, hasta un valor óptimo, otro puede pasar a ser limitante (Ej. K) y una vez añadido este último, otro puede limitar y así sucesivamente, hasta que se alcance el máximo rendimiento potencial del cultivo.

De acuerdo a esta técnica, cuando se añaden dosis crecientes de un nutrimento, el rendimiento incrementará linealmente, hasta alcanzarse un rendimiento máximo estable (RME). El punto de inflexión entre ambas rectas, puede unirse con otra recta

perpendicular al eje de X e indicar así, la dosis mínima del nutriente requerida para alcanzar el máximo rendimiento, en esas condiciones.

En un experimento en que se comparen varias dosis de un nutriente, podrán hallarse más de una recta ascendente y más de un RME, de las que se seleccionará, la que posea mejor ajuste (R^2) para recomendar la dosis.

Para el cálculo de R^2 se considerará la población, dividida en dos subpoblaciones, que son; primera la que se consideró para la recta ascendente y segunda la que representa el RME.

La fórmula será:

$$R^2 = \frac{SCC_t(SCC_1 + SCC_2)}{SCC_t}$$

R^2 = Índice o coeficiente de determinación.

SCC_t = Suma corregida de cuadrados de las desviaciones de la media total.

SCC_1 = Suma corregida de cuadrados de las desviaciones de la media para la primera subpoblación.

SCC_2 = Suma corregida de cuadrados de las desviaciones de la media para la segunda subpoblación.

10.2.2.4.2. Experimentos poli factoriales

En los uní factoriales se considera el procesamiento de la información proveniente de experimentos de campo en que se perseguía determinar aisladamente la dosis de algún elemento, lo que resulta satisfactorio en los casos en que no existen interacciones entre los nutrientes. Cuando dos o más nutrientes ejercen efecto combinado sobre la respuesta del cultivo, los experimentos poli factoriales brindan la posibilidad de determinar la combinación óptima en que ellos deben aplicarse. Para lograr esto, se pueden ajustar los datos a una superficie de respuesta ó a un modelo discontinuo lineal.

Superficie de respuesta

La superficie de respuesta constituye la función que expresa la relación entre las variables independientes o factores del medio con la respuesta del cultivo.

Entre las diferentes ecuaciones que se utilizan, la superficie cuadrática de respuesta, posee la ventaja de ajustarse con relativa facilidad por el método de mínimos cuadrados, comprender tanto la zona de insuficiencia como de exceso nutricional y permitir determinar la combinación de nutrientes con que se alcanza no sólo un máximo rendimiento sino también un mayor provecho económico (dosis óptima).

Las dosis óptimas pueden determinarse, en el caso de una superficie cuadrática de respuesta, de conocerse el costo por unidad de nutriente (qN , qP , qK) y el precio por unidad del producto agrícola (p).

Para ilustrar el cálculo de las dosis máximas y óptimas, se considerará un bifactorial en que se estudiaron diferentes dosis de nitrógeno y fósforo y en que se encontró la siguiente ecuación de superficie cuadrática de respuesta.

$$Y = 18.5286N - 0.1987N^2 + 14.2259P - 0.1211P^2 - 0.2236(N)(P)$$

Se procede a derivar con respecto al nitrógeno

$$18.5286 - 0.3974N - 0.2236P$$

Se procede a derivar con respecto al fósforo.

$$14.2259 - 0.2422P - 0.2236N.$$

Para despejar 2 incógnitas, con 2 ecuaciones puede plantearse la siguiente igualdad.

$$- 0.2236 (-18,5286+0.2236P) = - 0.3974 (-14.2259+0.2422P)$$

De donde, las dosis máximas serían:

$$P= -1.51/-0.0463 = 32.6\text{Kg de } P_2O_5.\text{ha}^{-1} \quad N= 28.3\text{Kg de N}.\text{ha}^{-1}$$

Para determinar las dosis óptimas se seguirá igual procedimiento, sólo que en lugar de igualar las derivadas parciales a cero, se igualarán a la relación q/p del elemento en cuestión, o sea:

Si para N se tiene: $q/p = 2.48$, entonces:

$$18.5286-0.3974N-0.2236P=2.48$$

y si para P se tiene $q/p = 2.45$, entonces:

$$14.2259-0.2422P-0.2236N=2.45$$

En este caso para despejar 2 incógnitas, con dos ecuaciones, se tendrá la siguiente igualdad:

$$-0.2236 (-16.049+0.2236P)=0.3974 (-11.77559+0.2422P)$$

de aquí, que las dosis óptimas serían:

$$P= 23.6\text{Kg de } P_2O_5\text{ha}^{-1} \quad N=27.1\text{Kg. de N}.\text{ha}^{-1}$$

Como es común, las dosis óptimas, resultan algo menores que las máximas siendo evidente en este caso que la mayor ganancia depende de la reducción de la dosis de fósforo.

Modelo discontinuo lineal

Para interpretar los experimentos polifactoriales, también puede utilizarse un modelo discontinuo lineal de respuesta, estableciéndose un RME igual para los nutrimentos en estudio y mediante la inflexión de la curva ascendente calculada para cada nutrimento con el RME, se determinará la dosis de nitrógeno, fósforo y potasio.

10.2.3. Experimentos en macetas

En invernadero se realizan estudios en macetas con suelo, arena o soluciones nutritivas, siendo los primeros los más utilizados y de mayor importancia para los estudios de fertilidad, por tomarse como sustrato el suelo que es el medio natural en que crecen las plantas.

Los experimentos en macetas con suelo, por su facilidad de ejecución, limitados recursos y permitir en breve tiempo comparar un gran número de variantes, deben ser empleados, en lugar del experimento de campo, siempre que el objetivo perseguido sea igualmente alcanzado por cualquiera de los dos métodos ó cuando puedan ahorrarse tratamientos en el experimento de campo, mediante el establecimiento previo de un estudio en macetas.

Desde otro punto de vista el experimento en maceta por realizarse bajo condiciones controladas está expuesto a menos factores de variación ajenos a los tratamientos que el experimento de campo, por ello cuando deseamos conocer de forma comparativa el efecto de determinados tratamientos sobre las características del suelo, composición de la planta, etc. resulta este un económico y seguro método. También cuando se pretende comparar la influencia de suelos diferentes es este un método adecuado pues se reducen a un mínimo las causas de variación que no sean las atribuibles a los propios suelos.

El experimento en maceta permite un mayor control de los factores ambientales y requiere de menos espacio, tiempo y personal para su ejecución que el experimento de campo, pero para cuantificar (por ejemplo niveles de N, P ó K para un cultivo en particular) se hace necesario realizar este último pues las condiciones de la maceta no son iguales a las que se presentan en condiciones de campo, donde el suelo posee estructura natural y existe la influencia del subsuelo. Para realizar una evaluación económica también es necesario el experimento de campo, pues es necesario determinar el rendimiento.

La precisión, ahorro de tiempo y de recursos mediante la correcta utilización de los estudios en maceta, se hace patente en las tesis doctorales de Fundora(1979) que caracterizó las formas de potasio en los principales suelos cubanos y estableció con una planta indicadora, niveles críticos de potasio en suelo, Machado(1980) que realizó similar trabajo para el fósforo y Arzola(1980) que encontró las causas y vías de solución de la muerte de las plantas de arroz en más de mil hectáreas de este cultivo en un área nombrada Majagua en Sancti Spiritus, Cuba.

10.2.3.1. Ejecución de los experimentos en maceta

Como las condiciones son controladas, se pueden regular factores tales como humedad del suelo, luz, temperatura, humedad del aire, etc. de forma tal, que las diferencias encontradas en el desarrollo de las plantas, están determinadas por los tratamientos que se comparan.

Material, tamaño y forma de las macetas

El material de las macetas tiene que ser limpiable, sin que absorba humedad y nutrimentos. Es necesario que mantenga su forma fija y que no se rompa fácilmente.

Las macetas clásicas son las de Mitscherlich, de metal esmaltado, también se usan de cristal y de porcelana, aunque tienen el inconveniente de ser muy frágiles. Las de plástico tienden a sustituir a las otras, el tamaño de las macetas depende de la planta. La forma debe ser cilíndrica.

Generalmente se usan macetas de un diámetro de 15-25cm. y de una altura de 20-30cm. Las de Mitscherlich tienen una ranura en el fondo y se sitúan en un recipiente donde se recoge el agua que escurre (riego a saturación).

Preparación de las macetas

Cuando se va a colocar una lámina de agua (como en el arroz) basta colocar la cantidad de suelo deseada (previamente preparado) en la maceta.

Cuando buscamos regar a saturación colocamos en el fondo de las macetas grava o pedacitos de vidrio, formando una capa de más o menos la quinta parte de la altura de la maceta. El material utilizado con la finalidad de dicho drenaje (vidrio o grava) debe lavarse con ácido clorhídrico previamente y a continuación, con agua para eliminar el clorhídrico, lo que se conoce al no obtenerse reacción con el nitrato de plata.

Humedecimiento del suelo

Las que poseen un orificio en el fondo se riegan hasta saturación, recogándose el agua que percole, la cual se vuelve a aplicar. Cuando se desea regar a un porcentaje determinado de la capacidad de campo, debe estandarizarse previamente el peso de todas las macetas con las gravas y el vidrio molido; luego añadirse el suelo seco, para entonces llevar las macetas al peso deseado mediante la adición del agua necesaria.

Siembra

El número de plantas por maceta depende del tamaño de la planta; si es grande, como el maíz, una sola; si es pequeña, mayor número por ejemplo: cuatro de frijoles, se siembra el doble de semillas que el número de plantas que se dejará. Después de la germinación se eliminan las más débiles.

Realizada la siembra se tapa la superficie de la maceta con una capa de arena de un espesor de 0.5-1cm, para que las semillas no se deshidraten, ya que la siembra es superficial.

Encima de la capa de vidrio o grava colocada en el fondo de la maceta se sobrepone una capa de gasa o lienzo con el propósito de que no caiga suelo dentro del drenaje pues ello afectaría la libre circulación del agua.

Preparación del suelo

El suelo debe ser secado al aire, molido, pasado por un tamiz de 3-5mm, y homogeneizado antes de colocarse en la maceta.

Fertilización

Se mezcla el suelo de cada maceta con el fertilizante antes de colocarlo en ella. Cuando es muy pequeña la cantidad de fertilizantes a aplicar (como es común) se prepara una solución para añadirlo lo más homogéneamente posible.

Colocación de las macetas

Estarán todas bajo las mismas condiciones de luz, temperatura, dirección, etc. Se colocan en grupos de dos o cuatro hileras en la dirección norte-sur y no estarán muy cerca unas de otras para evitar que se hagan sombra.

Las hileras de macetas se suelen colocar en mesas con ruedas sobre rieles. Por el día se tienen protegidas por techos y paredes de tela metálica y al anochecer ó en momentos lluviosos se trasladan a una casa de cristal.

10.3. Métodos Químicos

Dentro de este grupo se tratarán los análisis químicos de suelos y plantas, no obstante, los análisis de plantas podrían también ser ubicados dentro de los métodos biológicos atendiendo a que es la propia planta el objeto de trabajo.

10.3.1. Análisis químico de suelo

Con el propósito de determinar las necesidades de fertilizantes minerales de los cultivos, es este método el que por su facilidad de generalización, rapidez y bajo costo se prefiere utilizar masivamente en una región o país.

Los fertilizantes minerales son costosos y aplicados en cantidades excesivas no aumentan los rendimientos ni la calidad del producto agrícola, sino que por el contrario generalmente afectan esta última, representan una pérdida económica y causan daños al medio ambiente, en tanto que, aplicados en cantidad insuficientes disminuyen los rendimientos y las ganancias del agricultor

La composición y características de los suelos, el clima, factores bióticos y el manejo agrícola, hacen que los requerimientos de fertilizantes minerales sea muy variable y que para lograr precisar cada vez mas lo requerido, el área que representa una muestra de suelo (a partir de la cual se definirá la dosis y formula de fertilizante mineral) debe ser lo más homogénea. En la medida que la recomendación de fertilizante se elabore con información proveniente de menor área, disminuirá el error proveniente de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y será más precisa la recomendación de fertilizantes minerales. Siguiendo ese principio y disponiendo de la tecnología moderna la agricultura en los EE.UU., ha introducido, principalmente en cultivos de cereales, un procedimiento que permite aplicar prácticamente lo que se requiere en cada metro lineal de suelo, surgiendo con ello el término "agricultura de precisión".

El muestreo de suelo tradicional consiste en tomar una muestra de suelo compuesta de varias submuestras de cada unidad mínima de manejo agrícola, lo cual es mucho mas preciso que aplicar una formula y dosis única para una región, pero mucho menos preciso que la agricultura de precisión que toman en consideración que las propiedades de los suelos , varían espacialmente y que los contenidos de nutrientes

del suelo en una misma unidad de muestreo puede variar desde valores bajos hasta altos, lo que sucede también con los demás factores de los que depende la necesidad de fertilizantes minerales de los cultivos.

El análisis de suelo puede servir como guía indispensable para el manejo efectivo de la fertilidad del suelo que ayudará en la preservación de la productividad del sistema agrícola y en la calidad del ambiente para futuras generaciones. Idealmente, el muestreo de suelo debe abarcar lo más que se pueda de la zona de la raíz. Información actualizada y detallada sobre la clasificación del suelo, en caso de encontrarse disponible para el lugar, puede ayudar en la evaluación del subsuelo para la mayoría de los nutrientes, excepto el nitrógeno (Lazcano-Ferrat, 2007).

10.3.1.1. Muestreo de suelo

Hay que diferenciar el muestreo en que se toman varias submuestras para conformar una muestra compuesta que represente una unidad de muestreo, que es al que se refiere este epígrafe, de aquel que se realiza en la agricultura de precisión que será tratado en otra oportunidad.

Todo análisis de suelo, parte de una muestra que debe ser representativa del área o unidad muestreada. Dada la gran variabilidad espacial de las características de los suelos y el gran número de factores que la determinan, esto resulta complejo, particularmente en el trópico. Los principios para realizar el muestreo de suelo son generales, no obstante hay dos condiciones muy diferentes que se presentan cuando se pretende tomar una muestra de suelo representativa de determinada unidad de muestreo; que son:

a) Cuando se ha arado toda la capa arable del suelo, previa a la siembra y fertilización de un cultivo, homogeneizándose con ello el contenido de nutrimentos de la zona donde se desarrollará la mayor parte del sistema radical de las plantas. Esto facilita la obtención de una muestra de suelo representativa de una superficie cultivable.

b) Si una vez que se realiza la siembra, se fertiliza localizadamente, se crean diferencias en el contenido de nutrimentos de diferentes zonas del campo, lo que dificulta la obtención de una muestra de suelo representativa.

En ese caso, en que se localiza el fertilizante y el laboreo es reducido ó nulo se estratifican los nutrimentos (como el fósforo y el potasio) y aumenta la variabilidad espacial.

El tamaño de la unidad de muestreo y el número de submuestras para conformar una muestra compuesta, dependerá de la variabilidad de nutrimentos en el suelo y de la precisión que se desea alcanzar. La cantidad de submuestras que recomienda el Servicio de Extensión Cooperativo de los E.E.U.U., para conformar una muestra compuesta varía entre 10 y 30.

Shulte (1994) concluye que al menos se deben tomar 7 submuestras para conformar una muestra compuesta, representativa de una unidad de muestreo no menor de 2 ha. y que si el fertilizante fue colocado en bandas, especial cuidado deberá ponerse para asegurar igual número de submuestras del lugar en que se colocó el fertilizante (bandas) y del espaciamiento entre surcos.

La muestra de suelo debe proceder del volumen de suelo en que se desarrollan las raíces que deciden la nutrición de la planta y los volúmenes de suelo que se tomen deben ser iguales en toda la sección muestreada. Si se trata de un cultivo donde el sistema radical abarca de 0-25cm., el volumen muestreado de cada uno de esos cm. de suelo será igual, lo cual se logra perfectamente con una barrena que posea un cilindro de igual diámetro en todas sus partes (Figura 10.2).



Figura 10.2. Toma de submuestras de suelo para conformar una muestra compuesta representativa de una unidad de muestreo del ingenio Ecudos de Ecuador (Arzola, 2006).

Cuando se realiza un primer muestreo de suelo con el propósito de diagnosticar la necesidad de fertilizantes minerales a nivel de unidad mínima de manejo agrícola, es conveniente disponer de un mapa de suelo a escala detallada y de los análisis de los perfiles de suelo adecuadamente georreferenciados, esto permite asociar la información de los perfiles con las parcelas de los productores y precisar las características de estas. Conjuntamente con esta información se debe evaluar en cada parcela aquellas características edáficas que se pueden apreciar en el campo directamente (piedras, gravas, etc.).

Actualizaciones posteriores se realizan cada cinco cortes del cultivo (cuando se prepara el suelo para la nueva plantación de caña de azúcar), en estas se evalúan los factores edáficos y se toman y analizan muestras de suelo con el propósito de realizar recomendaciones de fertilizantes y enmiendas que se correspondan con las modificaciones que pueden haber ocurrido en las características del suelo durante el tiempo transcurrido desde el muestreo anterior. Por otra parte, la comparación de los resultados de los análisis de ambos muestreos, informara sobre la evolución favorable o no del sistema de recomendación de fertilizantes empleado y servirá para perfeccionar cada vez mas dicho sistema.

El muestreo establecido para confeccionar una muestra que represente como promedio el contenido de nutrientes de una unidad de muestreo, puede ser mas preciso mientras mas pequeñas sean estas unidades mínimas de manejo agrícola,

pero siempre existirá la dificultad de que dentro del área muestreada han variado espacialmente esos contenidos y ahora están identificados con un valor único, que es superior al de los lugares con valores bajos con respecto a los que poseen mayores contenidos.

10.3.1.2. Selección de técnicas analíticas

Los métodos de rutina de análisis de suelo, persiguen extraer la fracción del elemento, que es asimilable para la planta. Este esquema ideal, no considera la cantidad que de dicho nutrimento está en reserva en el suelo y la facilidad con que ese pasa a la solución del suelo para ser asimilado por la planta. En nutrimentos como el fósforo y el potasio, se han desarrollado métodos que consideran la reserva del elemento en la fase sólida (cantidad) y la habilidad o capacidad del suelo para amortiguar las variaciones que en la actividad del elemento en la solución del suelo (intensidad), ocurren para compensar las pérdidas del nutrimento debido a la absorción por la planta u otras vías de pérdidas.

Con el propósito de perfeccionar y abaratar los costos de los métodos de análisis químico de suelo se busca una solución extractiva universal, que permita mediante una sola extracción, determinar la disponibilidad para el cultivo de varios nutrimentos a un mismo tiempo, lo que ahorraría tiempo y recursos.

Sippola (1994) desarrolló una técnica analítica en que se realiza la extracción de elementos mayores, menores y metales pesados del suelo con acetato de amonio ácido con EDTA (acidammonium acetate-EDTA). Este parece ser un extractante universal, ya que en el trigo, se encontraron buenos resultados, cuando se utilizó ese procedimiento para extraer, fósforo, potasio, magnesio, azufre, boro, cobre, zinc, cadmio, plomo y selenio. La extracción se realiza utilizando acetato de amonio 0.5 M-solución de ácido acético 0.5M con pH de 4.65 y conteniendo 0.02M EDTA. La relación en volumen entre el suelo y el extractante fue de 1 a 10 y el tiempo de agitación de 1 hora. Las determinaciones de los elementos pueden hacerse mediante ICP ó AA espectrometría.

La precisión de un método de análisis químico de suelo será tanto mayor, mientras más se aproxime la porción del nutrimento que con él se extrae del suelo a lo que realmente es extraído por la planta, basado en ello se considerará que un método es adecuado cuando sus valores correlacionan estrechamente con la extracción del nutrimento realizada por la planta y la respuesta de la misma a la fertilización mineral. Para ilustrar este aspecto, puede citarse que en 18 suelos en que se cultivan pastos en Australia, se comparó la relación existente entre el contenido de azufre extraído del suelo por ocho métodos diferentes y la respuesta relativa del pasto a la aplicación de azufre. Para cada solución extractiva, el coeficiente de determinación encontrado, fue el siguiente: I.- agua, 0.45; II.- 0.01M $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (MCP), 0.47*; III.- 0.25M KCl calentado a 100°C, 0.51*; IV.- 0.25MKCl calentado a 80°C, 0.54*; V.- 0.25M KCl calentado a 40°C, 0.73**; VI.- 0.25M KCl calentado a 25°C, 0.30; VII.- 0.25M KCl agitado por 16 horas a 25°C, 0.48; VIII.- 0.5M NaHCO_3 , 0.04. De lo anterior, se evidencia que el mejor método fue el V que consistió en extraer el azufre en solución 0.25M de KCl a 40°C, con lo que se alcanzó un $R^2=0.73^{**}$ (Blair et al., 1994).

Como ningún método analítico reproduce exactamente el mecanismo de extracción de nutrientes que realiza la planta, pues son extractantes químicos y la planta es un ser vivo influenciada por una gran cantidad y variedad de factores ambientales, es

imprescindible realizar estudios de campo para establecer las relaciones existentes entre lo que extrae la planta y lo que extrae el método analítico, seleccionar el que mejor relación guarde y establecer categorías de abastecimiento y necesidad de aplicación del nutrimento en cuestión, es decir, resulta imprescindible la calibración de cualquier método para poder emplearlo en condiciones de producción como guía para diagnosticar la necesidad de fertilizante de un cultivo.

10.3.1.3. Calibración del análisis de suelo

Una vez seleccionados los métodos analíticos que han guardado estrechas relaciones con la extracción del nutrimento y la respuesta del cultivo a la fertilización mineral, deberá procederse al establecimiento del "nivel crítico". Esto es el contenido del nutrimento, por encima del cual, es muy poco frecuente la respuesta a la fertilización mineral y por debajo del cual, es generalmente necesaria su aplicación para que no disminuyan los rendimientos.

Un procedimiento utilizado para determinar el nivel crítico, es el método de Cate y Nelson, el que puede aplicarse gráfica o matemáticamente. Se considera que, en un diagrama de rendimiento relativo vs. análisis de suelo para un nutrimento en particular, la configuración peculiar según la cual, los puntos se dispersan, es útil con el propósito de delimitar los contenidos del nutrimento en el suelo con que pueden separarse mediante la fertilización incremento o no del rendimiento. El rendimiento relativo se calcula de la forma siguiente:

$$\text{Rendimiento relativo} = (\text{Rend. con el nutriente al mínimo} / \text{Rend. Máximo estable}) \times 100$$

En la técnica de Cate y Nelson se utiliza un plástico transparente que tiene dibujado sobre sí dos líneas perpendiculares que forman cuatro cuadrantes. Dicho plástico se coloca sobre el diagrama de dispersión, de tal manera que el máximo número de puntos resulte en los cuadrantes positivos y el mínimo en los cuadrantes negativos. La línea vertical que divide a los dos grupos formados, identifica al nivel crítico del análisis del suelo. Las técnicas matemáticas del modelo discontinuo de dos medias, elaborada por Cate y Nelson, consiste en los pasos siguientes:

1- Los datos son ordenados de menor a mayor de acuerdo a los valores del análisis de suelo (X) y al lado de cada uno aparecerá el valor RR (Y).

2- Comenzando por el valor de X, que ubiqué dos o más puntos a la izquierda de la línea divisoria vertical, se calcula la suma corregida de cuadrados de las desviaciones con respecto a las medias de las dos "poblaciones" que resultan al desplazarse cada valor sucesivo de X. Se determinará entonces la suma de las dos sumas corregidas de cuadrados a cada nivel de X y de esa suma combinada de cuadrados.

3- El cálculo de R^2 se realiza como se ha mencionado con anterioridad, mediante la fórmula:

$$R^2 = \frac{SCCt - (SC_1 + SCC_2)}{SCCt}$$

4.- Para determinar el nivel crítico, se selecciona el punto donde exista mayor R^2 y se promedia el último valor de la población 1 y el primero de la población 2.

Mientras mayor sea el número de cosechas y de suelos que se utilicen para la determinación del nivel crítico, más confiabilidad tendrá el valor obtenido, con el propósito de diferenciar en condiciones de producción las áreas bien abastecidas del nutrimento de las insuficientes.

Otro método para procesar la información experimental consisten en establecer relaciones entre los contenidos del elemento en el suelo y el porcentaje de incremento de rendimiento alcanzado mediante la aplicación del nutriente en cuestión (rendimiento relativo). De esta forma se pueden establecer categorías de necesidad de dicho nutriente de acuerdo a la magnitud del incremento de rendimiento. Otro método consiste en relacionar los contenidos del elemento en el suelo con las dosis óptimas que resultaron de cada cosecha experimental. Esto permite conocer la dosis a utilizar en dependencia del contenido del elemento en el suelo.

Como se puede comprender a partir de todo lo expuesto se requiere disponer para la calibración de gran número de experimentos de campo conducidos bajo diferentes condiciones de suelo, clima y de manejo agrícola.

No debe olvidarse que el diagnóstico de los requerimientos nutricionales de un cultivo está influenciado por una gran cantidad de factores edáficos, climáticos, bióticos y de manejo agrícola y que la investigación deberá seguir precisando los mismos y perfeccionando los sistemas de recomendación de fertilizantes establecidos (Pineda, 2002).

10.3.1.4. Recomendación de fertilizante a partir del análisis de suelo

En la calibración se establece la relación existente entre el contenido del elemento en el suelo y la dosis de nutriente requerida, para ello generalmente deben considerarse otros factores que influyen en la necesidad de fertilizantes minerales, por tanto no basta con disponer del análisis de suelo del área que interese para definir la dosis mediante la relación mencionada.

Un factor que influye en la decisión de la dosis a emplear es el nivel de rendimiento, por ejemplo, el sistema de evaluación de tierras ALES (Automatic Land Evaluation System) resultó un sistema eficiente para el desarrollo del modelo usado para evaluar la aptitud física y económica de las áreas estudiadas, con él se logró recomendar las variantes óptimas de fertilizantes y enmiendas (Hernández, 1995).

10.3.2. Análisis foliar

10.3.2.1. El método de análisis foliar

En tiempos de Liebig se utilizaba el análisis total de la planta, considerándose que con ello se podrían conocer los requerimientos nutricionales de la misma y recomendar la fertilización requerida. Sin embargo, a pesar de que durante medio siglo se realizaron investigaciones en este sentido, ello finalmente fue abandonado, debido probablemente a dos hechos

- 1.- El éxito que obtuvieron los experimentos agrícolas sobre los efectos de los nutrimentos minerales en Rothamsted y
- 2.- Al uso casi exclusivo por parte de los químicos agrícolas, del análisis de suelo como método para diagnosticar las insuficiencias minerales.

Entre los años 1920 y 1930 Lagatú y Maume describieron un método de analizar ciertas hojas de la planta de papa para determinar su estado y necesidades nutricionales.

El método del diagnóstico foliar, se ha extendido a diferentes cultivos y países, atribuyéndosele la ventaja, de que la propia planta, es utilizada como solución extractiva del suelo.

Como en el análisis foliar se determinan los contenidos totales de nutrientes, no existe necesidad de comparar técnicas analíticas como sucedía en el análisis químico de suelos. En el procedimiento para el diagnóstico mediante el análisis foliar es necesario tomar en consideración lo siguiente:

- a) Los factores no nutricionales (edad de muestreo, tejido muestreado, hora de muestreo) deben ser fijos, es decir idénticos entre las condiciones en que experimentalmente se establecieron los índices foliares y en que se aplicaran en las áreas de producción (Alfonso y Arzola 1995a, b, c, d, e, f)
- b) El procesamiento de la muestra al llegar al laboratorio debe estar reglamentado (secado y molinado) (Alfonso y Arzola, 1995d).
- c) El método analítico debe fijar las condiciones para la digestión de la muestra (solución y concentración, temperatura, tiempo, tamaño de muestra y determinación) (Arzola y Reyes, 1988 y 1995).
- d) Los límites críticos de abastecimiento de nutrientes y la necesidad de fertilización mineral debe estar adecuadamente establecida mediante su calibración en experimentos de campo (Arzola, 1998; Arzola y Sánchez, 1983).

Atendiendo a la interpretación de los resultados, la diagnosis foliar puede ser dividida en dos grandes grupos, que son:

- 1.- la diagnosis foliar clásica que tiene como base el nivel crítico (N.C.) y
- 2.- el sistema integrado de diagnosis y recomendaciones (DRIS).

La diagnosis foliar clásica, establece una relación directa entre el contenido del elemento limitante y el rendimiento del cultivo, existiendo un óptimo nutricional, por encima del cual, no es necesaria la fertilización mineral, ese contenido de nutrimento, conocido como "nivel crítico", es establecido bajo determinadas condiciones (edad de la planta, parte de la planta, momento del día, lluvia, variedad, etc.) que deberán ser las mismas o similares, cuando se tome una muestra en áreas de producción ó de no ser así, disponer de valores que hagan posible la corrección de esos factores no nutricionales.

El procedimiento de los niveles críticos para determinar el estado nutricional de la planta, se fundamenta en la composición del tejido analizado expresado en el porcentaje de materia seca. El contenido que en ese mismo tejido, resulta óptimo para el crecimiento y rendimiento del cultivo es el nivel crítico. En este caso se evalúa el estado nutricional de la planta para cada elemento por separado.

Se considera que con el DRIS se clasifican los nutrimentos requeridos por las plantas en función de su orden de importancia, se valoran las interacciones, el balance de los nutrimentos, se detectan excesos relativos y la diagnosis se puede realizar en cualquier estado de desarrollo y para cualquier posición de la hoja (Beaufils, 1973; Summer, 1986).

El DRIS se fundamenta en relaciones entre los contenidos de los elementos en la planta o tejido indicador seleccionado y los requerimientos de fertilizantes minerales

de los cultivos. A este procedimiento se le atribuye la ventaja con respecto a los valores críticos, de que no influyen factores no nutricionales (características del suelo, cepa, lluvia, etc.) que originan variabilidad y enmascaran la interpretación de los análisis foliares (Beaufils, 1973 y Elwali, 1983).

Para establecer este método, es necesario clasificar las poblaciones en su fase vegetativa y productiva y seleccionar la población que presenta condiciones medias de nutrición y producción, la que se denomina como población no anormal. El DRIS es un indicador de los desbalances nutricionales de las plantas a partir de las relaciones entre los nutrimentos (Beaufils, 1973).

El uso de las relaciones entre dos nutrimentos en lugar de la concentración de nutrimentos debe reducir el efecto de la interacción entre nutrimentos, dilución o acumulación de estos con el tiempo, en el tejido de las plantas. Relaciones multinutrimentos pueden ser calculadas y expresar para cada componente de la planta su abundancia relativa, o sea con respecto a los restantes componentes. Si esta relación pretende encontrarse para el nitrógeno se procedería como sigue:

$$N^m = (N/N) (N/P) (N/K) (N/Ca) (N/Mg) (N/O)$$

donde:

O= Otros componentes hasta completar el 100% de la materia seca.

Las ventajas o desventajas del DRIS con respecto a la diagnosis foliar clásica, deberán analizarse, a partir de cuál de ellos, muestra mejores relaciones con la respuesta de la planta a la aplicación de los fertilizantes minerales y a la eliminación de la influencia de los factores no nutricionales sobre el diagnóstico.

10.3.2.2. El muestreo foliar

Existen diferentes porciones o partes de las plantas que se seleccionan como tejido indicador en los diferentes cultivos y un procedimiento que debe garantizar la calidad y representatividad de la muestra con fines de diagnóstico.

10.3.2.3. Interpretación del análisis foliar

Una vez que se disponga de un resultado es necesario disponer de los rangos de abastecimiento establecidos para la adecuada nutrición de la especie vegetal de que se trate para poder diagnosticar el estado nutricional de la plantación.

10.3.3. El laboratorio de análisis de suelo y tejido vegetal

10.3.3.1. Recepción y preparación de muestras

Una vez que las muestras son trasladadas desde el campo al laboratorio, son inscriptas en un documento de entrada donde se relacionan los análisis solicitados en cada caso, entonces son secadas, tamizadas y almacenadas en los recipientes correspondientes para ser procesadas en el laboratorio.

10.3.3.2. Extracción con soluciones, digestión o incineración de la muestra

Atendiendo al análisis deseado las muestras son pesadas y sometidas a la extracción del componente deseado con soluciones químicas, (en el caso del fósforo asimilable existe un gran número de soluciones extractivas diferentes); se somete a una digestión con una solución a elevadas temperaturas (en la determinación de contenidos totales de elementos tanto en suelo como en tejido vegetal, la digestión con ácidos en mezcla con catalizadores es frecuente), o se incinera el material para conocer la composición de sus cenizas o de los elementos que pasaron a forma gaseosa.

En un cubículo se realiza la pesada de las muestras, posteriormente se realiza la extracción y por último la determinación mediante diferentes procedimientos y equipos que serán comentados.

10.3.3.3. Determinación analítica

Una vez realizada la extracción, el próximo paso es la determinación para lo cual, se pueden emplear métodos gravimétricos, volumétricos, y actualmente generalmente se utilizan equipos que registran variaciones de acuerdo a la concentración del componente de que se trate mediante la medición de la corriente eléctrica.

- pH metro

El pH-metro realiza la medida del pH por un método potencio métrico. Este método se basa en el hecho de que entre dos disoluciones con distinta $[H^+]$ se establece una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial determina que cuando las dos disoluciones se ponen en contacto se produzca un flujo de H^+ , o en otras palabras, una corriente eléctrica. En la práctica, la medida del pH es relativa, ya que no se determina directamente la concentración de H^+ , sino que se compara el pH de una muestra con el de una disolución patrón de pH conocido. Cuando el electrodo entra en contacto con la disolución se establece un potencial a través de la membrana de vidrio que recubre el electrodo. Este potencial varía según el pH. Para determinar el valor del pH se necesita un electrodo de referencia, cuyo potencial no varía. Como electrodo de referencia se emplea, generalmente, un electrodo de calomelanos, aunque cada vez es más frecuente utilizar un electrodo de plata/cloruro de plata, que, junto con el electrodo de vidrio, constituye una célula electroquímica. Como paso previo para operar con un pH-metro, es necesario ajustar éste con la ayuda de disoluciones reguladoras de pH conocido. El instrumento en sí consta de un mili voltímetro de corriente continua con un rango o intervalo de medida generalmente comprendido entre -2000 y +2000 mV (aprox. dependiendo del modelo), un electrodo de referencia y un electrodo de vidrio, llamado así por estar formado por una fina membrana de vidrio especial que es sensible a la concentración, o más correctamente, actividad, de los iones hidrógeno de las disoluciones. Este electrodo en realidad es una pequeña celda electroquímica que en su interior contiene una disolución de ácido clorhídrico 0.1 M. La medida del pH de una disolución se realiza introduciendo el electrodo de referencia y el electrodo de vidrio en la misma, creándose una diferencia de potencial entre ambos que es medida por el mili

voltímetro, que se encuentra calibrado para poder leer directamente en unidades de pH, siendo el equivalente de 59 mV igual a una unidad de pH. Esta diferencia de potencial entre ambos electrodos es proporcional al logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógeno.

$$pH = -\log(H^+)$$

- Colorímetro

Un colorímetro es cualquier herramienta que identifica el color y el matiz para una medida más objetiva del color. El colorímetro también es un instrumento que permite la absorbancia de una solución en una específica frecuencia de luz a ser determinada. Es por eso, que hacen posible descubrir la concentración de un soluto conocido que sea proporcional a la absorbancia.

Diferentes sustancias químicas absorben diferentes frecuencias de luz. Los colorímetros se basan en el principio de que la absorbancia de una sustancia es proporcional a su concentración, y es por eso que las sustancias más concentradas muestran una lectura más elevada de absorbancia. Se usa un filtro en el colorímetro para elegir el color de luz que más absorberá el soluto, para maximizar la precisión de la lectura. Note que el color de luz absorbida es lo opuesto del color del espécimen, por lo tanto un filtro azul sería apropiado para una sustancia naranja.

Los sensores miden la cantidad de luz que atravesó la solución, comparando la cantidad entrante y la lectura de la cantidad absorbida. Se realiza una serie de soluciones de concentraciones conocidas de la sustancia química en estudio y se mide la absorbancia para cada concentración, así se obtiene una gráfica de absorbancia respecto a concentración. Por extrapolación de la absorbancia en la gráfica se puede encontrar el valor de la concentración desconocida de la muestra.

- Conductímetro

La conductibilidad eléctrica es una medida para la cantidad de (iones) partículas depositadas en el agua. Esto se determina a través de las concentraciones en sales disueltas. La conductibilidad se ve influida por la temperatura del agua. Una elevación de la temperatura del agua en 1° Celsius aumenta la conductibilidad en un 2 %. Por eso la conductibilidad se pone en relación con una temperatura fija (la mayoría de los aparatos lo hacen de modo automático).

El resultado se produce en $\mu\text{S/cm}$ (microsiemens por cm) o bien mS/cm (milisiemens por cm). El conductímetro se emplea para la medición de salinidad y conductividad.

- Turbidímetro

La turbiedad se origina por medio de sustancias dispersas no solubles en un líquido. Un líquido con enturbiamiento tiene la propiedad de dispersar y reflejar la luz irradiada sobre el mismo. La intensidad de la luz reflejada nos proporciona información sobre la dimensión del enturbiamiento. El turbidímetro es un instrumento nefelométrico que mide la turbidez causada por partículas suspendidas en un líquido. Haciendo pasar un rayo de luz a través de la muestra se mide la luz reflejada por las partículas en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente.

- Espectroscopia

Un espectrómetro óptico o espectroscopio, es un instrumento que sirve para medir las propiedades de la luz en una determinada porción del espectro electromagnético. La variable que se mide generalmente es la intensidad de la luz pero se puede medir también el estado de polarización. La variable independiente suele ser la longitud de onda de la luz, generalmente expresada en submúltiplos del metro, aunque alguna vez pueda ser expresada en cualquier unidad directamente proporcional a la energía del fotón, como la frecuencia o los electrón-voltios, que mantienen una relación inversa con la longitud de onda. Se utilizan espectrómetros en espectroscopía para producir líneas espectrales y medir sus longitudes de onda e intensidades.

La espectroscopia atómica estudia la absorción o emisión de radiación electromagnética por las partículas atómicas. Si se suministra una determinada cantidad de energía a un átomo que se encuentra en su estado fundamental de energía, E_0 , esta energía es absorbida por el átomo saltando un electrón situado en la capa electrónica exterior a un nivel energético superior, alcanzando el átomo un nuevo estado energético E_1 . La cantidad de energía para pasar del estado E_0 al E_1 se conoce como **energía de excitación** y puede suministrarse térmicamente, eléctricamente, por inducción electromagnética, por radiaciones de diversa naturaleza, etc. Cuando el átomo vuelve al estado fundamental cede una cantidad de energía idéntica a la de excitación, emitiendo radiaciones de una determinada longitud de onda.

La ecuación de Planck establece que *"un átomo en estado excitado se encuentra en equilibrio con átomos en estado fundamental emitiendo una serie de radiaciones, a diferentes longitudes de onda, características para cada uno de los diferentes elementos"*.

Se han desarrollado tres técnicas fundamentales para trabajar en espectroscopia atómica: absorción, emisión y fluorescencia. En **absorción** atómica se mide la energía absorbida por los átomos para pasar del estado fundamental al estado excitado; en **emisión** se mide la energía liberada al pasar de estados excitados al estado fundamental. Los espectros de **fluorescencia** se producen cuando la radiación absorbida, de una determinada frecuencia, por los átomos en el estado fundamental, es parcialmente reemitida como radiación de fluorescencia.

La representación gráfica de la intensidad de emisión de esas radiaciones, en función de la longitud de onda, se llama **espectro de emisión**. Los espectros de emisión de los elementos del sistema periódico presentan unas líneas espectrales características, con distinta intensidad y a diferentes longitudes de onda.

Cada elemento presenta sus líneas espectrales a diferentes longitudes de onda y distintas intensidades, la localización de éstas en un espectro permite identificar y diferenciar cada uno de los elementos del sistema periódico, lo que se conoce como **análisis cualitativo**.

Por otra parte, la intensidad de las líneas espectrales de emisión de cada elemento a su longitud de onda característica (línea de resonancia) es mayor cuanto mayor sea su concentración, lo que permite realizar el **análisis cuantitativo**.

La **espectroscopia** es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con aplicaciones en química, física y astronomía, entre otras disciplinas científicas. El análisis espectral en el cual se basa, permite detectar la absorción o

emisión de radiación electromagnética a ciertas longitudes de onda, y relacionar éstas con los niveles de energía implicados en una transición cuántica.

Hay muchos tipos de espectrómetros de masa que no solamente analizan los iones, sino que también producen diversos tipos de iones. Sin embargo, todos utilizan campos eléctricos y magnéticos para cambiar la trayectoria iónica de determinada manera, en el caso de los análisis de suelo y de tejido vegetal es de interés la espectroscopia atómica

El analizador de masa es la pieza más flexible del espectrómetro de masa utiliza un campo eléctrico o magnético para afectar la trayectoria o la velocidad de las partículas cargadas de una cierta manera. Los instrumentos del área cambian la dirección de los iones que están volando a través del analizador total. Los iones incorporan un campo magnético o el campo eléctrico que dobla las trayectorias del ion dependientes en su masa y carga, desviando la mudanza más rápida, iones más ligeros más. Así, el analizador dirige las partículas al detector, variando un campo eléctrico o magnético que se basa en el cociente masa/carga (m/z).

El la fotometría de llama (Figura 10.3) existe el mismo principio que en la espectroscopía de emisión atómica, en ese caso, debe producirse la activación del átomo pasando el electrón de valencia del nivel fundamental a niveles excitados, al volver de ese nivel al fundamental emite energía, se trata de cuantificar la intensidad de la energía emitida por los electrones al volver a su nivel fundamental. La fuente de radiación que provoca la activación de los átomos es una llama.



Figura 10.3: Fotómetros de llama en una mesa de trabajo del laboratorio (Arzola, 2009).

De gran interés en la actualidad para los análisis de suelo y de tejido vegetal son las técnicas siguientes:

-Espectroscopía de emisión atómica (EEA)

Tiene el mismo fundamento que la fotometría de emisión de llama, se trata de conocer si una sustancia está presente en la muestra y en qué cantidad. Tienen la ventaja que permiten alcanzar temperaturas mayores que el mechero, se pueden atomizar compuestos que con el mechero no se podría. De esta forma aumenta el número de elementos metálicos que se pueden analizar haciéndose extensivo incluso a elementos no metálicos: Si, As, etc.

-Espectroscopía de absorción atómica (EAA)

La cantidad de energía absorbida por la muestra será proporcional al número de átomos de la muestra y a la capacidad de cada átomo de absorber energía. Se utiliza en el análisis cuantitativo (Figura 10.4).



Figura 10.4: Equipo de absorción atómica en su mesa de trabajo (Arzola, 2009).

-Espectroscopía de emisión de plasma

Podemos definir un plasma como cualquier volumen de gas con parte de sus moléculas o átomos ionizados y coexistiendo a alta temperatura (8.000 °C) en una sopa de iones, electrones, átomos neutros ó átomos excitados. Tradicionalmente se suele decir que hay cuatro estados de la materia: líquido, sólido, gaseoso y plasma.

Son mezclas de iones positivos y electrones, en igual proporción, además de átomos y moléculas neutras. Se producen sin combustión, conducen la electricidad y son afectados por los campos magnéticos. Su carga global es cero. Presentan varias ventajas frente a otros métodos de excitación, como mayor estabilidad, mayor capacidad de excitación, mejor sensibilidad, límites de detección más bajos. Con los plasmas se forman principalmente iones excitados, por lo que se obtienen **espectros iónicos**.

Existen tres tipos de plasmas: ICP (plasma acoplado por inducción), DCP (plasma de corriente continua) y MIP (plasma de inducción por microondas).

- Equipo de flujo continuo

En el más amplio sentido debemos considerar como tal al procedimiento analítico en el que la concentración de uno o varios analitos se mide de manera ininterrumpida en una corriente móvil de gases, líquidos o sólidos.

En el comienzo de la década de los cincuenta el Dr. Leonard Skeggs la aplicó con éxito a la medida de diferentes parámetros en orina y sangre en los laboratorios de análisis clínicos de los grandes hospitales.

Una variante es el flujo segmentado. Los Standard Methods incluyen métodos por Flujo Segmentado para la determinación de: Cl^- , F^- , NH_3 , NO_3^- , NO_2^- , P, Si, $\text{S}^{=}$, $\text{SO}_4^{=}$, pero además las casas comerciales ponen a disposición del usuario hasta unos setenta métodos de análisis de diferentes tipos de agua, automatizando el trabajo del laboratorio.

Otra variante es el análisis por inyección en flujo (FIA). Es un método de análisis automático basado en la introducción, mediante una válvula de inyección, de una cantidad de muestra líquida, medida con gran precisión, en una corriente que fluye continuamente. La muestra se dispersa en la corriente portadora formando un gradiente asimétrico de concentración de analito. La concentración se mide continuamente mediante una reacción colorimétrica u otros sistemas específicos de detección. El Sistema FIA mide continuamente: Br^- , CN^- , Cl^- , F^- , NO_3^- , NH_3 , NO_2^- , K^+ , P, Si, O_2 , $\text{S}^{=}$, $\text{SO}_4^{=}$.

10.4. Métodos microbiológicos

Los suelos bien cultivados y enriquecidos sirven como excelente medio de cultivo para el crecimiento de muchas clases de microorganismos, los cuales están librando una eterna competencia para conseguir el material nutriente aprovechable. La vida microscópica del suelo está compuesta por bacterias, hongos, levaduras, algas inferiores y protozoos, los cuales compiten entre ellos y con las formas superiores de vida que se encuentran en el mismo medio ambiente.

Los microorganismos requieren, al igual que las plantas, de elementos que les resultan esenciales para completar su ciclo vegetativo o reproductivo, por ello pueden prepararse medios de cultivo con diferentes suelos, y mediante la comparación del crecimiento de un microorganismo sensible a la deficiencia del elemento objeto de estudio, determinar el estado nutricional y el ó los elementos para las plantas.

La determinación de las necesidades en elementos nutritivos se basa principalmente en dos microorganismos: *azotobacter* y *aspergillus niger*. En principio se utilizan una

serie de pipetas microbiológicas y cajas de petri a las que se añade un medio nutritivo completo, sin P y sin K, con un testigo.

Se siembran estos medios con un microorganismo determinado y se incuban en cámara termostática; se pesan los micelios después de 4 días. La correlación entre los vasos de Mitscherlich y Neubauer es del 66 al 90%. Ya que el micelio recogido debe analizarse desde el punto de vista de su contenido en P_2O_5 y K_2O , este método no presenta ventaja alguna sobre los químicos. Por esta razón es cada vez menos empleado acudiendo cada vez más el análisis químico puro y simple.

En la práctica estos métodos no se han difundido con el propósito de hacer recomendaciones de fertilizantes minerales o enmiendas a los cultivos y en todo caso, requerirían de ser calibrados mediante experimentos de campo, para que pudieran ser utilizados como método de diagnóstico.

Podrían existir microorganismos muy susceptibles a las insuficiencias de determinados nutrientes y servir de indicadores con ese propósito, pero siempre sería necesaria la calibración en experimentos de campo, con el cultivo en que se pretenda utilizar este método, además deberán estar bien precisadas las condiciones para el cultivo de dichos microorganismos indicadores.

10.5. Aplicación mecanizada de fertilizantes y enmiendas

La mecanización permite mayor productividad del trabajo, control de la dosis y homogeneidad de la aplicación, también de manera simultánea se puede combinar con otras labores lo que permite mayores beneficios económicos.

Existen diferentes equipos que se utilizan para la aplicación de fertilizantes y enmiendas, en la mayoría de los casos el tractor es el medio de propulsión utilizado y es el que trasmite el movimiento que regula la entrega de fertilizante.

10.5.1. Fuentes sólidas

Existen equipos para aplicar fertilizantes sólidos que poseen una sola tolva y por tanto solo permiten aplicar en un recorrido un solo tipo de producto, generalmente una fórmula de fertilizante, otros, cuentan con dos o incluso tres tolvas lo que hace posible el empleo de fertilizantes simples y ajustar las dosis de acuerdo a las necesidades de N, P y K de cada unidad mínima de manejo agrícola.

Un ejemplo de esta fertilizadora es la F-350 utilizada en Cuba en la fertilización de la caña de azúcar. Un conjunto de factores influyen en el grado de precisión a la hora de fijar la dosis, estos son:

- ◆ Características del fertilizante (granulado ó polvo)
- ◆ Desgaste del sinfín y de las transmisiones.
- ◆ Neumáticos del tractor (desgaste, presión de aire, tipo)
- ◆ Condiciones del campo.
- ◆ Humedad.

La variación constante de estos factores es lo que obliga a calibrar regularmente las fertilizadoras. En la fertilizadora empleada en Cuba para la caña de azúcar (F-350) la entrega depende en primer lugar de la relación de transmisión. La calibración de esta fertilizadora se realiza según un procedimiento descrito por Leiva et al.(1998) e Inédito (1998).

10.5.2. Fuentes líquidas y gaseosas

Los fertilizantes también se presentan en forma líquida e incluso gaseosa como sucede con el amoníaco anhidro que es un gas licuado a presión y que se destaca por su bajo costo (razón lógica pues las fuentes nitrogenadas sintéticas sólidas se obtienen a partir de él) y elevada concentración 82.2% de N.

El amoníaco anhidro se obtiene en la fábrica a partir del nitrógeno atmosférico y el hidrógeno procedente del gas natural o el nafta, desde allí se transportan en semiremolques autocisternas a las bases de almacenamiento, que poseen tanques de 52 a 59 Tm. de capacidad de amoníaco. Desde estas bases se traslada con auto tanques de 6Tm a las unidades productivas desde donde se abastecen las nodrizas que trasladan el producto hasta el campo de aplicación y son las que abastecen las aplicadoras de amoníaco.

De lo expuesto hasta aquí se puede destacar el menor costo del nitrógeno procedente del amoníaco, la facilidad de manipulación (pues no es igual abrir una llave que mover un saco) y la elevada inversión inicial para disponer de este sistema.

La aplicadora posee un equipo dosificador Meter Matic, que consiste en una válvula reguladora del flujo que se coloca en la salida lateral de la válvula combinada del aplicador, para calibrar las dosis que se suministran al suelo. El equipo posee un dial en el cual se encuentra la tabla de calibración de entrega de amoníaco anhidro (Leiva et al., 1998).

10.6. Agricultura de precisión

La “Agricultura de Precisión” consiste en el manejo de las plantaciones en forma diferenciada de acuerdo a las características de cada sitio con el fin de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos y minimizar los efectos sobre el ambiente.

El manejo basado en la media de la fertilidad no es suficiente para mantener rendimientos altos sostenibles en la agricultura. Se sobrefertilizan las áreas de bajo rendimiento y no se aplican suficientes nutrientes en las áreas de alto rendimiento. El continuar con el manejo basándose en la media de la fertilidad solamente incrementa la variabilidad y reduce la productividad de la finca. Cuando estas condiciones se hacen aparentes es necesario iniciarse con manejo por sitio específico. Por otro lado, el manejo por sitio específico requiere que el productor conozca lo mejor que pueda el suelo de su finca. Esto se logra dividiendo los lotes en cuadrículas y tomado muestras de cada una de las cuadrículas. Los sitios de muestreo son georeferenciados con el satélite, de esta forma se puede confeccionar un mapa donde se observe la variabilidad de suelos en el lote y que ayude a entender la fertilidad y otras condiciones que podrían limitar la del sitio (Espinosa, 2001).

Con el advenimiento de las tecnologías de información, que permiten una más rápida y económica recolección de datos, no existe justificación económica ni ambiental para utilizar paquetes tecnológicos fijos para grandes áreas de cultivo, especialmente en lo que se refiere a la fertilización y al control de plagas y enfermedades (Rodrigo, 2001).

La tecnología de AP permite utilizar datos provenientes de diferentes fuentes, por ejemplo, información obtenida por medio de sensores remotos, o simplemente, muestreo directo del campo. En general, se pueden diferenciar dos tipos de datos en el trabajo en AP:

El manejo por sitio específico busca identificar y cuantificar la variabilidad espacial presente en la finca, para luego determinar el impacto de esta variabilidad en el rendimiento. Una vez que se entiende el efecto de la variabilidad se pueden determinar las estrategias que permitan manejarla de modo que se incrementen los rendimientos, se mejore la rentabilidad y reduzca el potencial impacto ambiental de la actividad (Espinosa, 2001).

Existen tres tecnologías o grupos de ellas, claves para la implementación de prácticas de Agricultura de Precisión:

Sistemas de posicionamiento global (GPS): Permiten la localización instantánea (latitud, longitud) dentro de un sitio o lote de producción. Normalmente, a partir de la eliminación de la disponibilidad selectiva, los sistemas de GPS alcanzan una exactitud cercana a los 10 m como máximo. Esto no es suficiente para prácticas de AP, por lo que deben usarse equipos GPS con corrección diferencial (DGPS). Estos alcanzan exactitudes menores a 1 m. Sistemas de información geográfica (SIG o GIS); permiten el manejo y análisis de la información recolectada.

Sensores, equipos y maquinaria especializada: Permiten la recolección de la información en terreno y la aplicación variable de insumos.

El rendimiento es evaluado espacialmente al momento de la cosecha, con la ayuda de un monitor de rendimiento. Se han desarrollado monitores de rendimientos para granos, tubérculos, raíces y uvas viníferas. Los mapas de rendimiento permiten evaluar, por ejemplo, si realmente el factor limitante de la producción fue eliminado o si además existían otros factores que impidieron la respuesta al insumo aplicado (Rodrigo, 2001).

El área de mayor desarrollo dentro de la AP es el Manejo de Nutrientes por Sitio-Específico (MNSE), también llamado Tecnología de Dosis Variables (TDV), que corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes dentro de un lote o sitio de producción (Rodrigo, 2001). Esto implica disponer de una fertilizadora con un sistema automatizado que pueda ubicarse espacialmente por disponer de un sistema de posicionamiento global, que a su vez defina la dosis de aplicación durante su traslado en el campo por contar con un sistema de información geográfica o con sensores y que automáticamente regule la dosis de aplicación de cada nutriente durante su traslado en el campo.

En los cultivos que se cosechan mecanizadamente se puede cuantificar el rendimiento por medio de los monitores que miden la cantidad de grano cosechada a medida que la combinada se mueve en el campo. De esta forma se puede hacer un mapa de rendimiento que indica exactamente el rendimiento de cada sitio en el campo. Con la ayuda del satélite se puede hacer un mapa de rendimientos que permite observar claramente la variabilidad del lote (Espinosa, 2001).

En la actualidad la AP se utiliza a nivel mundial. Algunos ejemplos incluyen la aplicación de AP en plantaciones de té en África, naranjas en Brasil, caña de azúcar en Mauritania, banano en Costa Rica y arroz paddy en Japón y China. En América Latina, Brasil y Costa Rica han invertido más de 5 años de tiempo y recursos en investigación de los usos de la AP (Peña-Yewtukhiw y Grove, 2001).

La base tecnológica de la AP es la toma de datos espacialmente referidos. Con la utilización del sistema "GPS", los datos son georeferenciados en el espacio y en el tiempo (latitud, longitud y algunas veces elevación). Este sistema permite localizar un punto, línea, área o características topográficas de un campo en una posición exacta sobre la superficie terrestre. Por ejemplo, límites de la finca o campo, tipos de suelo,

cultivos, mapas de plantaciones, y otras características geográficas locales. La mayor ventaja de los datos obtenidos con "GPS" es el conocimiento de magnitud de la variabilidad de diversas propiedades de suelos, cultivos o paisaje, en cada campo en particular. De esta forma es posible determinar zonas de manejo homogéneas y mapas de prescripción para la aplicación de diferentes insumos (fertilizantes, semillas, pesticidas, cal y agua) (Peña-Yewtukhiw y Grove, 2001).

Los cartogramas le ofrecen la posibilidad de obtener una visión espacial del contenido de sus áreas a partir de la utilización de la información de la forma geométrica de sus parcelas y la vinculación de esta información con las bases de datos que de ella se maneja

El mapa de rendimientos y el mapa de suelos se confeccionan rápidamente usando los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, Global Positioning System) y los Sistemas de Información Geográfica (GIS, Geographic Information System), una vez que se han colectado y digitalizado los resultados de la medición del rendimiento y del muestreo de suelos en cuadrículas. El GPS está conformado por una red de satélites que transmiten señales que pueden ser captadas por receptores en tierra. De esta forma se puede identificar la latitud y longitud (posición exacta del sitio) en cualquier parte de la tierra. Al medir el rendimiento, así como al muestrear el suelo, se puede determinar exactamente el sitio en el campo para poder regresar exactamente al mismo sitio cuando sea necesario. De esta forma es posible comparar los mapas de rendimiento y de suelo (Espinosa, 2001). El mapeo de suelos utiliza el sistema de cuadrículas y puede utilizar fácilmente GPS para precisión del muestreo (Figura 10.5).

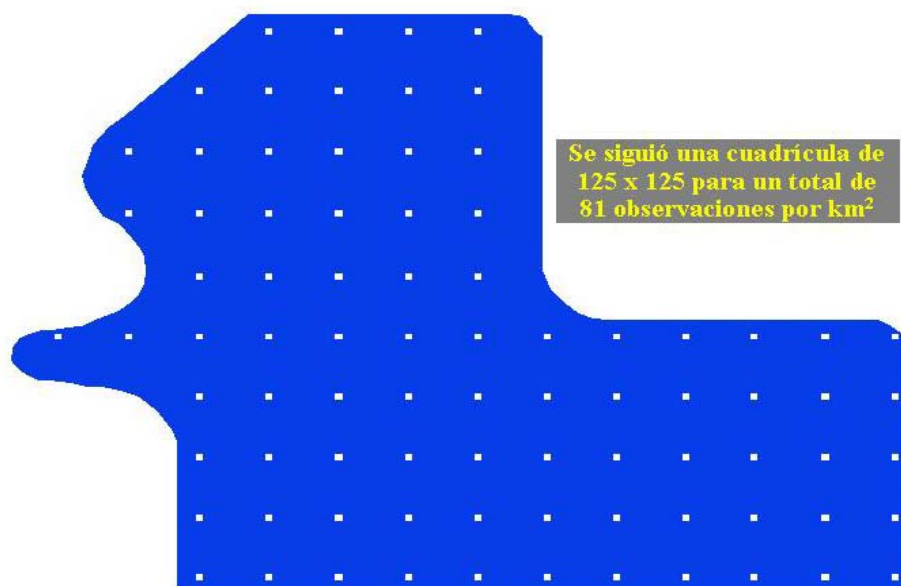


Figura 10.5. Muestreo intensivo para elaborar el mapa de aptitud de suelos para banano (López y Espinosa, 1995 citados por Espinosa, 2001).

Algunos de los programas de manejo por sitio específico desarrollados en Norte América todavía cuestionan si las ganancias en rentabilidad justifican el alto costo de implementación del sistema. Sin embargo, existen otros que no dudan en expresar su satisfacción con el sistema. Con la experiencia adquirida se van desarrollando nuevas formas de interpretación de las bases de datos acumuladas por los Sistemas

de Información Geográfica. En realidad la riqueza y utilidad del sistema radica en la gran cantidad de información que se acumulan en las bases de datos, que ahora pueden ser analizados coordinadamente en una forma nunca antes posible (Espinosa, 2001).

El GIS es un sistema detallado de mapeo que puede delinear en forma digital la variabilidad dentro de un lote como el rendimiento, tipo de suelo, niveles de fertilidad, pH, humedad, etc. Esta variabilidad es la que determina la variabilidad en rendimientos y es la que se debe manejar (Figura 10.6).

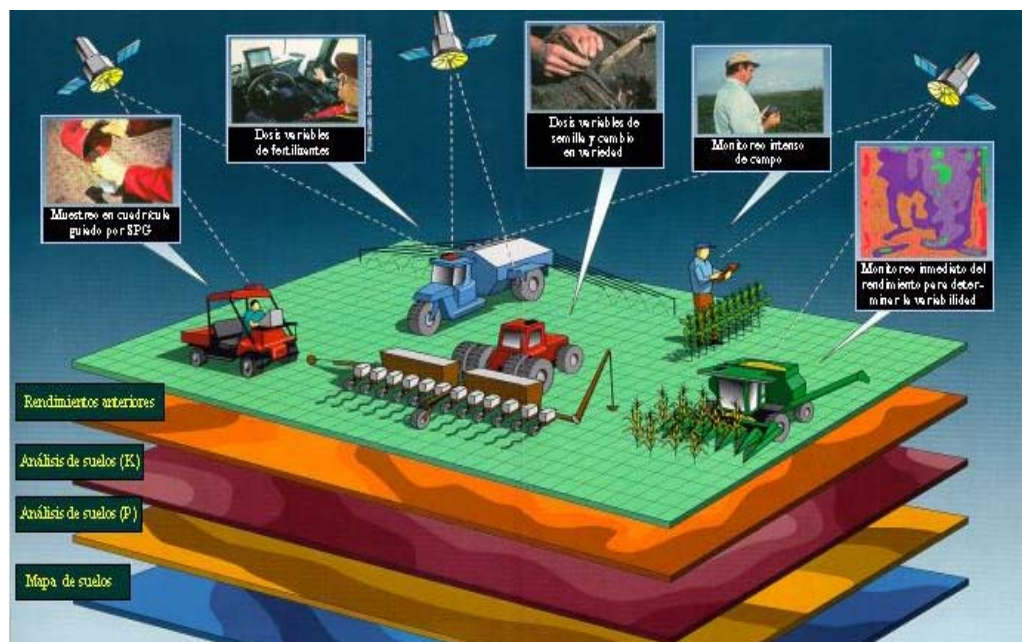


Figura 10.6. Integrados, intensivos de sitio específico para manejo de suelos y cultivos (Espinosa, 2001).

10.7. Visión del desarrollo de los métodos y medios

Los logros obtenidos en el empleo cada vez más racional de los fertilizantes y enmiendas, se han patentizado en mejores resultados económicos, productivos y ambientales de las explotaciones agrícolas. Estos logros, son inseparables del perfeccionamiento obtenido en los medios y métodos utilizados con ese propósito, los cuales han permitido pasar del empleo de formulas de fertilizantes únicas para regiones y/o cultivos, ha dosis de fertilizantes requeridas por unidades mínimas de manejo agrícola y que en la actualidad ya comience a generalizarse (donde existen condiciones y solvencia financiera para la inversión inicial) a la aplicación por sitio específico.

En el futuro, el desarrollo seguirá basado seguramente en utilizar mayor tecnología sobre la base del perfeccionamiento de los métodos y medios que se emplean para alcanzar mejores resultados económicos y ambientales, aunque quizás para ello, se requiera de un nuevo enfoque mas racional. Existe una gran diferencia cuando se hacen comparaciones desde un punto de vista científico entre los métodos aquí tratados con el de las ciencias exactas, como la física y la química, aunque en este

sentido se puede argumentar el nivel cualitativamente más complejo de los fenómenos biológicos.

La tabla periódica de los elementos químicos, deja un lugar para cada elemento, este descubierto o por descubrir y se conocen las propiedades o características esenciales de cada uno de ellos, ningún espacio de dicha tabla puede estar ocupado por dos elementos. Sin embargo, no existe un sistema único de clasificación de suelos, sino muchos, propios inclusive para un país en particular, de esta forma un mismo suelo se nombrara y agrupara diferente de acuerdo a cada sistema.

Los sistemas de recomendación de fertilizantes y enmiendas se han obtenido a través de experimentos de campo, calibraciones y procedimientos biométricos, donde la curva normal de probabilidades ha sido generalmente su fundamento, de esta forma el investigador alcanza un resultado donde tiene muchas más probabilidades de ganar que de perder con su aplicación, sin embargo los modelos de la física son exactos. Una excepción, la mecánica cuántica, emplea las probabilidades, no obstante fue expresado por Einstein que sería desplazada por otra teoría más completa, Dios no se entretendría jugando a los dados.

Es aún largo el camino por recorrer para controlar la nutrición de los cultivos a través de modelos que permitan determinar el suministro de nutrientes de los suelos y la demanda de los cultivos, pero es evidente que el crecimiento demográfico, la disminución de la superficie cultivable, de los recursos naturales y la contaminación ambiental, originan una creciente necesidad de utilizar cada día más eficientemente los fertilizantes y enmiendas y un refrán popular dice que la necesidad es la madre de todas las ciencias.

Bibliografía Consultada

Alfonso A.; Arzola N.: Estudio de diferentes combinaciones de tamaño de muestras y tiempo de digestión en la determinación de nitrógeno foliar. Revista Centro Azúcar 1/95(1995a) 25-27 pp.

Alfonso A.; Arzola N.: Tiempo y temperatura de digestión: dos factores importantes en la determinación del nitrógeno foliar en caña de azúcar por el método Kjeldahl. Revista Centro Azúcar 1/95(1995b) 28-31 pp.

Alfonso A.; Arzola N.: Estudio de algunos factores que afectan la determinación de los elementos mayores en materiales orgánicos por el método Kjeldahl. Revista Centro Azúcar 1/95(1995c) 32-37 pp.

Alfonso A.; Arzola N.: Estudio de algunos factores que afectan la determinación de los elementos mayores en materiales orgánicos por el método Kjeldahl. I. Nitrógeno. Revista Centro Azúcar 2/95(1995d) 16-23 pp

Alfonso A.; Arzola N.: Empleo del peróxido de hidrogeno en la determinación del NPK en hoja de caña de azúcar. Revista Centro Azúcar 3/95(1995e) 30-35 pp.

Alfonso A.; Arzola N.: Temperatura de secado. Su influencia en la determinación del NPK en hojas de caña de azúcar. Revista Centro Azúcar 3/95(1995f) 40-43 pp.

Alkali, A.M.C.; Gaucho, G.I.: Foliar critical nutrients levels and DRIS norms as guides for sugarcane fertilization. Proc. Inter. American Sugarcane Seminar on Soil Fertility and Management, 1983: 20-35pp.

Arzola, N.: Estado actual de los estudios sobre diagnosis foliar en Caña de Azúcar realizados en la costa norte de la Villas, Revista Centro agrícola, No. 3, 1974:49-60pp.

Arzola, N.: Untersuchungen über Wachstumsstörungen von Reis auf einer Boden in Anbaugebiet Majagua, Kuba. Diss z Promotion A K-M-Universität, Leipzig, 1980.

Arzola, N.: Fotos tomadas durante la realización del estudio de suelos para el manejo integral de la caña de azúcar en el ingenio Ecudos S.A.de C.V., Ecuador, 2006.

Arzola, N.: Fotos tomadas en el laboratorio de la Estación Territorial de Investigaciones de la caña de azúcar de Villa- Clara- Cienfuegos. Ranchuelo, Villa Clara, Cuba, 2009.

Arzola, N.; Sánchez, E.: Leaf analysis as a diagnostic method fertilizing sugar cane in Cuba, 6th International Scientific Conference. Problems as an optimum nutrient supply to tropical crop, Leipzig, Germany, 1983.

Arzola, N.; Reyes, C.: Comparación de tres secciones de la hoja del primer dewlap visible como guía para la fertilización de la caña de azúcar, Revista INICA, No. 3, 1988.

Arzola, N.; Reyes, C.: Variación del contenido de NPK y de la humedad de la hoja de la caña de azúcar durante el día. Revista Centro Azúcar 2/95(1995) 82-86 pp.

Beaufils, E.R.: Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant. Nutrition. Soil Science Bul. 1. Universidad de Natal, South African, 1973; 1-32 pp.

Bergmann, W.: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. VEB GUSTAV FISHER VERLAG. JENA, 1986: 306pp.

Blair, J.G.; Lefroy, R. D.; Chinoim, N; Anderson, G.C.: The Development of the KC1-40 Sulphur Soil Test. 15th World Congress of the Soil Science.. Acapulco, México, Volume 5a (1994): 351-363pp.

Carmen Infante, G.: Ciclo del nitrógeno en un cultivo de caña de azúcar. (San Felipe, Edo. Yaracuy). Tesis doctoral. Caracas, 1988.

Espinosa, J.: Manejo de nutrientes en agricultura por sitio específico en cultivos tropicales. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Fundora O. Untersuchungen uber den Kalium-Haushalt wichtiger Boden Kubas. Leipzig. Karl-Marx Universitat, Leipzig. Diss, 1979.

Hernández, J.: Evaluación, manejo y corrección de la fertilidad de los suelos Ferralíticos cuarcíticos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Tesis doctoral. La Habana, Cuba, 1995.

Herrera, J.; Socorro. M.; Cuesta, A.: Método de trabajo agroquímico. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, 1988: 209pp.

Inédito: Sistema mecanizado para la aplicación de fertilizantes (plegable). EPICA Cienfuegos, 1998.

Lazcano-Ferrat, I.: Los resultados de los análisis de suelos como un elemento para el manejo integral del suelo. Artículos técnicos-Agricultura. Argentina, 2007: http://www.engormix.com/los_resultados_analisis_suelos_s_articulos_1699_AGR.htm

Leyva, M.; Suárez, Y.; Velarde, E.: Fertilización mecanizada de la caña de azúcar. En: Elementos básicos sobre suelos y usos de fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar. SERFE, 1998: 133-172pp

Lerch, G.: La experimentación en las ciencias biológicas y agrícolas. Tomo 1. Editorial Academia. La Habana, 1987: 227 pp.

Machado, J.: Untersuchungen uber den Phosphor-Haushalt wichtiger Boden Kubas. Leipzig. Karl-Marx Universitat, Leipzig Diss, 1980.

Martínez, A.: Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Editorial Trillas. México, 1988: 756 pp.

Menéndez, A.: Corrección de las insuficiencias de NPK en caña de azúcar mediante el análisis de tejido. Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Sancti Spiritus, 1991.

Orlando, F°. J. : Nutrição e adubação da cana -de-acucar no Brasil. Piracicaba.São Paulo, Brasil, 1983: 368pp.

Parischa, N.S.: Sulphur Distribution in Alluvial Soils of Punjab. India. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Volume 5b (1994): 180-181pp.

Peña-Yewtukhiw, E.; Grove J.: Algunas consideraciones y ejemplos sobre la investigación en agricultura de precisión en EEUU. XV Congreso. Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Pineda E.: Factores asociados con la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes minerales Tesis de Doctorado en Ciencias Agrícolas, La Habana, 2002.

Rodrigo, B.: Agricultura de precisión: bases y potencialidades del manejo sitio-específico en América Latina. XV Congreso. Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba. 2001.

Rojo, M.: Metodología de la investigación. Ediciones ENPES. La Habana, 1987: 244pp.

Schulte, E.E.: Soil Sampling in No-Tillage Cropping. 15th. World Congress of Soil Science. Acapulco, Volumen 5a (1994): 293-305pp.

Sippola, J.: Acid Ammonium Acetate-EDTA Extraction Method in Soil Testing and Environmental Monitoring. 15th World Congress of Soil Science.. Acapulco, México, Volume 5b (1994):133-134pp.

Sucromer: Estudio de suelos para el manejo integral de la caña de azúcar en el ingenio La Margarita. Veracruz, México, 2003.

Summer, M. E.: The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) as a guide to orchard fertilization. Food and fertilizer technology center extension bulletin N^o 231, 1986.

Turrent, A.: El método CP para el diseño de agrosistemas. Taller del colegio de posgraduados de Chapingo. México, 1985.

"Se debe recordar que el ciclo de los nutrientes en un ecosistema permite la utilización del suelo en armonía con la naturaleza y con un sistema sostenible"

T.Hakamata-H.Hirata

CAPITULO 11.CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL CARBONO Y EL NITRÓGENO

11.1. Generalidades

De los 92 elementos naturales de la Tierra, sólo seis constituyen aproximadamente el 99% de todos los tejidos vivos. Estos seis elementos son el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno, el fósforo y el azufre, a los cuales se los conoce con la sigla CHNOPS. Sin embargo, no son los elementos más abundantes en la superficie de la Tierra.

Los elementos químicos esenciales para la vida, se presentan en la naturaleza en muy diversas formas, orgánicas e inorgánicas, también en muy diferentes medios (agua, tierra, aire), a pesar de esa amplitud y complejidad, no existe un caos, todo lo contrario, hay una secuencia de transformaciones, en un círculo cerrado, en que se pasa de una a otra forma, pero siempre dentro de ese círculo o ciclo.

En la naturaleza son conocidos los ciclos biogeoquímicos de los elementos mencionados, intervienen todos los organismos vivos y la vida es posible gracias a ello, pues si se llegara hasta un compuesto determinado que no se transformara y no se cerrara este círculo, ese compuesto se acumularía y terminaría siendo el único presente en la naturaleza. Lo mismo podría decirse en el caso del metabolismo vegetal donde se presentan ciclos como el de Calvin en la fotosíntesis o el de Krebs en la respiración.

El hombre imita actualmente estos ciclos, bien conocido es el reciclaje de muchos residuos que se transforman así en materias primas para nuevos ciclos productivos, por ejemplo, en el hogar se consumen bebidas, si esos envases no se reciclan y se acumulan en las casas, llegarían a entorpecer el normal funcionamiento familiar, si se botan originarían inmensos basureros, si se reciclan no ocurre lo anterior, se ahorran recursos naturales y se protege el medio ambiente.

En esta oportunidad solo serán tratados los ciclos biogeoquímicos del carbono y el nitrógeno, con el propósito de ilustrar en general la importancia de estos ciclos y la necesidad de que el hombre influya sobre ellos en sentido favorable para la vida.

11.2. Ciclo del carbono

La capacidad de los átomos de carbono para formar enlaces covalentes es de extraordinaria importancia en los sistemas vivos. Un átomo de carbono tiene cuatro electrones en su nivel energético exterior. Puede compartir cada uno de estos electrones con otro átomo, formando enlaces covalentes hasta con cuatro átomos. Los enlaces covalentes formados por un átomo de carbono pueden hacerse con cuatro átomos diferentes (los más frecuentes son hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) o con otros átomos de carbono (Campbell, 1996).

En esencia, la química de los organismos vivos es la química de los compuestos que contienen carbono o sea, los compuestos orgánicos. El carbono es singularmente

adecuado para este papel central, por el hecho de que es el átomo más liviano capaz de formar múltiples enlaces covalentes. A raíz de esta capacidad, el carbono puede combinarse con otros átomos de carbono y con átomos distintos para formar una gran variedad de cadenas fuertes y estables y de compuestos con forma de anillo. Las moléculas orgánicas derivan sus configuraciones tridimensionales primordialmente de sus esqueletos de carbono. Sin embargo, muchas de sus propiedades específicas dependen de grupos funcionales. Entre los tipos principales de moléculas orgánicas importantes en los sistemas vivos están los carbohidratos, los lípidos, las proteínas y los nucleótidos (Campbell, 1996).

Oparin postuló que en las condiciones de la Tierra primitiva se formaron moléculas orgánicas a partir de los gases atmosféricos que se irían acumulando en los mares y lagos de la Tierra y, en esas condiciones (sin oxígeno libre), tenderían a persistir. Al concentrarse algunas moléculas, habrían actuado sobre ellas fuerzas químicas, las mismas que actúan sobre las moléculas orgánicas hoy en día. Estos agregados plurimoleculares fueron progresivamente capaces de intercambiar materia y energía con el ambiente. En estas estructuras coloidales a las que Oparin llamó coacervados (en cuyo interior podían optimizarse ciertas reacciones) se habría desarrollado un metabolismo sencillo, punto de partida de todo el mundo viviente.

Después de surgir y diversificarse la vida en el planeta, hasta llegar a un ser considerado la perfección de la creación, “el hombre”; que comenzó a actuar para cubrir sus necesidades vitales, pero pretendiendo dominar la naturaleza, quizás olvidando de que solo formaba parte de ella y que sus acciones podrían revertirse de forma negativa para su supervivencia.

Dentro de las afectaciones derivadas de la actividad antropogénica, se pueden destacar: el ciclo biogeoquímico de algunos elementos (C, N, H, O, S); la protección de los recursos naturales (que se agotan pues no son infinitos); la producción sostenible de alimentos y de energía para una humanidad que crece.

El ciclo del carbono ha sido uno de los más afectados y preocupantes a nivel planetario (Figura 11.1), principalmente por el denominado “efecto invernadero”, en el cuál intervienen diferentes gases (dióxido de carbono, metano, óxido nítrico, clorofluorocarbonos, ozono y vapor de agua) dentro de estos los compuestos de carbono son decisivos.

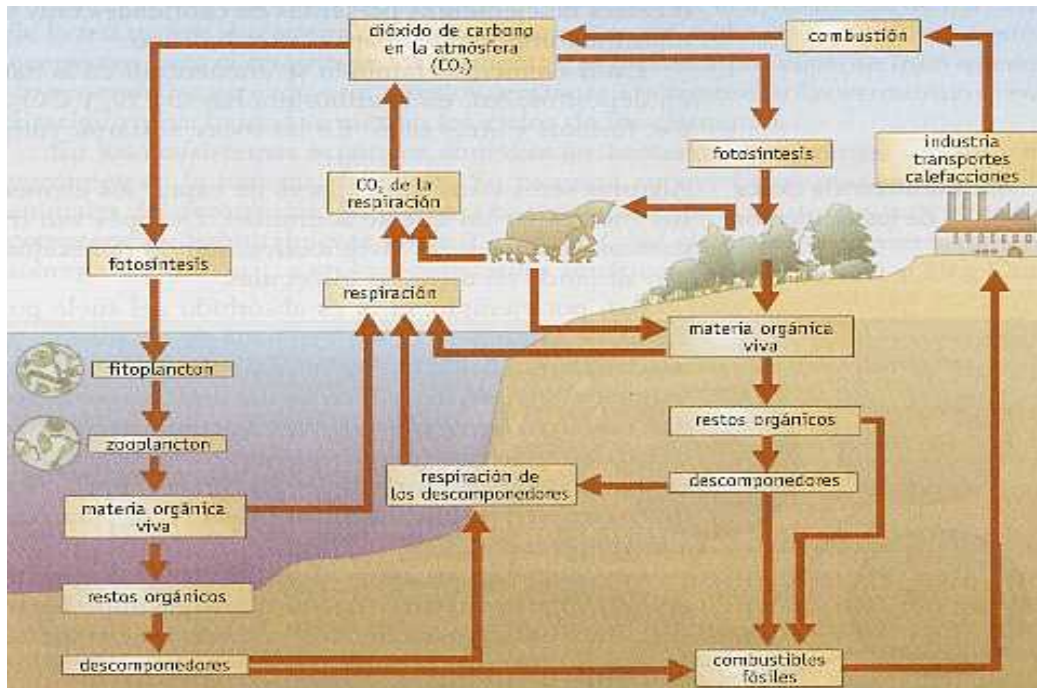


Figura 11.1. Ciclo del Carbono (Anónimo 1)

11.2.1. Distribución del carbono en la biósfera

La biósfera incluye todos los seres vivos que viven en la hidrósfera, atmósfera y geosfera. Esta última tiene un grosor de más de 6.000 km., de ella alrededor de 1 metro corresponden al suelo, el cual, por su papel predominante para la vida dentro de esta capa, sólo será el objeto de atención.

11.2.1.1. Suelo

Un rasgo esencial que diferencia a los suelos de muchos materiales geológicos es la presencia de materia orgánica. La cantidad y las propiedades de la materia orgánica contribuyen a determinar los procesos de formación de suelo así como sus propiedades bioquímicas, químicas, físicas y su fertilidad. La materia orgánica afecta la composición y la movilidad de los cationes absorbidos, el color del suelo, el balance de calor, la densidad aparente, la consistencia y la densidad real (o de partículas) de la fase sólida. La influencia global de la acumulación de materia orgánica generalmente conduce a una mayor fertilidad, con lo cual el mayor contenido resultante de humus a menudo sirve como un primer indicador de suelos fértiles.

El carbono es el componente mayor de la materia orgánica del suelo y es importante como fuente principal de CO_2 . El humus es a su vez un reservorio de C sensible a los cambios en el clima y en las concentraciones del CO_2 atmosférico. El C orgánico se encuentra en las células de los microorganismos, en los residuos de vegetales y animales en diversos estados de descomposición y en compuestos casi inertes y altamente carbonizados como el carbón vegetal o el grafito.

Como componente principal de la materia orgánica del suelo, la determinación del C orgánico sirve indirectamente para calcular la materia orgánica usando un factor de corrección aproximado. El factor 1,724 se ha utilizado durante muchos años para tal fin y se basa en la aceptación de que la materia orgánica contiene 58% de C orgánico. La bibliografía indica que la proporción de C orgánico en la materia orgánica del suelo para un conjunto de suelos es muy variable, por lo cual todo factor constante que se seleccione es solamente una aproximación. Diversos estudios han indicado que para los subsuelos debería usarse un factor mayor que para los horizontes superficiales. Estos últimos raramente poseen un factor menor de 1,8 y con frecuencia varía entre 1,8 y 2,0.

De todas maneras, el factor 1,724 ha sido incorporado en la mayoría de los países como valor estándar para la conversión de C orgánico a materia orgánica. Pero a su vez, tomando en consideración que el factor no es preciso, se ha hecho cada vez más habitual determinar el contenido de C orgánico y expresarlo como tal, en porcentaje en peso, sin convertirlo a materia orgánica. La determinación en el laboratorio se basa en la oxidación del C orgánico con bicromato de potasio (método de Walker –Black), generalmente sin aplicación de calor externo. Este método, utilizado casi sin excepción en todos los laboratorios de suelos, determina las formas más activas del mismo pero no alcanza a oxidar completamente estos compuestos y sus autores establecieron, ya en 1934, que el método recuperaba; aproximadamente el 76% del C orgánico. Por ello propusieron un factor de corrección de 1,32 para incluir el C orgánico no recuperado y otros autores incluso señalaron que el porcentaje de recuperación en una amplia gama de suelos variaba entre 63 y 86%, por lo cual el factor debería variar entre 1,16 y 1,59. Por lo expuesto, la determinación del C orgánico del suelo es en realidad una estimación semicuantitativa, aunque no superada por ningún otro procedimiento más satisfactorio en cuanto al tiempo necesario de trabajo de laboratorio y a la precisión del resultado obtenido.

En el suelo, la materia orgánica se transforma, descompone o degrada hasta mineralizarse debido a la acción de microorganismos, todo este proceso natural da lugar a la humificación, proceso evolutivo mediante el cual a partir de la modificación de tejidos originales y de la síntesis de los organismos del suelo, se produce un conjunto de compuestos estables de color oscuro o negruzco, amorfos y coloidales, conocidos con el nombre de HUMUS.

El Humus es una sustancia que se origina a raíz de procesos químicos de descomposición y síntesis de restos orgánicos vegetales, y en menor medida animales, que se incorporan al suelo. La composición química del humus varía porque depende de la acción de organismos vivos del suelo, como bacterias, protozoos, hongos y ciertos tipos de escarabajos, pero casi siempre contiene cantidades variables de proteínas y ciertos ácidos urónicos combinados con ligninas y sus derivados. El humus es una materia homogénea, amorfa, de color oscuro, inodora y con cargas eléctricas negativas.

La formación de agregados comienza por la aglutinación de partículas de arcilla, limo y arena a través de la interacción con microorganismos, raíces de plantas e hidratos de carbono, para formar microagregados, los cuales a su vez se unen generando macroagregados(>250µm). Estas actividades biológicas son fundamentales para formar agregados estables, especialmente macroagregados,

los cuales evitan la pérdida de suelo por erosión y permiten obtener suelos bien estructurados (Gupta y Germida, 1988).

Del total de carbono que se aplica al suelo con los residuos orgánicos; una fracción se mineraliza y otra forma un compuesto estable (humus). La tasa de mineralización de los compuestos orgánicos está afectada por la temperatura, humedad, aireación del suelo, método de aplicación del abono orgánico, contenido de lignina y otros poli fenoles, de nitrógeno y de carbohidratos solubles (Rod et al., 1994).

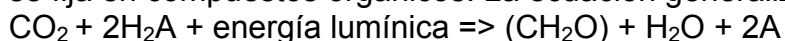
El carbono almacenado en el suelo y en los residuos vegetales de los ecosistemas forestales constituye una parte importante de las reservas totales de carbono. A escala mundial, el carbono del suelo representa más de la mitad del carbono almacenado en los bosques. Cabe señalar, sin embargo, variaciones importantes entre distintos ecosistemas y tipos de bosque. Entre el 80 y el 90% del carbono existente en los ecosistemas boreales está almacenado en forma de materia orgánica del suelo, en tanto que en los bosques tropicales se encuentra distribuido en partes iguales entre la vegetación y el suelo. La causa principal de esta diferencia es la influencia de la temperatura en los índices relativos de producción y descomposición de la materia orgánica. En las latitudes altas (es decir, en los climas más fríos), la materia orgánica del suelo se acumula porque se produce con mayor rapidez de la que se puede descomponer. En cambio, en las latitudes bajas, las temperaturas más cálidas provocan la rápida descomposición de la materia orgánica del suelo y el reciclado subsiguiente de los nutrientes. (IPCC, 2000).

11.2.1.2. Atmósfera

La atmósfera es una capa de aire delgada que rodea la tierra. Alrededor de 80% de la capa inferior está en la troposfera, que se extiende en los trópicos y subtrópicos desde la superficie de la tierra hacia arriba unos 17 Km., pero solo 10 Km. en latitudes más altas.

Actualmente, la atmósfera está compuesta por 78 % de nitrógeno (N₂), 21% de oxígeno, 0,95% de gases raros y 0,035% de dióxido de carbono. También contiene trazas de hidrógeno, vapor de agua, metano, dióxido de azufre, haluros, compuestos nitrogenados volátiles, aerosoles, ozono, metano polvo y ceniza. La vida sobre la Tierra, depende del flujo de energía procedente de las reacciones termonucleares que tienen lugar en el corazón del Sol. Sólo una pequeña fracción de la energía solar que alcanza a la Tierra se transforma, por medio de una serie de procesos llevados a cabo por las células de las plantas y otros organismos fotosintéticos, es la energía que impulsa todos los procesos vitales. Los sistemas vivos cambian de una forma de energía en otra, transformando la energía radiante del Sol en la energía química y mecánica utilizada por todo ser vivo. Este flujo de energía es la esencia de la vida (Campbell, 1996).

En la fotosíntesis, la energía lumínica se convierte en energía química y el carbono se fija en compuestos orgánicos. La ecuación generalizada para este proceso es:



en la cual H₂A significa agua o alguna otra sustancia cuyos electrones puedan ser desprendidos (Campbell, 1996).

La productividad fotosintética es superior en las plantas C₄ en comparación a la que poseen los restantes tipos de plantas (C₃ y CAM). Por su gran importancia como cultivos económicos las C₃ y las C₄ deben ser comparadas; tres importantes

razones explican por qué las plantas C_4 parecen ser más eficaces que las C_3 (Sharkey, 1993):

- (1) las C_4 pueden usar más energía que las C_3 para fijar el CO_2 ;
- (2) pueden utilizar menos nitrógeno; y
- (3) pueden utilizar menos agua.

Las tierras cultivadas en el mundo en la década del sesenta ocupaban un área de $14 \times 10^6 \text{ Km}^2$ y exhibían una producción primaria neta por unidad de área de 100 a 3500 gramo de masa seca por metro cuadrado y por año ($\text{g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) para una producción mundial neta de $1,01 \times 10^{11}$ toneladas métricas por año.

Las plantas cultivadas por el hombre tienen una producción fotosintética variable; correspondiendo las mayores tasas fotosintéticas (20-40 t/ha/año) a las plantas de tipo C_4 . Atendiendo a ello, mucho menos anhídrido carbónico pasara a la atmósfera, si existen plantas C_4 , aunque estas requieren de mayor temperatura, radiación solar y humedad que las C_3 y por ello son propias del trópico.

El actual calentamiento del planeta es originado por la contaminación de la industria (utilizan fuentes de energía fósiles de carbono) y principalmente, por los gases de vehículos automotores que consumen combustibles fósiles (petróleo) lo que provocara un clima caótico con graves sequías, olas intensas de calor, lluvias, ciclones, huracanes y el aumento del nivel del mar en al menos un metro para el 2100 por el acelerado deshielo de los glaciales. Dada la importancia global de este problema se firmo en Kyoto, Japón, en 1997, un protocolo que fue puesto en vigor el 16 de febrero de 2005, aunque se han negado a unirse a este compromiso, con el argumento de que le costaría miles de empleos y frenaría el desarrollo de los países que lo asumieran: Estados Unidos, el mayor contaminador a nivel global, con 25% del total de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), seguido de China, Japón, India, Corea del Sur y Austria.

En Europa se ha estimado que el 80% de la contaminación atmosférica se debe a la combustión de carburantes fósiles ya que el 50% lo aportan vehículos motorizados y máquinas industriales. En Latinoamérica la contaminación ya ha alcanzado límites peligrosos para la salud y el ambiente, sin embargo el uso de combustibles más limpios ofrecen una solución atractiva para este problema ambiental.

La diferencia de temperatura entre el Ecuador y los Polos, regula las corrientes marinas y el clima. En el Ecuador, el agua es más caliente se dilata, es menos densa y va a la superficie, mientras la más fría de los Polos, es más densa, va al fondo, esto origina las corrientes marinas, que como la del Golfo regulan el clima del planeta, pero debido al efecto invernadero se derrite una gran masa de agua dulce de los Polos, disminuye la salinidad y densidad del agua en esa zona, se acortan las diferencias de densidad del agua entre el Ecuador y los Polos y se afectan estas corrientes, por lo que ocurrirán cambios climáticos negativos para la vida, aunque paradójicamente con el aumento de la temperatura debido al efecto invernadero y el derretimiento de los casquetes polares, los efectos sobre las corrientes marinas podrían ocasionar que en algunas partes del planeta el clima sea tan frío que se haga imposible la vida humana.

Los cambios de temperatura no solo se originan por el efecto invernadero, lo que resulta un tema polémico, pues otros fenómenos podrían ocasionar un efecto inverso al esperado desde ese punto de vista. Las erupciones volcánicas vierten gran cantidad de cenizas a las capas elevadas de la atmósfera impidiendo la

penetración de la luz solar, también vierten dióxido de azufre que forma con el agua ácido sulfúrico y actúa como un espejo que refleja la luz solar al espacio, todo ello causa gran enfriamiento en las zonas bajo la influencia de dichas erupciones.

En la actualidad existe un periodo de clima estable y benévolo para el hombre pero se conoce que la órbita de la tierra cambia a través de miles de años. Varía de una forma esférica hasta una ovalada, en este último caso, existe mayor distancia entre el Sol y la Tierra lo que ocasiona un periodo glacial, por ello cíclicamente aparecerá esta catástrofe para la vida, que resulta inversa a la que ocasiona el “efecto invernadero”.

11.2.1.3. Hidrosfera

Está constituida por el agua que se encuentra bajo, y sobre la superficie de la Tierra, bien sean dulces o saladas.

El aumento del contenido de anhídrido carbónico en la atmósfera origina también un mayor contenido del mismo en las aguas, lo que resulta particularmente dañino para los organismos que viven en el agua salada, pues esta se acidifica y consecuentemente se destruyen los arrecifes coralinos que sirven de hábitat a un sinnúmero de animales marinos. Los pequeños organismos, que son la base de la cadena alimentaria y que incluso, constituyen el alimento de los animales más grandes que habitan el planeta, como las ballenas, serán particularmente deprimidos y el impacto para la vida en los mares y océanos será catastrófico.

Los desastres de derrame de petróleo en el mar, como el ocurrido en el 2010 en la plataforma petrolera existente en el Golfo de México, cuyo efecto sobre la vida acuática y las aves ha sido devastador y se prevé que puede durar un siglo, son ejemplos, que conjuntamente con los accidentes navales de barcos petroleros hacen pensar en el grave peligro a que está sometida la hidrosfera por el incremento de búsqueda de petróleo en el mar y el traslado de este combustible por barcos de gran capacidad.

En busca de energía el hombre ha recurrido a la energía del átomo, pero los desastres ocurridos primero en Chernobil (antigua URSS) y recientemente en Japon (en el 2011) con el temblor de tierra y el maremoto ocurrido hacen pensar sobre la seguridad existente actualmente en las plantas electrónicas, ya que material radioactivo se ha vertido al mar.

Debido a la creciente preocupación por la escasez de agua dulce, el debate mundial sobre la gestión de los recursos hídricos se ha centrado en la seguridad alimentaria. Si bien la pregunta formulada con más frecuencia es, si existe en el mundo suficiente cantidad de agua para satisfacer las necesidades alimentarias de una población cada vez mayor, la otra pregunta no menos importante es, si la contaminación con residuos industriales, urbanos y agropecuarios no afectará la calidad de una gran proporción de la escasa agua que esté disponible para el consumo humano, la pesca, la recreación. En este sentido el aprovechamiento de los residuos de origen orgánico como fuentes de agua, nutrientes y materia orgánica en los cultivos es una opción beneficiosa.

El riego consume el 70% de toda el agua que se extrae para uso humano. Hasta la fecha, la agricultura de regadío proporciona aproximadamente el 40% de los alimentos mundiales y representa sólo el 17% de la tierra cultivada (Arellano y López, 2001). Conservar el agua de escorrentía de las lluvias en presas para su

aprovechamiento por el hombre, establecer medidas para el ahorro de este preciado líquido, utilizar prácticas para conservar la humedad de los suelos, aprovechar nuevas fuentes de agua para el riego(como residuos de origen orgánico de la actividad del hombre), son medidas que contribuirían no solo a un mejor manejo del ciclo del agua a favor del hombre, sino también del ciclo biogeoquímico del carbono.

11.2.2. Balance del carbono

El balance se define, como la diferencia de carbono en peso/área (t/ha, Kg/ha), entre la ganancia y la pérdida de carbono y en este trabajo se ha considerado ello, desde el punto de vista de las ventajas para la humanidad, es decir se consideran ganancias, aquellas formas de carbono favorables para la vida y pérdidas lo contrario. Mientras mayor sea esa diferencia en sentido positivo, mayores beneficios se obtendrán para la humanidad y viceversa.

Se ha considerado como ganancia de carbono, la acumulación del mismo en forma orgánica, o sea biomasa formada por los seres vivos en cualquiera de sus formas o restos orgánicos en cualquiera de sus fases de transformación en el suelo.

A mayor diversidad y abundancia de las diferentes especies, podrían aprovecharse mejor las potencialidades de los diversos nichos ecológicos, mayor podría ser la ganancia, no solo por la mayor acumulación de carbono en la biomasa, sino también porque existiría mayor cantidad de materia orgánica potencial para acumularse en el suelo.

La valoración de la diversidad es un tema de la ecología numérica, para lo cual muchos biomatemáticos han propuesto distintos índices para calcularla. En general, se trata de relacionar la abundancia con la divergencia de especies presentes, que en una ecuación muy simple, se podría expresar de la siguiente manera: $D = (\text{Número de especies diferentes} / \text{Número total de individuos})$ (Toro, 2004).

Lo conceptualizado en este trabajo como “pérdidas” de carbono, se refiere a aquellas formas de carbono que contribuyen al actual calentamiento del planeta, como sucede por la contaminación de fábricas, industrias y principalmente, por los gases de vehículos automotores que consumen combustibles fósiles (petróleo). En Europa se ha estimado que el 80% de la contaminación atmosférica se debe a la combustión de carburantes fósiles y a que el 50% lo aportan vehículos motorizados y máquinas industriales. En Latinoamérica la contaminación ya ha alcanzado límites peligrosos para la salud y el ambiente, sin embargo el uso de combustibles más limpios en sustitución a los fósiles, ofrece una solución atractiva para este problema ambiental, como es el caso del etanol, metanol, biodiesel y otros.

11.2.2.1. Ganancia de carbono

Todos los organismos vivos contienen carbono y sus restos aportan este elemento al suelo donde pasa a formar parte de la materia orgánica, por tal razón todos contribuyen en la ganancia de carbono y a contrarrestar el efecto invernadero, pero la mayor importancia en este sentido la poseen los organismos pertenecientes al “Reino **PLANTAE** (plantas)”, los cuales son todos autótrofos con cloroplastos, rodeados de dos membranas de retículo endoplasmático. Se incluyen aquí las

algas rojas (rodófitos), algas verdes (clorófitos) y las plantas terrestres (briófitos, pteridófitos, gimnospermas y angiospermas).

- *Plantas terrestres*

La biomasa producida en un bosque gracias a la fotosíntesis, menos la consumida por la respiración y la fotorespiración, corresponde a la biomasa formada. De conocerse la biomasa fresca formada en un bosque y su contenido de humedad, podría calcularse la materia seca existente y como aproximadamente un 50% de la misma es carbono, sería posible estimar cuanto carbono se mantiene en esa forma en t/ha o kg/ha.

La importancia de las plantas superiores en la liberación de oxígeno y la fijación de carbono, mediante el proceso de fotosíntesis es de tal magnitud que la selva amazónica es conocida como el pulmón del planeta. Las alternativas para utilizar las plantas superiores para almacenar carbono de la atmósfera abarca: conservación de bosques naturales, reforestación, cultivos económicos, jardines, parques e incluso el cubrimiento de las paredes de los edificios con canteros especialmente preparados para sembrar plantas, lo que está surgiendo con fuerza en Japón.

El ambiente de cada planta es la totalidad de las condiciones externas que actúan sobre un individuo o comunidad de organismos (biocenosis) en un territorio definido (biotopo). Se debe buscar o crear el mejor ambiente posible para el genotipo de que se trate para acercarse lo más posible a su potencial de producción de biomasa.

Según los datos del Estado de los Recursos Fitogenéticos en el Mundo para la Alimentación y la Agricultura publicado por la FAO se estima que existen de 300 000 a 500 000 especies vegetales superiores, de las que se han identificado o descrito aproximadamente 250 000. Unas 30 000 son comestibles, y unas 7 000 han sido cultivadas o recolectadas en algún momento por los seres humanos para su consumo alimentario. Por consiguiente, se puede considerar que varios millares de especies contribuyen a la seguridad alimentaria. Sin embargo, a menudo se afirma que sólo 30 cultivos "alimentan al mundo". Estos 30 cultivos aportan el 95 por ciento de la energía (calorías) o las proteínas de la dieta. Solamente el trigo, el arroz y el maíz proporcionan más de la mitad de la ingesta energética mundial derivada de las plantas. Otros seis cultivos o productos básicos, a saber, el sorgo, el mijo, las papas, las batatas, la soja y el azúcar (de caña/remolacha) llevan esa ingestión energética a un 75 por ciento del total. En un examen del suministro de energía alimentaria a nivel subregional se destaca un número mayor de cultivos importantes, como el cacahuete, el guandú, las lentejas, el caupí y el ñame (Vavilov, 1992).

- *Algas*

Las algas realizan el proceso de fotosíntesis, pueblan la hidrósfera, la cual ocupa una superficie mayor que la tierra, por ello, el papel de las mismas como sumidero de carbono es de gran importancia. Se debe destacar la diversidad de especies, adaptadas a diferentes condiciones, un ejemplo muy característico es el alga de las

nieves (*Chlamydomonas nivalis*), que llega a conferir color rojo a la nieve en algunas zonas de montaña a mitad de la estación estival.

De la misma manera que el etanol de celulosa presenta mejores indicadores de balance energético, de uso del suelo y de emisiones gaseosas que el etanol “tradicional”, las algas presentan mejores indicadores en cada una de esas variables para la producción de biodiesel que los que presentan las tecnologías tradicionales a partir de cultivos como el girasol, la soja y la colza. Se trata de pequeñas plantas unicelulares o pluricelulares con capacidad de duplicarse en un período entre 1 y 5 días y cuya cosecha –a diferencia de los tradicionales cultivos energéticos– no se hace una vez al año sino todos los días. Mientras en un acre (0,4 ha) se producen 300 galones de etanol de maíz (1 galón = 3,78 litros) o 60 galones de biodiesel de soja, cada acre con cultivo de algas podría producir 5 mil galones de este biocombustible por año (Honty, s/a)

Buscar alternativas que conlleven al cultivo de algas, resultaría particularmente beneficioso para capturar anhídrido carbónico de la atmósfera y contrarrestar el efecto invernadero.

- *Vida en el suelo*

Todos los organismos vivos presentes en el suelo acumulan carbono en forma de compuestos orgánicos, ese carbono se deriva en el caso de la macro y mesofauna y de los microorganismos heterótrofos, del anhídrido carbónico incorporado a la biomasa de organismos autótrofos que le sirvieron como alimento, por ello, como ganancia neta de carbono solo deben considerarse estos últimos, es decir todos los que realizan fotosíntesis. Los restos de todos estos organismos contribuyen a incrementar el contenido orgánico del suelo, mejorando su fertilidad y almacenando carbono en una forma beneficiosa para el hombre.

- *Fauna*

El carbono se presenta en la biomasa en todos los organismos vivos, por tanto, animales, insectos, peces, moluscos, crustáceos, etc., incluso el propio hombre, mantienen el carbono en una forma orgánica no agresiva para el ambiente, la que debe ser estimada como ganancia. Todas las especies animales, terrestres, aéreas o acuáticas contienen carbono en su biomasa y al morir lo incorporan al medio donde se encuentran.

- *Acumulación de materia orgánica en el suelo*

La materia orgánica representa la principal reserva de carbono de la biosfera, y constituye la principal fuente de Carbono y Nitrógeno en los ecosistemas terrestres, de su conservación depende en gran medida la vida del planeta. Para conservarla es necesario dirigir permanentemente el proceso de transformación de los restos orgánicos hacia la formación de sustancia húmicas estables y con ello disminuir la emisión de gases a la atmósfera contribuyendo a atenuar el efecto invernadero y a elevar la productividad de los ecosistemas terrestres (Martínez et al., 2001). En las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y biológicas de los suelos, la materia orgánica resulta muy favorable. Los agregados del suelo determinan en gran

medida el tamaño, forma y arreglo de los poros, los cuales representan los espacios donde las actividades biológicas tienen lugar; por otro lado, los agregados son muy importantes en las relaciones agua - aire del suelo lo cual influye en las actividades de raíces, microorganismos y en la movilidad de éstos (Morales y Borie, 2001).

11.2.2.2. Pérdidas de carbono

Una característica general de todos los compuestos orgánicos es que tienden a oxidarse y liberan energía en ese proceso, el que, puede ser violento como en un fuego o lento como en la respiración, la fotorespiración, la fermentación o la mineralización de la materia orgánica.

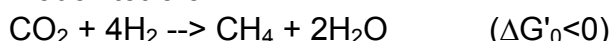
La segunda ley de la termodinámica establece que en el curso de las conversiones energéticas, el potencial termodinámico -o energía potencial termodinámica- de un sistema en el estado final siempre será menor que el potencial termodinámico del mismo sistema en el estado inicial. Otra manera de enunciar la segunda ley de la termodinámica es que todos los procesos naturales tienden a ocurrir en una dirección tal que la entropía (la medida del "grado de desorden" o de "aleatoriedad") del Universo se incrementa.

Para mantener la organización de la cual depende la vida, los sistemas vivos deben tener un suministro constante de energía que les permita superar la tendencia hacia el desorden creciente. Esa energía procede del sol, la aprovechan las plantas en la fotosíntesis, es lo conceptualizado como "ganancia" y todo lo que signifique transformación de la forma orgánica del carbono a formas gaseosas como anhídrido carbónico o metano es "pérdida".

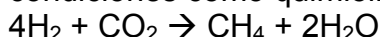
La mayor importancia en las pérdidas la posee la utilización de los combustibles fósiles como fuente energética, pero ello también ocurre cuando se queman los restos de una cosecha o la basura en la casa.

11.2.3. Transformación del anhídrido carbónico en formas más agresivas

Las arqueas metano génicas pueden usar el CO₂ como aceptor de los electrones procedentes de la oxidación del H₂, proceso por el que obtienen su energía de modo litótrofo



Además, algunas arqueas no sólo usan CO₂ como aceptor de electrones para obtener energía, sino que, además lo usan como fuente de carbono celular (arqueas metano génicas autótrofas). Las arqueas metanogénicas son los únicos seres vivos capaces de obtener energía acoplado la oxidación del hidrógeno molecular con el uso de CO₂ como aceptor de electrones (actuando en estas condiciones como quimiolitotrofos):



El aporte de metano a la atmósfera proviene de los fondos del mar, pantanos, ciénagas, cultivo de arroz bajo aniego, sistemas digestivos de termitas y rumiantes. En contraposición a la formación de metano se encuentran las bacterias metilótrofas que sólo usan metano o metanol como fuente de carbono y energía y pueden eliminar esa forma de carbono que tanto contribuye al efecto invernadero

Para calcular el balance se necesita expresar tanto las ganancias como las pérdidas en unidades y efectos del carbono que sean iguales en su influencia en el efecto invernadero, no basta con considerar el carbono perdido en forma de metano, en las mismas unidades de carbono (peso de carbono/unidad de superficie) sino que 1kg de metano calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de anhídrido carbónico y para considerar ese efecto debe multiplicarse el valor del carbono en forma de metano por un factor, para hacerlo equivalente como CO_2 .

Atendiendo a la mayor agresividad del metano y su formación bajo condiciones anaeróbicas, resulta conveniente en cualquier circunstancia en que este pueda pasar a la atmósfera, aprovecharlo, de ser ello posible, como fuente de energía en sustitución de otras fuentes de energía (petróleo, hulla), pues las sustituiría y el producto final de la combustión sería CO_2 mucho menos contaminante que el CH_4 .

11.2.4. Sustitución de combustibles fósiles por otras fuentes de energía

Existen diferentes fuentes de energía que no incrementan el contenido de CO_2 de la atmósfera y que son utilizadas por el hombre sin contribuir al efecto invernadero, como son: energía hidráulica, eólica, atómica, etc., las cuales no son objeto de atención en esta oportunidad en que se limita la información que se brinda a las potencialidades de la agricultura para contrarrestar los efectos negativos que el hombre ha ocasionado en el ciclo biogeoquímico del carbono, principalmente el efecto invernadero.

El empleo de cultivos como la caña de azúcar, como fuente renovable de energía tiene un gran futuro, pues el sol continuara irradiando durante los próximos 5000 millones de años, lo que garantizara la producción de biomasa vegetal.

La producción de etanol se realizó por la industria petroquímica a partir de la hidratación catalítica de etileno, obtenido a su vez del etano o de naftas. Los polímeros derivados del etanol comparten la característica de invertir ese ciclo para producir etileno como elemento intermedio. Esto permite, a través de procesos químicos tradicionales, la fabricación de compuestos derivados del etileno a partir del etanol obtenido de la producción de diferentes cultivos, lo que se realizaba anteriormente exclusivamente a partir del petróleo. De esta forma, muchos compuestos que se obtenían por la industria petroquímica a partir del etileno, se pueden producir a partir del alcohol elaborado a partir de cultivos.

El alcohol tradicionalmente obtenido mediante la fermentación de jugos azucarados, como el de la caña de azúcar, remolacha, uva; actualmente se puede obtener a partir de productos agrícolas que se caracterizan por la acumulación de almidón como ocurre con el maíz, la yuca y el trigo o de la celulosa (madera, bagazo).

Una vez obtenido el etanol, este puede transformarse en etileno, cuyo empleo popularmente conocido es para adelantar la maduración de las frutas, sin embargo, es un producto a partir del cual, se obtienen alrededor de 50 derivados de importancia industrial, algunas de las cuales aparecen en la Figura 11.2.

La producción de etanol celulósico a escala comercial es una realidad en los Estados Unidos, a cuya actividad se le ha decretado incluso un alivio tributario para incentivar su producción. Desde hace más de 4 años están funcionando plantas pilotos y están en construcción más de 10 plantas a escala comercial. La

producción de biocombustibles a partir de los desechos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar no pone en peligro la seguridad alimentaria ni desplaza la actividad agrícola tradicional (BNDES, CGEE, FAO y CEPAL, 2008).

El etanol se transforma en etileno y después en polietileno. La caña de azúcar es un cultivo especialmente eficaz con un rendimiento de más de 2 toneladas de polietileno vegetal por hectárea, es decir de 5 a 10 veces más que las otras plantas utilizadas para producir etanol (Zeus Química, S.A, 2010).

La reacción del etileno con el oxígeno en presencia de un catalizador adecuado produce el óxido de etileno, del cual se obtienen los glicoles, poli glicoles y los polioles que se utilizan para la elaboración de anticongelantes, fibras, detergentes, cosméticos, disolventes de pinturas, componente de líquidos de frenos y mecanismos hidráulicos y esterilización de instrumentos médicos empleados en cirugía. La mayoría del óxido del etileno, se utiliza como intermedio en la producción de otros productos químicos, principalmente en la producción de glicol de etileno, para la producción de poliéster polímeros y para uso como líquido refrigerador automotor y anticongelante.

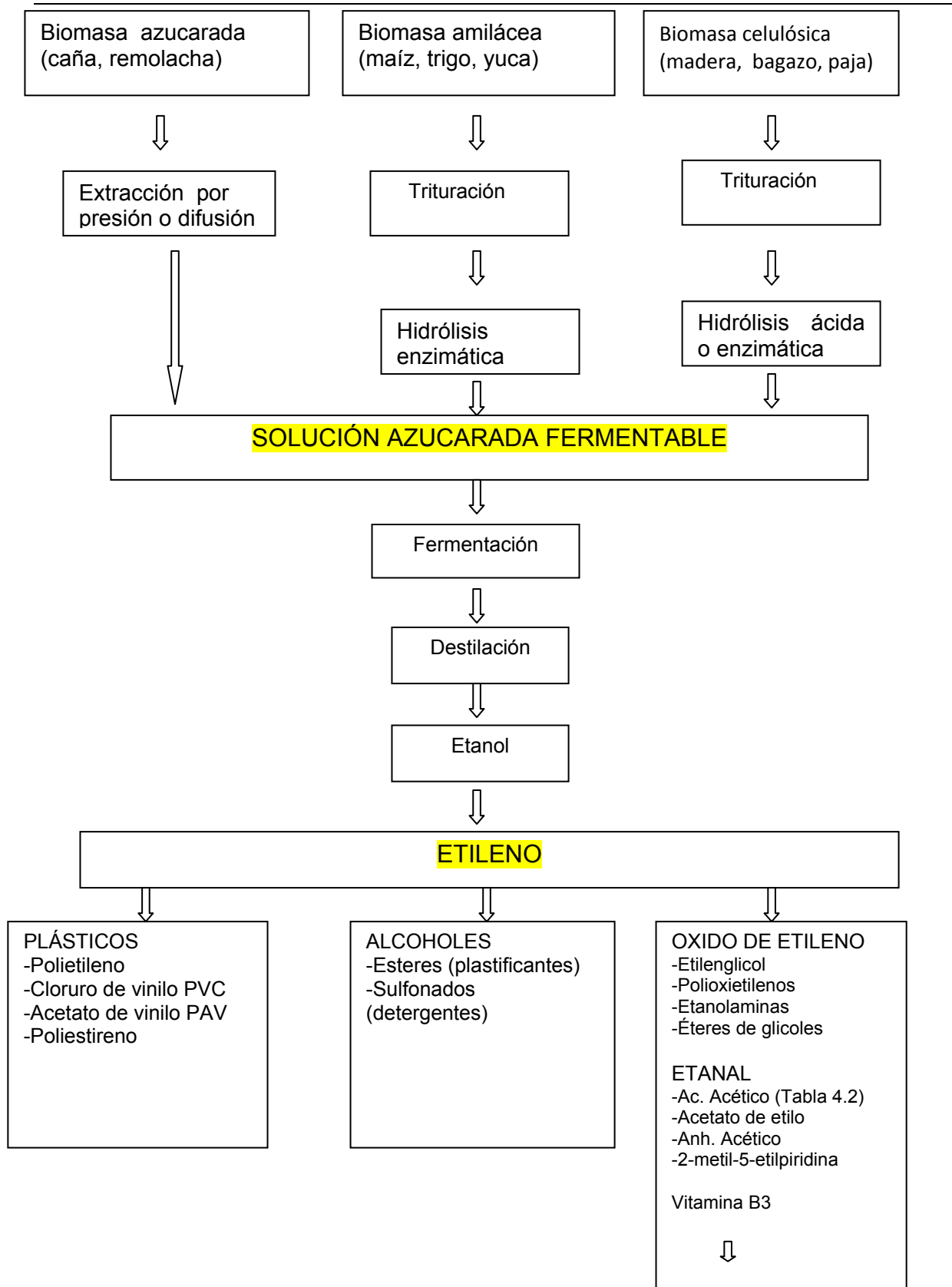


Figura 11.2. Vías para la fabricación de alcohol (adaptado de: Luiz Augusto Horta Nogueira (citado por BNDES, CGEE, FAO y CEPAL, 2008)

11.2.5. Disminución del contenido de CO₂ de la atmósfera

Los bosques boreales son el ecosistema que acumula una mayor cantidad de carbono (el 26% del total del carbono terrestre), en tanto que los bosques tropicales y templados contienen el 20% y el 7%, respectivamente (Dixon, 1994).

Los bosques tropicales son el hábitat de la mayoría de las especies animales terrestres, las que dependen directa o indirectamente de la producción de biomasa de esas plantas. Por lo tanto, la disminución de productividad de estos bosques originada por el aumento de la temperatura de la atmósfera, reducirá la cantidad de alimento disponible a los consumidores, reduciendo la abundancia y la diversidad de las especies de animales (Butler, 2007).

La disminución de la producción vegetal en los bosques tropicales, es de esperar por estar conformados por especies de tipo C₃, lo que no sucede en el caso de las sabanas tropicales donde abundan los pastos compuestos por especies de tipo C₄, pero en ambos casos un aumento de la temperatura podrá originar una mayor tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo y un mayor vertimiento de carbono a la atmósfera.

Barak Obama, anunció que cancelaría gran parte de la deuda de Brasil a cambio de protección forestal. Estados Unidos ha hecho lo mismo con Bangladesh, Botsuana, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Indonesia, Jamaica, Panamá, Paraguay, Perú y las Filipinas. La deforestación es responsable del 20% de las emisiones de efecto invernadero, por lo que disminuir la actividad a cero es una de las prioridades en lugares como Brasil e Indonesia, los cuales califican como el primer y segundo emisor, respectivamente (Verónica Alimonda, 2010).

Conservar los bosques naturales y sustituir los combustibles fósiles sería la opción ideal y se deben hacer los mayores esfuerzos por aproximarse lo más posible a ese objetivo, no obstante, el crecimiento demográfico demanda cada día más alimentos y energía, el tiempo para aplicar adecuadas soluciones se acaba y la contaminación se acerca cada vez más al límite que permitió la aparición de la vida en el planeta.

Ante la negativa de países altamente industrializados, como EE.UU., máximos responsable de la contaminación de la atmósfera, de disminuir el consumo de combustibles fósiles, surgió la alternativa propuesta por Japón de pagar bonos por establecer plantaciones de árboles. Esta opción se ha implementado en los países pobres por ser más barato el terreno y la mano de obra, lo cual se ha visto por algunos especialistas en la materia, como una salida de los países ricos para no disminuir su consumo de combustibles fósiles, ya que no es seguro que con ello disminuya la contaminación atmosférica, debido a que generalmente se elimina la vegetación existente en un lugar para plantar un bosque artificial que bien permanecerá, como un reservorio intocable de carbono o suministraría celulosa a los países ricos, en tanto que, un bosque natural lo superaría por su diversidad de especies de planta, cada una ocupando su nicho ecológico y utilizando más eficientemente la energía solar.

El bosque natural acumula más carbono en la biomasa sobre el suelo y en el suelo, tiene diversidad de especies de flora y fauna y sirve de abrigo a muchas comunidades humanas, por otra parte, la estimulación al establecimiento de estos bosques artificiales podría contribuir a que se destruyan bosques naturales (Carrera, s/a). Según Castro (2006) Costa Rica ha sido pionera en el desarrollo y

venta de créditos de reducción de emisiones. Los créditos costarricenses eran principalmente el resultado de convertir pastizales y campos cultivados en bosques, puesto que el crecimiento del bosque absorbía los gases de dióxido de carbono que contribuían al calentamiento global.

Utilizando los resultados promedio de ocho modelos, sin comercio internacional el costo marginal de una tonelada de reducciones de emisiones de carbono en USD sería \$164 en Estados Unidos, \$260 en Europa y \$277 en Japón. En los países en desarrollo, el costo marginal podría llegar a \$28 la tonelada. Una opción que además de capturar carbono de la atmósfera contribuye a obtener alimentos es el establecimiento de sistemas agroforestales, como sucede en las plantaciones de café.

Winrock internacional (1998) en un trabajo realizado en Guatemala, estudió la fijación de carbono en sistemas agroforestales con café. Los resultados demostraron que en promedio el carbono en el sistema cafetalero se dividió de la siguiente forma: 27 t C ha⁻¹ en la biomasa arriba del suelo, 4 t C ha⁻¹ en la biomasa abajo del suelo, 4 t C ha⁻¹ en la hojarasca y 48 t C ha⁻¹ en el suelo (0-30 cm), lo cual hace un total de 85 t C/ha. Se concluyó al comparar con los resultados de carbono en tierras degradadas y cultivos anuales, que el carbono adicional fijado por el sistema cafetalero se encuentra en los árboles que conforman la sombra del sistema agroforestal café-árboles.

La cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea de las especies maderables por hectárea es muy variable entre las especies y entre las densidades de árboles que se establezcan dentro de los cafetales. Castillo (2003) encontró: 39+27 t C ha⁻¹ para *C. alliodora*, 14+10, t C ha⁻¹ para *E. deglupta*, y 32+16 t C ha⁻¹ para *T. amazonia*. Este es un indicador de que los sistemas agroforestales con café están prestando un servicio ambiental mediante el almacenamiento de carbono.

Cultivos de tipo C4 como la caña de azúcar pueden acumular más carbono por unidad de tiempo que un bosque artificial de pino o de eucaliptos (Cuadro 11.1), entonces como sumidero de carbono estaría más justificado establecer bonos para ese cultivo que para un bosque artificial. En el bosque artificial el carbono se mantiene almacenado, mientras que en el caso de la caña de azúcar se utiliza como materia prima para obtener alimentos o energía, sustituyendo combustibles fósiles y contrarrestando la contaminación atmosférica, mientras el carbono desprendido a la atmósfera en una cosecha será recuperado en la siguiente.

Cuadro 11.1. Materia seca producida en t/ha/año por diferentes especies vegetales (ICIDCA, 1986).

Cultivo	T de M.S. por ha año de plantación
Caña tradicional	30-82
Maíz(PC)	8.5
Arroz(PC)	4-15
Yuca	8-32
Eucalipto, ciclo de 7 años	12
Pino	10-20
Caña energética	50-100

La caña de azúcar entrega materia seca con un equivalente energético 20 veces mayor que la energía empleada en su producción, mientras que la madera, de acuerdo con los índices reportados, se calcula que es del orden de 5-1 en igualdad de base que la caña. Para el maíz este índice se reporta entre 2.80-4.40, para la remolacha y la avena valores menores de 1.0. Las demandas energéticas de los centrales azucareros, son prácticamente la mitad de su bagazo, quedando un sobrante factible de ser empleado en más de cuarenta aplicaciones, de las cuales las más relevantes son la producción de energía, celulosa y papel, tableros, etanol, alimento animal y furfural (ICIDCA, 1986).

El bagazo se considera el subproducto no maderable más importante del mundo, y tiene un alto valor estratégico. Sólo en bagazo y paja en los cañaverales se almacena el equivalente a cerca de 1ton. de petróleo por cada Ton. de azúcar producida (Torres, 1998).

Hernández et al. (2000) presentan una tecnología para producir alcohol de forma continua, a partir de caña energética y utilizar el bagazo como combustible para la producción de energía eléctrica. Las ganancias que se alcancen con el bagazo será mayor, mientras mayor sea la eficiencia energética del central. Bajo condiciones ideales, una fábrica de azúcar puede exportar tanto como 80% de la energía que puede generar del bagazo (Albert-Thenet, 1991).

El fuego en los cañaverales destruye la biomasa formada por ese cultivo, contamina la atmósfera con anhídrido carbónico, afecta la fertilidad del suelo por disminuir su contenido de materia orgánica y eliminar la cubierta de paja que lo protege, de la erosión, conserva la humedad y disminuye la incidencia de malezas (Arzola et al., 1985, 1986, 1987).

Dada la gran producción de materia seca de la caña de azúcar y el realizarse la zafra en época de seca esta planta posee gran interés como alimento animal, con este propósito puede utilizarse: directamente, los residuos de la cosecha y los subproductos industriales.

Una propuesta del Instituto de Ciencia Animal (ICA, 2002) para la cría de cerdos se fundamenta en miel rica y un núcleo proteico. Este núcleo proteico esta compuesto principalmente por levadura torula, por ello donde existen fabricas de levadura torula hay condiciones para crear un combinado de carne de cerdo. Una fabrica de levadura torula produce entre 12 y 15 t /día, por lo que se podrían cebar entre 11000 y 13000 cerdos en cualquiera de ellas. Como promedio se obtendría anualmente en cada fábrica 2160 t de carne de cerdo.

11.3. Ciclo del nitrógeno

La atmósfera contiene un 78% de nitrógeno. A pesar de su abundancia, los cultivos económicos no son capaces de absorberlo directamente para utilizarlo en sus procesos vitales, pues lo absorben por sus raíces como nitrato o amonio; gracias a que existe el ciclo del nitrógeno, esa gran reserva de nitrógeno elemental (N_2), presente en la atmósfera, puede pasar a formas aprovechables por las plantas. Existen bacterias y algas cianofíceas capaces de transformar el nitrógeno elemental de la atmósfera en formas aprovechables por las plantas, sin ellos resultaría imposible la vida vegetal y animal.

Las plantas requieren nitrógeno para formar aminoácidos, proteínas, ácidos nucleídos, RNA y DNA, entre otros compuestos vitales, en tanto que, los animales

obtienen el nitrógeno que necesitan para formar su organismo alimentándose de plantas u animales que contienen nitrógeno. Cuando los organismos mueren, sus cuerpos se descomponen y el nitrógeno mineral llega a los suelos, la tierra o el agua. Ese nitrógeno puede ser tomado por diferentes organismos para formar sus células o perderse por diversas vías.

En el metabolismo de los compuestos nitrogenados en los animales, se forma finalmente ión amonio que es muy tóxico y debe ser eliminado. Esta eliminación se hace en forma de amoniaco (algunos peces y organismos acuáticos), o en forma de urea (el hombre y otros mamíferos) o en forma de ácido úrico (aves y otros animales de zonas secas). Estos compuestos van a la tierra o al agua de donde pueden tomarlos de nuevo las plantas o ser usados por algunas bacterias. Algunas bacterias convierten amoniaco en nitrito y otras transforman este en nitrato. Una de estas bacterias (*Rhizobium*) se aloja en nódulos de las raíces de las leguminosas (alfalfa, alubia, etc.) y por eso esta clase de plantas son tan interesantes para hacer un abonado natural de los suelos. Donde existe un exceso de materia orgánica en el mantillo, en condiciones anaerobias, hay otras bacterias que producen desnitrificación, convirtiendo los compuestos de N en N_2 , lo que hace que se pierda de nuevo nitrógeno del ecosistema a la atmósfera.

Los microorganismos que fijan nitrógeno atmosférico han sido utilizados por el hombre para aportar nitrógeno a los cultivos, inicialmente se comenzó con la inoculación con *Rhizobium* en las leguminosas y posteriormente ha tomado gran difusión la reproducción en fermentadores de microorganismos de vida libre o asociativa que pueden aumentar la nutrición nitrogenada cuando son aplicados a los cultivos.

El Nitrógeno es un elemento increíblemente versátil que existe en forma inorgánica y orgánica, a la vez que en muchos y diferentes estados de oxidación. El movimiento del nitrógeno entre la atmósfera, la biosfera y la geosfera en sus diferentes formas está descrito en el ciclo del nitrógeno (Figura 11.3).

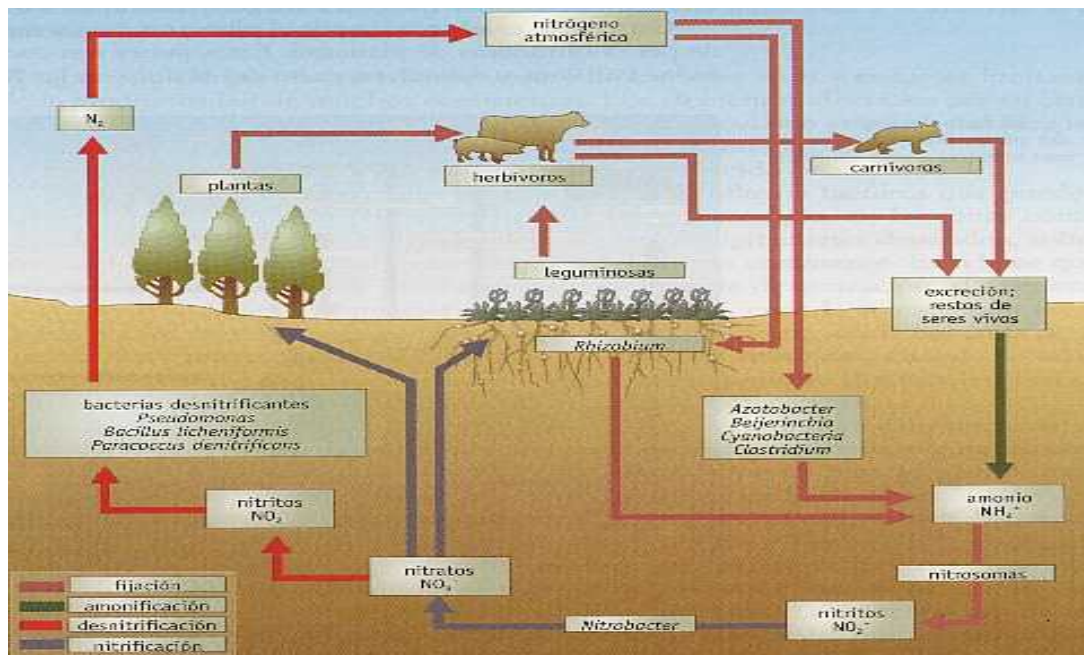


Figura 11.3. Ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Anónimo 2 s/a).

Al igual que el ciclo carbónico, el ciclo del nitrógeno consiste en varios bancos o bolsas de almacenamiento de nitrógeno y de procesos por los cuales las bolsas intercambian nitrógeno (flechas).

Los procesos principales que componen el ciclo del nitrógeno que pasa por la biosfera, la atmósfera y la geoesfera son los siguientes: la fijación del nitrógeno del aire, la mineralización del nitrógeno orgánico(desintegración) a forma de amonio (amonificación) y de aquí a nitratos en presencia de oxígeno(nitrificación). Estos procesos hacen posible la asimilación de nitrógeno por los organismos y su crecimiento, mientras otros; ocasionan pérdidas de nitrógeno en forma gaseosa (desnitrificación y volatilización). Los microorganismos, particularmente las bacterias, juegan un importante papel en todas las principales transformaciones del nitrógeno. Como procesos de mediación microbiales, estas transformaciones de nitrógeno ocurren generalmente más rápido que los procesos geológicos, tales como los movimientos de placas que es un proceso puramente físico que es parte del ciclo del carbono. En el caso de los procesos de mediación microbianas, la velocidad se ve afectada por factores ambientales como la temperatura, la humedad, la aireación.

A pesar de existir organismos que fijan nitrógeno atmosférico, ocurre que existe un fuerte triple enlace entre los átomos N en las moléculas de N_2 , por ello el nitrógeno es relativamente inerte y el nitrógeno disponible es, a menudo, escaso en los ecosistemas naturales. Esto limita el crecimiento de las plantas y la acumulación de biomasa.

A principios del siglo 20, un científico alemán llamado Fritz Haber descubrió como acortar el ciclo del nitrógeno fijando químicamente el amoniaco. A partir de este compuesto se producen diferentes fertilizantes nitrogenados, que pueden ser añadidos directamente al suelo. Este descubrimiento le permitió al hombre intervenir directamente en el ciclo del nitrógeno, el proceso Haber, consiste en hacer reaccionar el N_2 de la atmósfera con el hidrógeno del gas o la nafta (a elevada presión y temperatura). Este proceso esta muy lejos de alcanzar la eficiencia del proceso natural de fijación de nitrógeno que realizan las bacterias y algas cianofíceas, pues estas no requieren de un elevado gasto energético.

Alrededor de las dos terceras partes del nitrógeno aplicado a los cultivos se pierde por diferentes vías y contamina el medio ambiente. En el agua del suelo que se usa como fuente de agua potable, el nitrógeno excesivo puede provocar cáncer en los humanos y dificultades respiratorias en los niños. La U.S. Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) ha establecido un standard de nitrógeno para el agua potable que es de 10 mg por litro de nitrato-N. Desafortunadamente, muchos sistemas (particularmente en las áreas de agricultura) ya exceden estos niveles. En comparación, los niveles de nitrato en las aguas que no han sido alteradas por la actividad humana rara vez son mayores de 1 mg por litro. En las aguas de la superficie, el nitrógeno añadido puede provocar un enriquecimiento excesivo de nutrientes, particularmente en las aguas de la costa que reciben afluencia de los ríos polucionados. A este enriquecimiento excesivo de nutrientes, también llamado eutrofización, se le acusa del aumento de la frecuencia de eventos que matan a los peces de la costa, del aumento de la frecuencia del florecimiento de algas dañinas y de cambios en las especies dentro del ecosistema de la costa.

El nitrógeno reactivo (como el NO_3^- y el NH_4^+) que se encuentra en el agua y suelos de la superficie, también puede ingresar en la atmósfera como el componente del smog óxido nítrico (NO) y el gas de invernadero óxido nitroso (N_2O). Eventualmente, este nitrógeno atmosférico puede ser soplado en ambientes terrestres que son sensibles al nitrógeno causando cambios de largo plazo. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno contienen una porción significativa de la acidez en la lluvia ácida que es la causante de la deforestación en partes de Europa y del Noreste de Estados Unidos. El aumento de depósitos de nitrógeno atmosférico también causa los cambios más sutiles en las especies dominantes y funciones del ecosistema en algunos bosques y prados. En los suelos con poco nitrógeno de los prados del Norte de California, los conjuntos de plantas se han limitado históricamente a las especies nativas que pueden sobrevivir sin mucho nitrógeno. En este momento, hay evidencia que los niveles elevados de entrada de N atmosférico proveniente del desarrollo industrial y agrícola, han allanado el camino para una invasión de plantas no nativas. Como se ha señalado con anterioridad, el NO es un factor esencial en la formación del smog, que también causa enfermedades respiratorias como el asma en niños y adultos (Anónimo 2, s/a).

Bibliografía consultada

Albert-Thenet, J. 1991: Steam economy in cane sugar factories. Proceedings of the International Conference on Energy from Sugar Cane, Hawaii.

Ana A. Socarras; M. E. Rodríguez: Caracterización de aspectos químico-biológicos del suelo en bosques naturales y afectados por la minería en Moa, NE de Cuba. III-Comportamiento de la mesofauna. XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo (CLCS). Varadero, Cuba. 2001.

Anónimo 1: Ciclo del Carbono. Ciencias de La Tierra y del Medio Ambiente www.tecnun.es/./04Ecosis/131CicC.htm

Anónimo 2: Ciencias de la tierra y del medio ambiente. Ciclo del Nitrógeno. <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecología/Hipertexto/04EEcosis/135CicN.htm>

Arellano, J. L; López, J.: Conservación del suelo y agua a nivel microcuencas en las unidades de drenaje de Chiapas. Simposio 5. Manejo Integral de Cuencas. XI Congreso nacional de irrigación. Guanajuato, México, 2001. ANEI-S50114.

Arzola, N.; López, M.; Martín, A.; Fernández, A.: Efecto del fuego en las plantaciones de Caña de Azúcar. Parte I: Influencia sobre algunas propiedades de los suelos cubanos, Boletín INICA No. 3(1985) 61 – 71 pp.

Arzola, N.; López, M.; Martín, A.; Fernández, A.: Efecto del fuego en las plantaciones de caña de azúcar. Parte II, Boletín INICA, No. 3(1986) 72-81 pp.

Arzola, N.; López, M.; Martín, A.; Fernández, A.: Efecto del fuego en las plantaciones de azúcar. Parte II: Influencia de la quema sobre algunas propiedades

de los suelo cubano, Memorias del IX Congreso Latinoamericano y III Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Vol. XVII, No. 2 (6/87) (1987) 243-252 pp.

Arzola, N.: Manejo agrícola de las áreas cañeras en armonía con el ciclo biogeoquímico del carbono y el nitrógeno y la fertilidad de los suelos. VIII Taller Nacional del Medio Ambiente. Bayamo, Cuba, 2007.

BNDES, CGEE, FAO y CEPAL: Bioetanol de caña de azúcar. Una energía para el desarrollo sostenible, 2008. http://www.bioetanoldecana.org/es/download/resumo_executivo.pdf

Buringh, P.: Organic carbon in soils of the world. In: Woodwell G.M., Ed. The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle. John Wiley and sons. New York, 1983, 91-111pp.

Butler, R.A.: Temperaturas más altas retardan el crecimiento tropical del árbol, mitigación que se calienta global mongabay.com. 23 de abril de 2007. <http://es.mongabay.com/news/2007/0423-forests.html>.

Campbell, N.A: Biology. 4th edition. The Benjamin/Cumming Publishing Company, Inc. California (1996), 1205 pp.

Castillo, R.: Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies Forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica. 2003: <http://orton.catie.ac.cr/REPDOC/A0120E/A0120E.PDF>.

Castro, R.: Agricultura Sostenible: Oportunidades con Mercado Global de CO₂. II Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006a.

Castro, R.: Los bosques de Costa Rica y el impacto del Protocolo de Kyoto. II Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006b.

Dixon: El cambio climático y los bosques. 1994. Disponible en: http://www.ecosur.net/cambio_climatico_y_los_bosques.html (consultado 08/04/07).

Gupta, V.; Germida, J.: Distribution of microbial biomass and its activity in different soil size classes as affected by cultivation. Soil Biol. Biochem. 20 (6) (1988): 777 – 786pp.

Hernández, R.A.; Obregón, J.; Romero, O.: producción de alcohol y energía eléctrica en un central azucarero a partir de la caña energética. VI Congreso internacional sobre azúcar y derivados de la caña de azúcar. Diversificación 2000. La Habana, 2000.

ICA.: Porcinocultura Minaz. Dpto. de Monográficos. Memorias del 48 Congreso de La ATAC. La Habana, 2002 (CD con ponencias).

ICIDCA: La industria de los derivados de la caña de azúcar, 1986.

IPCC: El cambio climático y los bosques, 2000.

Martínez, F.; Calero, B.; Calderón, E.; Valera, M.; Ticante, J.: Transformación de los restos orgánicos en los suelos y su impacto ambiental. XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo (CLCS).Varadero, Cuba.2001.

Morales, A.; Borie, F.; Alvear, M.: Biomasa activa y actividad enzimática en agregados de suelo bajo cero labranzas. XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo (CLCS).Varadero, Cuba.2001.

Rod, D.; Lefroy, B.; Blair, G.: The Dynamics of soil organic matter changes resulting from cropping. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco. México, 1994: 235-245pp.

Sánchez, P.A.: Suelos del trópico, características y manejo. Editorial IICA. Costa Rica, 1981: 671 pp.

Sharkey, T.D.: Fotosíntesis. Absorción y utilización del dióxido de carbono en un contexto ecológico. En Fisiología y Bioq. Vegetal por J. Azcon-Bieto y M. Talon. Ed. Interamericano. Mc Grw-Hill. España (1993) 135-147pp.

Torres, J.: "Biomasa cañera y electricidad". Revista Energía y tú. No 4. Octubre-Diciembre. 1998.

Toro, R.: La biodiversidad microbiana del suelo, un mundo por descubrir .Manizales, Colombia, 2004.

Urquiaga, S.; Cláudia P.; Alves, B.; Boddey, R.: Importancia del nitrógeno en la acumulación de materia orgánica del suelo en sistemas agrícolas bajo siembra directa y labranza convencional de suelo. XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo (CLCS).Varadero, Cuba.2001.

Vavilov, N.I.: Origin and Geography of Cultivated Plants. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Verónica Alimonda: EE.UU. libera a Brasil de la deuda a cambio de que proteja sus bosques.18 de Agosto del 2010.<http://sustentador.com/blog-es/2010/08/18>.

Winrock internacional: Avances en la medición de carbono en Guatemala. In Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Márquez, L.2000 (Ed.).Fundación solar, 1998. 40 pp.

Zeus Química, S.A.: Sphere lanza un bioplástico a partir de caña de azúcar 20/07/2010.<http://www.mundoplast.com/noticia/sphere-lanza-bioplastico-partir-caña-azucar/58103>

“Actúa de tal manera que las construcciones de tu acción no sean destructivas de las futuras condiciones de vida”

Hans Jones

CAPITULO 12. FUNDAMENTOS AGROECOLOGICOS PARA EL MANEJO DE AGROSISTEMAS AGRICOLAS

12.1. Generalidades

A principios de la Segunda Guerra Mundial, surgió el movimiento agrícola conocido como *Revolución Verde*, consistió en el desarrollo de una agricultura que se suele denominar, industrializada, basada en el empleo de abonos químicos y pesticidas, la producción de nuevas variedades más productivas y la mecanización de áreas con un solo cultivo (el *monocultivo*).

Esto origino un sorprendente incremento de los rendimientos por unidad de superficie y por ello se creyó que en un futuro esta sería la solución alimentaría de la humanidad. Pero su efecto consistió en la necesidad de intensificar el abonado químico y el empleo de pesticidas, lo que enriqueció a las industrias dedicadas a la fabricación de estos productos, pero degrado el ecosistema. Posteriormente se ha ido produciendo una disminución de los incrementos de la productividad, especialmente en aquellos países que más tempranamente adoptaron las técnicas de la revolución verde.

Con el monocultivo se reduce la cubierta vegetal y los suelos (con las prácticas tradicionales de preparación) permanecen desnudos por largos periodos de tiempo, en ocasiones coincidiendo esto con las condiciones más propicias para el arrastre de partículas como arcilla y materia orgánica. La erosión del suelo no sólo se produce por efecto de la pendiente y la escorrentía, sino también por el mal uso del riego, que incluso en lugares de baja pendiente puede arrastrar el horizonte superficial del suelo. A este efecto de la erosión se le añade el uso de fertilizantes químicos en lugar de abonos orgánicos y con frecuencia la quema de los restos de cosecha, por ello, disminuye el contenido de materia orgánica del suelo y la estabilidad de los agregados. La quema de los residuos orgánicos que cubren el suelo origina que aumente la erosión, disminuya el aporte de materia orgánica, que los rayos solares incidan directamente sobre la superficie del suelo, aumente su temperatura y consecuentemente la tasa de mineralización de la materia orgánica, en tanto que, disminuye la humedad del suelo y pueden proliferar las malas hierbas. La perdida de esta cubierta protectora (mulch) tiene consecuencias directas sobre el cultivo y los organismos vivos que interactúan con él.

La quimización de la agricultura, el monocultivo, la intensiva mecanización, irrigación y otras prácticas que parecían ser la solución a los problemas alimentarios de la humanidad, comenzaron a mostrar efectos negativos sobre el medio ambiente y los recursos naturales, en ocasiones, se amenazaba con la *Revolución Verde*, la propia existencia de la especie humana, por ello surgió la necesidad de establecer prácticas agrícolas menos agresivas sobre el medio ambiente y surge entre otras tendencias la agricultura agro biológica, la que se aplica en condiciones específicas de suelo, clima y cultivo, por lo que esos aspectos están implícitos.

12.2. Influencia del Clima

El sol emite radiaciones que originan los fenómenos físicos y biológicos que se producen sobre la tierra. El metabolismo vegetal está muy influenciado por los elementos del clima, tanto desde el punto de vista cuantitativo (crecimiento), en que la lluvia y la temperatura deprimen o promueven la formación de biomasa vegetal, como desde el punto de vista cualitativo (desarrollo) en que la diferenciación de las diferentes fases que conforman el ciclo de vida de la planta se hace posible y en que influyen la temperatura y la duración del día.

El clima determina los límites geográficos en que puede vivir una especie vegetal y en que resulta económico su cultivo. También en función del clima deben establecerse el manejo agronómico, así mientras en Egipto es imposible establecer un cultivo económico sino se cuenta con el riego con las aguas del Nilo, en las zonas tropicales muy lluviosas, llanas y de suelos impermeables es imprescindible el drenaje.

La duración del día es un factor que determina la floración de las plantas, en aquellos casos en que se cultiva una especie vegetal para obtener la biomasa formada, no interesa si florece, siempre que la reproducción sea agámica o se pueda importar semilla de otras regiones para las siembras posteriores, pero esto no ocurre cuando el propósito de sembrar una especie vegetal es obtener flores, frutos o semillas, pues en ese caso la planta debe completar su ciclo vegetativo y reproductivo.

En la actualidad con el aumento en la atmósfera con gases con efecto invernadero, se pronostica un aumento de la temperatura menos pronunciada en el trópico que en la zona fría, pero capaz de originar mayores lluvias, mayor crecimiento vegetativo y mayores pérdidas de nutrientes del suelo, en tanto que, en las zonas depresionales podría prolongarse la saturación o el anegamiento del suelo. Esto sugiere que existirá mayor necesidad de fertilizantes en el futuro y que se requiere del uso racional de los mismos para garantizar la alimentación de una población cada día mayor.

Los elementos del clima no solo influyen directamente sobre el desarrollo y rendimiento de los cultivos sino que también interactúan con muchos factores que tienen que ver con la nutrición vegetal, solo por citar un ejemplo, la humedad del suelo varía con el régimen pluviométrico y este a su vez influye sobre la asimilabilidad de los nutrientes del suelo, por ello las necesidades de fertilizantes y enmiendas están relacionadas con la lluvia y con el empleo o no de riego.

Con el aumento de la temperatura se obtiene una mayor producción de biomasa, lo que significa que en el trópico se favorece por esta causa la cantidad de alimento para la cría de animales herbívoros; la distribución de la lluvia, se enmarca en dos periodos (húmedo y seco), en el seco es muy limitada la producción de alimentos y debe disponerse de regadío o conservar el excedente de estos del periodo lluvioso para suministrarlos al animal mediante silos o pienso.

La producción de biomasa en el trópico, supera ampliamente en el caso de las gramíneas a la de climas templados, pero no en el caso de las leguminosas que son fuentes de aminoácidos y proteínas (Vélez, 2006). La causa puede atribuirse a que la generalidad de las gramíneas que se emplean como pastos son del tipo C-4 y se ven favorecidas en la fotosíntesis por las altas temperaturas e intensidad luminosa de los trópicos, mientras que las leguminosas son del tipo C-3 y esas condiciones no le resultan favorables para su actividad fotosintética.

Atendiendo a lo antes expuesto, de existir un adecuado suministro de alimento durante la época seca de los trópicos (bien por el riego o por conservarse alimentos

para ese periodo) y disponerse de especies de leguminosas de elevada productividad y resistentes al pisoteo durante el pastoreo, el clima tropical superaría al templado en la producción de alimento animal.

Las plantas están limitadas en el proceso fotosintético por la pobre concentración de anhídrido carbónico de la atmósfera, lo cual se ha favorecido desde el pasado siglo por la creciente contaminación de la atmósfera con este compuesto, también las plantas son extremadamente ineficientes en el aprovechamiento de la energía solar. Del 100% de la energía radiante que incide sobre la tierra un 60% no es absorbido debido a que es de grandes longitudes de onda. Del 40% restante un 8% se pierde por reflexión y transmisión otro 8% también es perdido por calor; un 19 % constituye pérdida en el metabolismo de las plantas y sólo el 5% de la energía radiante que llega a las plantas es convertida en carbohidratos a través del tejido foliar fotosintético (Taiz y Zieger, 1998). El coeficiente de rendimiento de la luz, se puede duplicar en el caso de plantas C-4 como la caña de azúcar, el maíz y diferentes especies de pastos y alcanzar el 10% de luz absorbida, pero aun en esos casos el aprovechamiento es muy bajo. Las plantas C-4 se favorecen en condiciones de alta temperatura, iluminación intensa y baja humedad relativa, que son las predominantes en los climas tropicales y subtropicales, relativamente áridos.

12.3. Influencia del suelo

Sin intervención del hombre, la vegetación natural cubre el suelo y lo protege, la misma toma "*prestado*" los nutrientes del suelo y los devuelve al morir, paga además con "*intereses*" pues aporta materia orgánica. En este caso no solo se conserva la fertilidad del suelo sino que se mejora.

El hombre para iniciar su actividad agropecuaria, destruye la vegetación natural, labra el suelo y establece un cultivo o la cría de animales. El suelo queda expuesto a la erosión y parte de los nutrientes extraídos no son devueltos al agrosistema, sino exportados con la cosecha, los animales o los subproductos de estos que el hombre toma para su vida. No se devuelve el "*préstamo*" y parte de la biomasa formada también se exporta, no se pagan los "*intereses*" y al extraerse mas del suelo que lo que se aporta, disminuye su fertilidad, hasta agotarse y desaparecer la civilización que adopto este sistema de manejo. Es frecuente en la actualidad en muchos países del tercer mundo que los agricultores deban cambiar constantemente de áreas (agricultura nómada) debido a la perdida de fertilidad de sus tierras, proceso que es acelerado por las quemas.

En busca de una solución para este problema, el hombre creo los fertilizantes minerales, los que utilizados atendiendo al grado de abastecimiento nutricional de los suelos y otros factores, hacen posible:

- 1) En los suelos bien abastecidos aportar los nutrientes perdidos y conserva su nivel nutricional.
- 2) En los suelos pobres utilizar dosis de abono que superen lo perdido y así mejorar su nivel nutricional.
- 3) En los suelos con exceso nutricional no aplicar el abono para que con el transcurso de las cosechas disminuya al nivel de bien abastecido.

Con los fertilizantes minerales es posible pagar el *préstamo*, pero el *interés* no se aporta al nivel que lo hace la vegetación natural y como se conoce la materia orgánica

juega un importante papel en el suelo. Por otra parte, las reservas de yacimientos de fósforo y potasio disminuyen, finalmente desaparecerán.

En la producción industrial de fertilizantes nitrogenados se emplea un proceso en el cual se utilizan grandes cantidades de energía para romper el triple enlace covalente y hacer que los átomos de nitrógeno puedan reaccionar; se denomina Proceso Habert-Boch. En 1909 Haber descubrió que era posible producir amoníaco a partir de dinitrógeno e hidrógeno ($N_2 + H_2$) a una temperatura de 600 °C y a una presión de 175 barios, utilizando osmio como catalizador (Modak, 2002). A partir de esos resultados se estableció un método industrial que se ha mejorado con los años, pero que se basa en la utilización de altas temperaturas y presiones para la producción de amoníaco a partir de dinitrógeno del aire e hidrógeno.

La elaboración de fertilizantes nitrogenados conlleva a un elevado gasto energético, por ejemplo, para producir amoníaco se requiere tomar el nitrógeno de la atmósfera y el hidrógeno del gas natural o del nafta (en este último caso, se requiere en una fabrica como la de Cienfuegos en Cuba de casi una tonelada de nafta para producir una de amoníaco).

Al agotamiento de los recursos naturales se le suma la contaminación que de este sistema de producción se origina en el medio ambiente.

Los residuos de la cría intensiva de animales, urbanos e industriales pueden ser reciclados bajo determinadas normas de empleo, con ello, se devuelven a los suelos nutrientes exportados y materia orgánica, lo que contribuye a conservar o mejorar su fertilidad y a proteger el entorno de la contaminación. La ganadería tradicionalmente ha ocupado las tierras con mayores limitaciones para el desarrollo y crecimiento de los diferentes cultivos económicos y por esa razón, deben mejorarse esos suelos que con frecuencia se encuentran degradados, al menos, debe evitarse el sobre pastoreo, reciclar los residuos orgánicos y corregir aquellos desordenes nutricionales que se presentan en los animales como consecuencia de desbalance de nutrientes de los suelos mediante el empleo de fertilizantes, enmiendas, y adecuadas prácticas de manejo.

Voisin (1964) reporta diferentes desordenes nutricionales en los bovinos como: tetania de la hierba por alta relación potasio/magnesio en el pasto del ganado, anemia perniciosa por deficiencia de cobalto en el pasto, ataxia enzoótica por deficiencia de cobre en el pasto por exceso de nitrógeno que consumen corderos y terneros, diarrea teart por exceso de molibdeno en pastos, anemia pr deficiencia de cobre y hierro, bocio por deficiencia de yodo (Cuadro 12.1).

Cuadro 12.1.Desordenes nutricionales ocasionado a los animales a través de los pastos (adaptado de Voisin, 1964).

Nombre	Causa	Consecuencia	Corrección
Tetania de la hierba	Alta relación K/Mg en el pasto que consume el ganado	Alteraciones en metabolismo del Mg del animal(se agudiza con exceso de NH ₃ en la panza). Frecuentemente mortal	Abonado con magnesio y evitar excesos de potasio y nitrógeno.
Anemia perniciosa (pinig)	Deficiencia de Co en el pasto	Deficiencia de vitamina B ₁₂ en el animal	Abonado con cloruro de cobalto
Ataxia enzoótica(en terneros y corderos)	Deficiencia de Cu en pastos, que puede originarse por exceso de nitrógeno	Los animales nacen muertos o presentan renguera los que sobreviven.	Abonado con sulfato de cobre
Anemia	Deficiencia de Cu o Fe en los pastos	Bajo nivel de hemoglobina en la sangre. Desordenes en el crecimiento, en el sistema nervioso central y en el reproductor, anorm desarrollo del esqueleto, una reducida síntesis de proteína.	Abonado con Cu o Fe. Modificar condición edáfica que origina insuficiencia
Diarrea “teart” (en bovinos)	Exceso de Mo en los pastos	Diarrea con heces de color amarillo verdoso llenas de burbujas y con olor a podredumbre	Aportar Cu al suelo o al animal
Tetania de Phalaris(en corderos y bovinos)	Deficiencia de Co en pastos	Temblores musculares , sacudidas violentas de cabeza, tropezones caminar y muerte	Abonado con cloruro de cobalto
Bocio	Deficiencia de yodo en pastos	Desarreglo de la tiroides menor fertilidad, menor producción de leche y huevo	Abonado con yodo

Los ejemplos expuestos en el Cuadro anterior, alertan sobre la necesidad de mantener el suelo con un balance nutricional adecuado, lo que puede traducirse como medicina preventiva, para evitar la necesidad de curar al animal o de suministrarle sales minerales para corregir defectos asociados a un mal manejo de la fertilidad de los suelos.

El cobre y el hierro están asociados directamente con la formación de la hemoglobina. Mezclas de vanadio, cobalto y cobre tienen un efecto estimulante sobre la formación de las células rojas de la sangre (Trummert y Boehm, 1957), aunque las anemias pueden tener muchas y variadas causas. Al vanadio también se le atribuye una acción terapéutica beneficiosa sobre ciertos tipos de cáncer (Bergel, 1961).

En el Trans-kei (África del Sur) el 89 % de las regiones cancerosas (cáncer de esófago) se encuentran sobre suelos pobres derivados de rocas sedimentarias, mientras que el 64 % de las regiones libres de cáncer se encuentran sobre suelos ricos derivados de dolerita ígnea, es como si con el empobrecimiento de los suelos, el alimento producido en ellos fuera menos nutritivo y propiciara el cáncer (Burrell, 1962).

La incidencia de bocio se ve favorecida en los terrenos calizos, donde es frecuente la deficiencia de yodo, por otra parte existen regiones donde son frecuentes los excesos, quizás el de fluor es el más difundido, lo que ocasiona descalcificación, con osteoporosis y algunas sínfisis auriculares (Schutte, 1966).

De la época relativamente reciente en que Voisin y Schutte reportan estas alteraciones han aparecido problemas más graves y de más difícil corrección, pues los suelos se han contaminado con compuestos tóxicos.

Tóxicos orgánicos persistentes y con sustancias que no son biodegradables como los metales pesados, al entrar en la cadena alimenticia a través del suelo, llegan al pasto, al animal y al hombre.

La contaminación de los suelos con metales pesados es un problema actual, reportado como de importancia práctica desde hace más de 20 años, por otra parte, aunque se plantan forestales, que no son productos que sirven de alimentos, se requeriría de cientos de años para descontaminarlos, pues en una cosecha anual como máximo se exporta un 0.15% del total de metales pesados presentes en el suelo.

Con el propósito de superar esos y otros problemas se propone actualmente un manejo de los agrosistemas, que permita producir alimentos, con un mínimo de contaminación del entorno y con elevada calidad biológica, ya que, al surgir la Revolución Verde, los avances de la ciencia moderna pretendían la obtención de mayores rendimientos y beneficios económicos, pero se descuidaban otros aspectos, promoviéndose prácticas que propiciaban la degradación de los suelos y que ponían en peligro la sostenibilidad de la vida en el planeta.

La intensiva mecanización facilita la compactación del suelo, por ello en las áreas con pendiente, el agua corre y no penetra en el suelo, este se erosiona; mientras en los lugares llanos con mal drenaje, el agua se acumula, se forman productos tóxicos y la respiración anaerobia de las raíces ocasiona la formación de etanol a niveles tóxicos, se afecta el desarrollo radical y la necesaria absorción de agua y nutrientes por el cultivo. En cualquier caso el laboreo excesivo propicia una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica del suelo, con consecuencias desfavorables para la fertilidad del suelo.

Por otra parte, grandes superficies agrícolas dedicadas al monocultivo y sometidas al uso de productos fitosanitarios que no diferencian entre organismos beneficiosos y dañinos, provocan que se debiliten las defensas naturales existentes y cada vez se requiera de mayor empleo de venenos químicos, ya que la estabilidad y la autorregulación propia de la variedad de especies de los ecosistemas naturales se

pierde al crearse un agroecosistema, y por ello se afecta el equilibrio biológico apareciendo plagas que afectan los cultivos.

Lutzenberger (1984) trata una teoría desarrollada por un biólogo francés llamado Francis Chaboussou que la nombro *trophobiosis*, según la cual, todos los organismos patógenos (hongos, bacterias, nematodos, insectos) carecen de enzimas para descomponer las proteínas en sus aminoácidos constituyentes y requieren de relativamente altos niveles de aminoácidos libres en la planta hospedera para sobrevivir. Esta condición se da cuando la descomposición de las proteínas predomina sobre su síntesis, entonces el hospedero contiene suficiente aminoácidos libres para que el patógeno se alimente de él y fabrique sus proteínas específicas. Las razones por las que puede acumularse un excesivo nivel de aminoácidos libres y sea posible el ataque de un patógeno son:

- Excesivas dosis de fertilizante nitrogenado, lo que se acentúa mas en caso de insuficiencia de potasio.
- Bajo conversión de aminoácidos libres a proteínas (síntesis proteica) debido a: pobre nutrición (especialmente micronutrientes que activan enzimas), aplicación de pesticidas y carencia de agua.

Esta teoría también explica porque en una misma planta, algunas hojas son atacadas y otras no. Las hojas viejas son atacadas porque la proteólisis toma lugar y la proteo síntesis casi cesa, mientras lo contrario ocurre en las hojas nuevas que se mantienen sanas.

Los fertilizantes nitrogenados sintéticos que comúnmente se utilizan son muy solubles y su empleo en altas dosis conlleva a una gran asimilación de nitrógeno por la planta en breve tiempo, se forma gran cantidad de aminoácidos que no pueden ser transformados en proteína y se crean así las condiciones para el ataque del patógeno. Un suministro más gradual y acorde con las necesidades de la planta que no permite esa excesiva acumulación de aminoácidos se puede crear cuando se emplean abonos orgánicos, abonos verdes, existe fijación del nitrógeno atmosférico o se permite una mayor nutrición de la planta pero más balanceada como cuando proliferan los hongos micorrizas y crean un mayor sistema radical que permite mayor absorción de agua y nutrientes en general(téngase presente que un exceso de nitrógeno es causa de acumulación de aminoácidos, pero también lo es una mala nutrición y carencia de agua).

La planta bien nutrida y en un ambiente adecuado puede llevar a cabo una intensa actividad fotosintética y los fotosintatos formados en las hojas son trasladados y exudados en la rizosfera, donde sirven de alimento a hongos, bacterias, algas y actinomiceto que producen vitaminas, antibióticos, enzimas, ácidos nucleídos, fijan nitrógeno, solubilizan nutrientes del suelo por los ácidos formados por la raíz y promueven por ello el crecimiento saludable del cultivo.

Se considera que muchos de los pesticidas modernos inhiben la síntesis proteica y son biocidas sistémicos que actúan directamente en el metabolismo de las plantas. El mayor ataque de patógenos a los cultivos coincide con el mayor empleo de pesticidas y según esta teoría ello es debido más que a la eliminación de los controles biológicos por estos productos, a su efecto sobre la proteosíntesis, aunque también muchos patógenos, particularmente hongos se han vuelto resistentes a los pesticidas.

De lo anterior se induce que las diferencias entre variedades de una especie de planta en su resistencia o susceptibilidad al ataque de los patógenos podría estar asociada con la presencia de aminoácidos libres.

Es una condición necesaria para que aparezca una enfermedad a gran escala la amplia difusión del huésped, lo que ocurre con el monocultivo, mientras las condiciones ambientales deben favorecer al patógeno.

Para la fabricación de fertilizantes minerales y pesticidas se requiere de un alto gasto energético, tradúzcase ello como petróleo, recurso natural no renovable y propenso a agotarse antes de que finalice este siglo y al que se le atribuye principalmente el efecto invernadero.

Los fertilizantes nitrogenados, no son la única opción de suministrar nitrógeno a los cultivos, se ha tratado con amplitud con anterioridad, el aprovechamiento de los residuos de origen orgánico, el del matadero de aves es una excelente fuente de nitrógeno(Arzola et al.,1985), mientras el de la fábrica de glucosa y almidón se destaca por las mejoras en las propiedades físicas de los suelos(Arzola,1985),además; en la nutrición de las plantas, hay dos tipos de relaciones simbióticas que son importantes: las micorrizas y las relaciones en que intervienen bacterias fijadoras de nitrógeno, ambas favorecen la nutrición nitrogenada de los cultivos.

Otras consecuencias derivadas del abuso en el empleo de productos químicos ha sido la contaminación de las aguas, los suelos y los alimentos. El empleo creciente de insumos ajenos a la explotación agrícola, como: fertilizantes químicos, pesticidas y combustibles fósiles (petróleo), no es una forma de producción sostenible, además con ello, se daña la biota del suelo, se reduce la biodiversidad y se contamina el entorno y los productos agrícolas que el hombre consume.

La vegetación natural generalmente está compuesta por gran número de especies de plantas con características y dimensiones diferentes, las que van ubicándose atendiendo a ello, por ejemplo en un bosque existen diferentes pisos de vegetación, lo que permite que aprovechen toda la humedad, los nutrientes y la luz disponible para su crecimiento y desarrollo, mientras que en un monocultivo raramente esto ocurre, quedando nichos ecológicos abiertos que deben protegerse de la invasión y competencia de las malezas oportunistas.

Los musgos y los helechos generalmente prefieren un hábitat húmedo y sombreado, condiciones que existen debajo de los bosques que se encuentran en lugares montañosos. Esto podría ser un ejemplo de un nicho ecológico abierto ocupado por plantas que no compite con los árboles del bosque en tanto que protege al suelo de la erosión.

La vegetación natural es muy eficiente en aprovechar la luz solar, los nutrientes y la humedad del suelo, la biomasa que forman se recicla nuevamente al suelo como materia orgánica, pero cuando se desmonta un bosque y se establece un monocultivo la eficiencia en aprovechar esos elementos es menor, se forma menos biomasa por unidad de superficie y se exporta gran parte de la biomasa con la cosecha. El suelo queda expuesto a las consecuencias de la erosión, por todo esto disminuye la fertilidad del suelo, queda menor cantidad de carbono en el suelo y mayor en la atmósfera lo que contribuye con el efecto invernadero.

En América Latina 2 millones de hectáreas de bosque primario desaparecen cada año y son reemplazadas en principio por cultivos temporales y después del agotamiento de los suelos, por ganadería extensiva.

Durante los últimos 50 años los suelos han sido manejados a través de un paradigma de “mejoramiento ambiental” en donde los problemas físicos y químicos han sido resueltos por prácticas de labranza mecanizada y por aplicación de fertilizantes

minerales. Cheril Palm et al. (2001) proponen abordar el manejo de suelos de forma integrada, incluyendo los diferentes componentes del agro ecosistema (suelos, biota, vegetación y gente) y los procesos que unen y relacionan estos componentes.

Todos los seres vivos, están influidos por el ambiente y la ciencia que los relaciona es la Ecología. El ecosistema incluye tanto los organismos vivos (bióticos), como el ambiente no viviente (abióticos) que interactúan como una unidad funcional.

La interacción *biótica* del cultivo principal con cultivos intercalados, con los macro y microorganismos del suelo, insectos benéficos y perjudiciales, malezas y otros seres vivos, puede ser utilizada de muy diversas formas por el hombre.

12.4. Manejo agro ecológico

En un ecosistema la diversidad de plantas y organismos vivos se distribuyen de acuerdo a la variabilidad de condiciones y de sus exigencias o aptitudes para vivir en las diferentes condiciones del ambiente, gracias a esa biodiversidad estos aprovechan toda la humedad, los nutrientes y la luz, pero cuando el hombre elimina la vegetación natural y establece un monocultivo, quedan espacios que no resultan muy adecuados o aptos para el cultivo sembrado pero si para otras especies de plantas que denominamos malezas. Las malezas pueden habitar los nichos ecológicos abiertos que son dejados en las tierras de cultivo y el estudio de la condiciones que posibilitan que las mismas pueblen exitosamente los agro ecosistemas, podrá conducir al empleo de métodos de control menos agresivos sobre el ambiente, por otra parte, antes de eliminar una "maleza", en particular, se debe aclarar si es dañina o no para un cultivo determinado en una localidad (Gliessman, 1983).

Las malezas interactúan ecológicamente con todos los otros subsistemas de un agrosistema siendo un elemento valioso en el control de la erosión, mantenimiento de la humedad del suelo, estructuración de la materia orgánica y del nitrógeno en el suelo, preservación de los insectos benéficos y la vida silvestre. Las malezas dentro de un sistema de cultivo, pueden reducir la incidencia de plagas. Por ejemplo, los escarabajos, *Phyllotreta cruciferae*, concentran su alimentación en la maleza ***Brassica campestris***, en vez de los repollos, debido a que esta especie de maleza tiene una concentración significativamente más alta de sustancias químicas que atraen a escarabajos adultos y por tanto los desvían de los cultivos. Igualmente ocurre en Tlaxcala, México, la presencia de ***Lupinus spp.*** en floración en campos de maíz, generalmente desvía el ataque del escarabajo frailecillo, ***Macrodactylus sp.*** desde las flores del maíz femeninas hacia las flores del lupino (Altieri y Gliessman, 1983; Trujillo y Altieri, 1990).

Se considera que cultivos, como el centeno, la cebada, el trigo y el tabaco, liberan sustancias tóxicas al ambiente, ya sea a través de la exudación de las raíces o debido a los residuos de sus cosechas (sustancias alelopáticas) las cuales pueden afectar el crecimiento de las malezas (Altieri y Whitcomb, 1979).

El surgimiento de resistencia a herbicidas en algunas especies antes susceptibles constituye un grave problema en casi todos los países con intenso uso de estos productos. Así, entre los herbicidas más aplicados en caña en Cuba, se reportan hasta el año 2000 internacionalmente 60 especies de malezas con resistencia adquirida a atrazina PH 80, 26 a paraquat CS 20, 17 a 2,4-D, 7 a trifluralin CE, 3 a glifosato CS 36 y una a MSMA CS 72. Las estrategias de prevención contra el surgimiento de resistencia a herbicidas incluyen: la rotación de cultivos y la mezcla

de herbicidas con diferentes modos de acción y el manejo integral de malezas incluyendo otros medios de control y prevención (Arévalo, 2000).

El efecto de los herbicidas sobre la macro y microflora del suelo parece estar determinada por diversos factores. El tipo de tratamiento es un elemento a considerar por cuanto los herbicidas preemergentes se aplican, por lo general, en suelo desnudo y por tanto, todo el producto entra en contacto directo con la superficie, mientras en los postemergentes o foliares una porción considerable es interceptada por la parte foliar de las malezas y las plantas cultivables y metabolizada y degradadas a otras sustancias sin afectar el suelo.

En muchas localidades cubanas en que existe el monocultivo de la caña de azúcar, los agricultores atribuyen los bajos rendimientos del cultivo de frijol en rotación, al uso intensivo de herbicidas preemergentes en caña de azúcar y al efecto residual del mismo sobre la leguminosa. Ello ocasiona que importantes medidas para la conservación y el mejoramiento de suelos como la rotación de cultivos y el intercalamiento con leguminosas no pueda generalizarse en esas áreas.

Pérez (1999) considera que el control biológico de malezas es un método de gran perspectiva futura, a base de la utilización de patógenos, insectos y ácaros. Además, los vertebrados como ovejas y cabras por mucho tiempo se han usado para reducir las poblaciones de malezas; las aves como los gansos en cultivos en hileras como los cítricos y en ocasiones en caña (en pequeñas extensiones) y en los períodos post cosecha del arroz, así como los peces y manatíes para el combate de malezas acuáticas son avances de este tipo de control en diferentes especies de plantas cultivadas.

La integración de la aplicación de herbicidas con otros métodos de control, como las coberturas o acolchados de residuos, las labores de cultivo entre surcos, las distancias estrechas entre surcos, la preparación adecuada del terreno y las rotaciones de cultivos, permiten una mayor economía en el consumo de herbicida

Son amplias las posibilidades de usar diferentes alternativas para lograr conducir la lucha contra las malezas hacia la predominancia del control cultural y no a favor de otras variantes más costosas y dañinas al ambiente como las actuales, sin embargo, aún falta conocimientos y cultura ecológica para aprovechar más eficazmente esas tecnologías y no continuar considerando a los herbicidas como la única solución posible.

El uso de sensores, con los cuales se puede aplicar herbicida sólo donde existan malezas (economizando producto) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) a través de satélites, con los que se puede aplicar de un sólo pase diferentes tratamientos a secciones de un mismo campo, de acuerdo a las especies de malezas predominantes en cada una, están incluidos dentro del concepto de "agricultura de precisión" (Mena, 2008).

Por otra parte, parece que alentando la presencia de algunas malezas específicas en los cultivos, es posible mejorar el control biológico de ciertas plagas. La alelopatía puede ser utilizada en la agricultura de diferentes formas como son: aislar e identificar esas sustancias para sintetizarlas y utilizarlas para eliminar malezas o controlar plagas y enfermedades, utilizar la cobertura del suelo con restos de cultivos que posean propiedades alelopáticas o incorporar genes con esas propiedades a los cultivos.

Sustancias excretadas por una especie de planta (conocidas como fitoncidas), pueden tener un efecto tóxico o estimulante sobre otras especies, incluso se utilizan

extractos de determinadas plantas contra plagas y enfermedades, por ello el efecto, de las malezas debe analizarse desde diferentes puntos de vista.

La rotación de cultivo influye sobre: las propiedades del suelo, la erosión, biota del suelo, supervivencia de insectos, nematodos, hongos, macroorganismos del suelo, fitotoxinas y malezas. Dado lo complejas que resultan las interacciones que se presentan en los agrosistemas es necesario el estudio de estas para evitar lo que frecuentemente ha sucedido hasta ahora, que por desconocimiento se han adoptado prácticas en la agricultura moderna que han ocasionado más daños que beneficios.

Los abonos verdes generalmente son leguminosos que se incorporan al suelo con el propósito de aumentar el contenido de materia orgánica, de nitrógeno y de nutrientes que estos cultivos suelen tomar de formas poco asimilables o de capas más profundas del suelo y cuando se incorporan enriquecen con ellos los horizontes superficiales.

Se reportan por su incorporación de nitrógeno al suelo buenos resultados con el uso de crotalaria: 75 y 88 KgN.ha⁻¹ para los suelos Turén y el Sombrero, respectivamente, aunque en general la incorporación de residuos orgánicos es una práctica de alto potencial de uso en los suelos agrícolas venezolanos por el aporte de nitrógeno al suelo (Torres y Rivero, 2001).

La asociación consiste en la convivencia de dos o más cultivos en un mismo campo, los cuales, deben presentar características diferentes, que les permita aprovechar mejor la disponibilidad de nutrientes y humedad en los diferentes estratos del suelo, sin competir entre sí. La parte aérea de la planta debe permitir el mejor aprovechamiento de la luz así como del espacio disponible en lo vertical y en lo horizontal, mientras que el ordenamiento estructural del sistema radical debe buscar una máxima cobertura dentro del suelo (Kolmans y Vásquez, 1995).

En Honduras el frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*), en asociación con maíz ha mejorado el rendimiento, disminuido la erosión, las malezas y los costos por labranza. Los agricultores siembra el maíz y al transcurrir de 1 a 2 meses siembran el frijol terciopelo. Después de la cosecha de maíz sus tallos son doblados y dejados sobre el campo, y el frijol terciopelo comienza a rastrear hasta cubrir los tallos y el suelo. La cantidad de follaje producido por esta leguminosa está entre los 50 a 70 t/há con un espesor de más de 20 cm. Esta cobertura del frijol terciopelo reprime las malezas creando condiciones adecuadas para la siembra directa y la semilla del maíz en la próxima campaña. En el segundo año, el frijol terciopelo del año anterior germina espontáneamente y continúa su ciclo con la siembra nueva del maíz. Sin ningún uso de fertilizantes obtienen 2700 a 3250 Kg. /há de maíz. Esto es más del doble del promedio nacional ampliamente. En la asociación maíz, frijol, calabaza: el maíz aprovecha la luz en la parte más alta, le sigue el frijol en la parte media y la calabaza con menor requerimiento de luz en la parte inferior. Igualmente, el enrizamiento se realiza a diferentes profundidades lo que origina un mejor aprovechamiento de los nutrientes y la humedad del suelo (Kolmans y Vásquez, 1995).

Por otra parte, el aporte de múltiples excreciones en la rizosfera de la raíz favorece la vida del suelo y la fijación de nitrógeno por la leguminosa y los restos de la cosecha benefician las reservas orgánicas y de nitrógeno del suelo. La cobertura del suelo lo protege de la erosión, conserva la humedad, la materia orgánica y disminuye las malezas, mientras que la asociación de cultivos ocasiona mayor diversidad en el agrosistema ampliamente. Cada especie de planta exuda por sus raíces diferentes

sustancias que favorecen o perjudican determinadas poblaciones de organismos en el suelo, por ello, el monocultivo hace que se establezca determinada biota en el suelo en correspondencia con las características de sus exudados, por tal razón, para incrementar la biodiversidad en el suelo se requiere de la rotación y la asociación de cultivos.

Una forma de aproximarse a la biodiversidad existente en los ecosistemas naturales es emplear la rotación de cultivos, los cultivos intercalados y todo aquello que restablezca en alguna medida las condiciones existentes en la vegetación natural, mientras otra forma, es la producción en laboratorios de controles biológicos, como entomófagos y entomopatógenos, la inoculación de leguminosas con *Rhizobium* o la reproducción en fermentadores de microorganismos fijadores de nitrógeno como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter* etc., que pueden aplicarse a los cultivos.

La FBN es una adaptación de las plantas a una situación de carencia de N. A causa del elevado costo energético que demanda este proceso, que alcanza de 16 a 18 moles de ATP por molécula de N reducida, la abundancia de N en el suelo afecta drásticamente la FBN, disminuyéndola o anulándola. Restricciones en el crecimiento y en la fotosíntesis, provocan reducciones en la FBN que a su vez restringen más el crecimiento, afectándose así el rendimiento de los cultivos. Por otra parte, la disponibilidad de agua afecta el establecimiento de los nódulos. Si la emergencia se retarda por escasez de humedad, la zona de infección se desplaza hacia los extremos de la raíz principal y las raíces laterales. Estos nódulos, al disponer de menor flujo de carbohidratos provenientes de la fotosíntesis, son poco eficientes en fijar N. Por último, períodos prolongados de sequía durante la etapa reproductiva pueden provocar un cese temporario o permanente de la actividad fijadora de los nódulos (Racca, 2002).

La caña de azúcar se ha beneficiado significativamente por la asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno, atribuyéndose a ello, que no disminuyeran las reservas de nitrógeno del suelo, en lugares donde se ha establecido este cultivo durante décadas, esta asociación se ha reportado en muchos cultivos y cada día cobra mayor importancia por su magnitud y por abarca un mayor número de especies.

Desde hace algunos años se reporta la FBN en la palma de aceite africana, cultivo en que diferentes especies de bacterias diazotroficas se han encontrado en su rizosfera, lo que sugiere un potencial para beneficiar la FBN (Azlin et al., 2005,2008; Sui Yang et al., 2009).

Se conoce que el establecimiento de un cultivo por largos períodos de tiempo puede provocar un incremento en las poblaciones de plagas, para evitar esto se recomienda rotar con otros cultivos de diferente familia botánica. Mientras mayores sean las diferencias botánicas entre los cultivos en una secuencia de rotación, mejor control cultural de plagas puede esperarse (Altieri, 1983).

Desde que el hombre utilizó la nicotina del tabaco para el control de plagas, se conoce que existen especies de plantas de las que se pueden extraer extractos para el control de insectos dañinos como por ejemplo el "nim", árbol que sus semillas molidas mezcladas con agua se puede aplicar con ese propósito a los cultivos o el "paraíso" árbol al que se le atribuye propiedades insecticidas debido a la presencia en las hojas y las semillas de sustancias biológicamente activas, entre las cuales se destacan *Azadirachtina*, que posee efecto antiapetitivo, regulador de crecimiento en los insectos y que provoca la muerte de estos por su acción tóxica.

Para combatir las plagas y enfermedades no resulta efectivo el empleo exclusivo de medios químicos pues los patógenos incrementan su resistencia ante el uso

continuado de determinado producto, sin embargo, combinados con adecuadas prácticas culturales se consigue el control integrado de estos.

El suelo es el recurso natural en que se sostiene toda la producción agropecuaria y por tanto la vida del hombre, la información detallada sobre las propiedades de los suelos, clima, características del cultivo, etc., permiten definir que prácticas agrícolas deben ser utilizadas para eliminar el efecto negativo que sobre el rendimiento o la fertilidad del suelo pueden tener los factores que en cada localidad son limitantes y paralelamente proteger el entorno de la contaminación.

El diagnóstico de la necesidad de fertilizantes requiere tomar en consideración los componentes del agrosistema, con el propósito de alcanzar los mejores resultados económicos, ecológicos y sociales.

12.5. Calidad del producto agrícola

A partir de átomos y moléculas inorgánicas procedentes del aire y del suelo se sintetizan los compuestos orgánicos que forman los organismos vegetales, los que a su vez constituyen alimentos para diferentes especies animales.

Cuando el hombre selecciona alimentos en el mercado, se guía principalmente por la apariencia de estos en color, textura, forma, tamaño y olor, posteriormente un sabor agradable confirmará su selección y uno desagradable su rechazo (Figura 12.2).



Figura 12.2: Una excelente apariencia del producto, es la primera impresión, hace que este “entre por los ojos” del consumidor.

El sabor sin embargo, no sólo representa un indicador aparente de la calidad, pues su efecto sobre la salud, frecuentemente se relaciona. En la papa la insuficiencia de manganeso origina un gusto desagradable, lo mismo ocurre en los nabos con insuficiencia de boro, además adquieren un aspecto cristalino y no se ablandan con la cocción (Pandit et al., 1940; Wallace, 1957), niveles de cobre superiores a 2ppm dan al queso un sabor metálico (Stine et al., 1953).

Los elementos esenciales que las plantas toman del suelo representan una porción muy pequeña de su composición total, pero son de gran importancia en la formación de los diferentes compuestos orgánicos que conforman sus tejidos, además, la generalidad de esos elementos también resultan esenciales para la vida animal.

La calidad biológica de los productos destinados a alimento animal son de interés para el agricultor cuando con ellos alimenta animales en su propia finca, en ese caso le resulta mas importante realizar un abonado que le garantice la mejor calidad de los alimentos, (ya que ello se revierte en mejor salud y producción de carne y leche de los animales) que obtener mucha hierba o granos de pobre valor como alimento.

Los diferentes compuestos que sirven de alimento a los animales herbívoros son digeridos y absorbidos como se ilustra a continuación:

Hidratos de carbono: Su transformación comienza (en el caso del cerdo) en la boca con la tialina y continúa en el intestino delgado con la amilasa, enzimas que transforman el almidón en maltosa. Esta continúa degradándose y mediante la invertasa (en el jugo intestinal) se transforman los azúcares compuestos en sencillos, que son absorbidos en el intestino delgado y pasan a las venas.

Celulosa y pentosanas: Estas sustancias son atacadas por bacterias en las tres primeras cavidades del estómago de los rumiantes, en el ciego de los caballos y, en menor grado en el intestino grueso de otros animales. Dichas bacterias descomponen la celulosa y las pentosanas en ácidos orgánicos y en azúcares que sirven de alimento al animal.

Proteínas: Se descomponen en aminoácidos, estos son solubles y fácilmente absorbidos por las vellosidades del intestino, después pasan a la sangre y son llevados a todas las partes del organismo, para ser tomados por las células de los tejidos. Las plantas pueden sintetizar todos los aminoácidos que le resultan esenciales, pero los animales no pueden hacerlo y requieren del suministro en su dieta de determinados aminoácidos que se nombran esenciales (Arginina, Histidina, Isoleucina, Leucina, Lisina, Metionina, Fenilalanina, Treonina, Triptófano, Vallina).

Grasas: En el intestino delgado, con la ayuda de la bilis producida por el hígado, las grasas se emulsionan (disgregan en gran número de gólicas pequeñas). La lipasa, enzima del jugo pancreático, descompone entonces las grasas en ácidos grasos y glicerina, que son absorbidos por las vellosidades del intestino.

Vitaminas: Son sustancias orgánicas necesarias para el mantenimiento apropiado de las funciones vitales de los animales y al igual que los aminoácidos esenciales deben suministrarse en la dieta, ya que el cuerpo animal es generalmente incapaz de sintetizar sus propias vitaminas en cantidades suficientes. Se clasifican de acuerdo a su solubilidad como: solubles en grasa (las vitaminas A, D, E, K) y solubles en agua (las vitaminas del complejo B y vitamina C)

Minerales: Son absorbidos principalmente en el intestino delgado (calcio, fósforo, cobalto, cobre, hierro, yodo, manganeso).

Estimuladores digestivos: Son sustancias que se adicionan para complementar la composición de los alimentos y mejorar la eficacia de utilización de los mismos. Hay dos posibles razones por lo que estas sustancias son capaces de mejorar eficacia del alimento: o ellos afectan la flora intestinal o ellos afectan el metabolismo. Los estimuladores digestivos actúan principalmente en el tracto intestinal y ejercen un efecto beneficioso en la flora del intestino. Un buen equilibrio de la flora intestinal bloquea la entrada a patógenos en el cuerpo. Esto aumenta la resistencia de los animales contra tensiones que por otra parte pueden disminuir el desarrollo animal.

Absorción de los principios nutritivos: Todos los principios nutritivos digeridos se absorben principalmente por las vellosidades del intestino delgado y finalmente entran en la corriente circulatoria. La sangre con esos principios nutritivos, llega a los capilares de todas las partes del organismo. Después, las sustancias nutritivas

atraviesan las paredes de los capilares y pasan a la linfa que rodea las células. Finalmente, penetran en las células para servirles de alimento y de fuente de energía para todos los procesos vitales.

Con los pastos y forrajes se procura en primer lugar producir proteína bruta y carbohidratos, pero también el contenido de minerales en los forrajes y en el heno, influye en el valor del alimento. Esto es importante para mantener la salud del animal. El contenido de proteína y minerales está influenciado por la composición botánica, las leguminosas contienen no sólo más proteína que las gramíneas, sino también más calcio y magnesio. Otro factor es la edad, plantas más jóvenes, son más ricas en minerales en base a materia seca.

El manejo de la composición botánica, edad de cosecha y abonado del pasto debe conducir a una adecuada nutrición de los animales.

A los animales estabulados se les puede suministrar una ración mineral bien dosificada y controlada, cuando el alimento que consumen es insuficiente en algún(os) elemento(s) esencial(es).

Voisin (1966) expresa que Sicilia que fue el granero de Roma, perdió los nutrientes de su suelo con cada barco de trigo que llevaba a esa ciudad, así Sicilia se convirtió en una de las tierras más pobres del mundo.

En Europa occidental y en América del Norte, al menos el 90 por ciento de las materias que integran el excremento humano no vuelve más a la tierra de donde saliera, sino que van a perderse para siempre como aguas residuales (Voisin, 1966).

Los contenidos de metales pesados en los suelos, son objeto de atención desde hace varias décadas, se consideran valores normales en los suelos en mg/kg de suelo seco; <0.75 de Cd, < 20 de Cu, <0.5Hg, <50 de Ni, <50 de Pb y <100Zn (Kloke et al., 1984; IPE, 1986).

El recurso natural más importante en cualquier unidad de producción agropecuaria es la fertilidad y potencial de rendimiento del suelo, de esto depende que se alcancen abundantes cosechas, alimento animal y beneficios económicos.

La salud del hombre está relacionada con la composición de las plantas y animales que consume, aunque excepto en el caso de agricultores aislados, los alimentos que el hombre consume provienen de muy diversos lugares, lo que origina que ese efecto sea menos perceptible, pero podría preguntarse, que pasaría si no existieran normas e inspectores que garantizaran la calidad de esos alimentos y los mismos estuvieran contaminados con pesticidas, metales pesados, insalubridad y fueran de pobre valor nutricional.

El concepto de calidad abarca las más diferentes propiedades de los productos agrícolas, se refiere tanto a su inocuidad y efecto favorable sobre la salud del consumidor, como a su olor, color, sabor e incluso es diferente según el uso a que este destinado el producto, no es lo mismo, tomate para conserva que para consumo directo en ensalada.

12.6. Finca Agropecuaria Integrada

Con este sistema se persigue aprovechar con algún propósito todo lo que se obtiene en una explotación agropecuaria, lo cual, tiene una evidente ventaja económica, paralelamente se establece un sistema cerrado sin que prácticamente no existan desechos que contaminen el entorno, en tanto que se sustituyen innumerables insumos

externos lo que representa un importante ahorro de recursos naturales. Aumentar la cantidad y calidad de los productos agropecuarios obtenidos, darles valor agregado y comercializarlos directamente con el consumidor nacional o exportarlos a precios competitivos; recuperar suelos degradados; captar, almacenar y utilizar eficientemente el agua; descontaminar las aguas servidas; captar nitrógeno atmosférico y de los residuos y convertirlo en fuentes de proteína para la alimentación animal y humana; capturar e inmovilizar carbono y descontaminar el aire; utilizar energías renovables y tracción animal; lograr seguridad alimentaria; generar empleo justificado económicamente y proporcionar bienestar a los habitantes del campo y de la ciudad. Otro ejemplo de cómo aprovechar al máximo los residuos de la explotación agropecuaria se presenta con la alimentación de peces con las excretas de pollo y patos (Figura 12.3).



Figura 12.3. Acuicultura con excretas de pollo y patos en Fodun, Chinchina, Dpto Caldas, Colombia (Arzola, 2010).

A la producción de proteínas como alimento animal en estas fincas, podría contribuir la cría de lombrices, ya que pueden utilizar gran número de residuos como son: desechos de comida, de cultivos, basura urbana orgánica, papel y estiércoles de animales. Por cada tonelada de estiércol fresco se produce 500 kilos de humus y 100 kilos de carne de lombriz. Cuando se hace la cosecha, una parte de las lombrices puede ser destinada a la continuidad del criadero y la otra a la elaboración de harina. Esta contiene del 62 al 82% de proteína de excelente calidad y la totalidad de los aminoácidos esenciales, superando a la harina de pescado y la soja.

En una finca agropecuaria integrada, la alimentación de los animales dependerá de sus recursos propios, por tanto, debe lograrse una adecuada composición de los pastos (gramínea y leguminosa) y elevada producción de cultivos que sirvan como alimento animal (soya, maíz, caña de azúcar). En los límites de la finca es conveniente sembrar leguminosas de alto porte como *Leucaena*, cuyas hojas y ramas pueden utilizarse como forraje verde o para elaborar heno y ensilaje

necesario para alimentar los animales en la época de seca. Cerca del establo, se debe disponer de gramíneas de corte y de un banco de leguminosas para suplementar la alimentación animal.

La rotación de cultivos puede contribuir a conservar los suelos y a requerir de menos recursos externos de la explotación. La alfalfa puede producir hasta 10 toneladas de materia seca por hectárea, y hasta 200kg de nitrógeno, lo suficiente como para cubrir la mayoría de los requerimientos de abonos nitrogenados de los cultivos. En varias partes del cinturón de maíz de los Estados Unidos la alfalfa puede significar un ahorro de hasta 50% en los costos por nitrógeno para la primera cosecha de maíz subsiguiente en la rotación. Por supuesto que durante su año en la rotación, produce un alimento de elevada calidad para el ganado. Las rotaciones también pueden evitar o disminuir la incidencia de insectos, malezas y enfermedades al romper el ciclo biológico de las plagas de modo efectivo.

Ciertas malezas tienden a asociarse con determinados cultivos y el cambio a un cultivo diferente interrumpe este ciclo y disminuye la presión de selección por determinadas especies (Pérez, 2000). Este propio autor señala que las rotaciones variables conducen a mejores resultados porque no permite manifestación repetida de iguales condiciones para el crecimiento poblacional de determinadas especies. En caña de azúcar se han obtenido buenos resultados rotando con soya, maní, caupí, girasol y boniato, especie esta última eficiente para controlar determinadas especies de malezas consideradas de difícil control como *Sorghum halepense* (Don Carlos) y otras como *Rottboellia cochinchinensis* (Zancaraña), *Amaranthus dubius* (Bledo) y *Parthenium hysterophorus* (Escoba amarga).

12.7. Sistemas Agroforestales

En las zonas semiáridas, la implementación de sistemas agroforestales es un componente importante en el manejo integral de cuencas para la rehabilitación y conservación de los recursos suelo, agua y vegetación.

A la actividad forestal se puede integrar otras actividades como la industria, ganadería, apicultura, entre otras y formar otros sistemas (Benedetti, 1996), por ejemplo:

- **Sistema forestal puro o mixto de uso múltiple.**- Consiste en forestar a una densidad completa, donde la producción principal es forestal: madera, leña, postes y varas, existiendo también la posibilidad de obtener otros productos como forraje, miel y demás derivados del bosque
- **Sistema silvopastoril.**- Es una combinación de especies arbóreas o arbustivas con pradera natural o mejorada, donde el producto principal es el forraje, lo que posteriormente es traducible en carne, leche, queso y cuero.
- **Sistema silvoagrícola.**- Este modelo, donde se combina la actividad agrícola con árboles, donde el objetivo principal es la obtención de beneficios agrícolas y forestales.
- **Sistema agrosilvopastoril.** Combina la actividad de producción agrícola, producción animal y silvicultura. Desde el punto de vista netamente ambiental, la agroforestería entrega una enorme contribución en lo referido a la disminución de los procesos de erosión y desertificación.

12.8. Agricultura Urbana

La Agricultura Urbana como alternativa a la seguridad alimentaria, considera : la necesidad de la producción de alimentos en las ciudades, oportunidad para las personas de menos acceso a recursos y el uso óptimo de los suelos de acuerdo a su vocación, ya que existen espacios no urbanizables con valor de uso agrícola, lo cual debe considerarse en la planificación urbana. La Agricultura Urbana gana espacios en ciudades de todo el mundo, como una alternativa para los más pobres. El uso óptimo de los suelos considera la conservación de suelos, el uso apropiado de los espacios vacantes y el aprovechamiento del espacio cultivado y las tierras. Las densidades apropiadas de cultivo, el uso de policultivos, rotaciones y otras medidas fitotécnicas se mencionan como prácticas de un uso eficiente de suelos, siguiendo atributos de una práctica agrícola sostenible, apropiada sociocultural y ecológicamente. Por otra parte se expresa el cumplimiento de las disposiciones legales sobre el uso de suelo urbano y periurbano (Socorro, 2003).

Bibliografía Consultada

Altieri, M.: Agroecología, Bases Científicas de la Agricultura Alternativa. Valparaíso, Edit. CETAL. Chile, 1983: 184pag.

Altieri, M.A.; Whitcomb, W. H.: The potential use of weeds in the manipulation of beneficial insect. HortScience 14(1979):12-18pp.

Altieri, M.A. ; Gliessman, S.R.: Effects of plant diversity on the density and herbivory of the flea beetle, *Phyllotreta cruciferae* Goeze, in California collard (*Brassica oleracea*) cropping systems. Crop Protection 1990:21(1983):497-501pp.

Arévalo, R.: Manejo sostenible de malezas en *Saccharum* spp. Disertación del Académico Correspondiente, Academia de Ciencias de Argentina, 2000:44 pp.

Arzola, N.: Estudio sobre la posibilidad de aplicación en la agricultura de los residuos de la Fabrica de Glucosa y Almidón de Cienfuegos, Revista Centro Agrícola, (2) (1985) 67 _ 106 pp.

Arzola, N.; Lourdes Pérez; Santana, B.: Estudio sobre la posibilidad de aprovechamiento del desecho del matadero avícola como abono, Revista Centro Agrícola, (1) 12(1985) 45-53 pp.

Arzola, N.: Foto sobre excretas de pollos y patos como nutrientes de peces en Fodun, Chinchina, Dpto.Caldas.Colombia, 2010

Azlin, C.O.; Amir, H.G.; Chan, L.K.: Isolation and characterization of diazotrophic rhizobacteria of oil palm roots. Malaysia Journal of Microbiology 1(1) (2005):31-35pp.

Benedetti, S; Valdebenito, G: Evaluación de propuestas agroforestales para pequeños propietarios. En: Bosques y Desarrollo N° 16. 1996: 50-52pp.

Bergel, F.: Chemistry of Enzymes in Cancer (Charles C. Thomas, Springfield, Illinois, USA.1961.

Botero, R.: Manejo de excretas en sistemas agropecuarios integrados. Universidad Hearth de Costa Rica. Segunda Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006(CD con ponencias).

Burrell, R.J.W. :<Esophagel Cancer among Bantu in the Transkei>.J.Nat.Cancer Inst., 28(1962)495-514pp.

Mena, C.: Avances en el control sostenible de malezas en retoños de caña de azúcar de Villa Clara. Tesis presentada en opción al título académico de Máster en agricultura sostenible.UCLV, Cuba.2008:77pp.

Modak, J.M.: Haber Process for Ammonia Synthesis. *Resonance. Journal of ScienceEducation*(India)7(2002):69-77URL:
<http://www.ias.ac.in/resonance/Sept2002/pdf/Sept2002p69-77.pdf>)

Cheryl Palm, S.; Isabelle Barois: Un enfoque integrado para el manejo biológico de los suelos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programas y Resúmenes. Varadero, Cuba, 2001.

Gliessman, S.R.; Garcia, E.R.; Amador, A.M.: The ecological basis for the application of traditional agricultural technology in the management of tropical agro-ecosystems. *Agro-ecosystems* 7(1981)173-185pp.

IPE:Kontrollsystem der Umweltbelastung Schwermetallgehalte des Bodens.F/E-Bericht.Jena,1986.

Kolmans, E.; Vásquez D.: Manual de agricultura ecológica. Una introducción a los principios básicos y su aplicación. Programa agroecológico (1995):148 pp.
Lutzenberger, A.J.: crops and Pests; Are poisons the answer?. *The Ecologist*. 14, (2)(1984):13pp.

Pandit,C.G.;Raghavachari,R.;Subba Rao,R.;Krishnamurti,V.:<Endemic Fluorosis to South India:A Study of Factors Involved in the Production of Mottled Enamed in Clildren and Severe Bone Manifestations in Adults>.Ind. Journal Med. Res.,28(1940)535-555pp.

Pérez, E.: Toxinas de microorganismos como herbicidas. Memorias, I Encuentro Nacional de Ciencia de Malezas, Jardín Botánico Nacional, La Habana, 1999: 7-8 pp.

Pérez, R.: Manual práctico para el cultivo y uso del frijol de soya. Consejo de Iglesias de Cuba, La Habana.2000:31pp.

Racca, R.: Fijación biológica del nitrógeno. En: Actas 1er Simposio de Fertilidad de Suelos y Fertilización en Siembra Directa. X Congreso Nacional de AAPRESID. 2002: 197-208 pp.

Schutte, K.H.: Biología de los microelementos y su función. Editorial Tecnos S.A. Londres. 277pp.

Socorro, A.R.: Programas para mejorar el nivel y la calidad de vida en el municipio Cienfuegos, Cuba, Unión Internacional de Autoridades Locales./ Federación Latinoamericana de Ciudades, Municipios y Asociaciones, IULA FLACMA, Cities Alliance. Quito, Programa de Gestión Urbana. UN/Habitat. Cuaderno de Trabajo N° 125(2003): 172 pp.

Stine, J.B.; Loos H.; Daume H.E.: <Copper and Cheddar Flavours>, Dairy World, Chicago 32 (1953) 10-14pp. ((Chemical Abstracts, 48,900).

Sui Yan, T.; Hashidoko, Y.; Melling, L.; Kah Joo, G.: Isolation and characterization of endophytic nitrogen-fixing bacteria in roots of oil palm (*Elaeis guineensis* Jack) cultivated in tropical peatland of Sarawak, Malaysia. Proceedings of Agriculture, biotechnology & sustainability Conference. Volume 3. Malaysian Palm Oil Board. PIPOC, 2009:1054-1063 pp.

Taiz, L.; E. Zeiger: Plant Physiology. Sinauer Ass. Inc. Publisher. 1998:195-247pp.

Torres, A.; Rivero, C.: Efecto de la incorporación de residuos orgánicos marcados con ¹⁵N sobre el nitrógeno en dos suelos venezolanos. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba, 2001.

Trummert, W.; Boehm, G.: <Über das Spurenelement Vanadium und seine hamopoetische Wirkung>, Blut., 3(1957) 211-216 pp.

Trujillo - Arriaga, J.; Altieri, M.A.: A comparison of aphidophagous arthropods on maize polycultures and monocultures in central Mexico. Agriculture, Ecosystems and Environment 31(1990): 337-349pp.

Vélez, M.: Producción de leche con forrajes en el trópico: experiencias en el zamorano. Segunda Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006(CD con ponencias).

Voisin, A.: Influencia del suelo sobre el animal a través de la planta. La Habana, 1964:284 pág.

Voisin, A.: Leyes científicas en la aplicación de los abonos. Editorial Tecnos. S.A. Madrid, 1966:150pp.

Wallace, T.: The Diagnosis of mineral Deficiencies in Plants by Visual Symptoms (H.M.S.O. Londres). 1951.

“Menos del 20% de la extensión mundial de la caña se fertiliza debidamente”

Honig

CAPITULO 13. EMPLEO DE FERTILIZANTES Y ENMIENDAS EN CAÑA DE AZUCAR

13.1. Introducción

La caña de azúcar -genero *Saccharum* - planta originaria de la India y de las Islas del Sur del Océano Pacífico, constituye dentro de las plantas de cultivo, la gramínea de mayor utilización de la Energía Solar, con un gran crecimiento vegetativo, pues produce anualmente entre 15-90 toneladas por hectárea por año de materia seca. Estos rendimientos aunque variables, atendiendo a los diferentes factores ambientales y de manejo agrícola que lo afectan, resultan elevados y requieren para ser alcanzados de una adecuada nutrición del cultivo. Por esas razones, son necesarias la fertilización y el empleo de enmiendas que permitan un óptimo estado nutricional de la plantación, con ello se garantiza, una adecuada y sostenible producción del cultivo. Entre las principales causas de los bajos niveles de productividad del cultivo de la caña de azúcar se señalan el déficit hídrico y nutricional (FUNDAZUCAR, 1993), lo que evidencia la importancia de un adecuado empleo de los fertilizantes y enmiendas. La insuficiencia de cualquier elemento esencial puede ser corregida mediante la aplicación de fertilizantes minerales, para suplir aquella porción del nutriente que no suministra el suelo.

La materia orgánica a pesar de no ser imprescindible para la producción agrícola, como se demuestra con los cultivos hidropónicos, es de gran significado en los suelos agrícolas, pues mejora la estructura, la permeabilidad, la aireación, la retención de humedad, la consistencia, la capacidad de intercambio catiónico, la vida en el suelo y es una reserva de elementos mayores y menores. Los abonos orgánicos superan en los aspectos antes mencionados a los fertilizantes minerales, además ellos ceden de una forma más gradual los nutrientes lo que está más acorde con las necesidades del cultivo (Arzola, 1994).

El uso racional de los fertilizantes minerales consiste en aplicar la menor cantidad de ellos, necesaria para alcanzar los mayores beneficios económicos y ecológicos; esto se explica por la ley de los aumentos decrecientes, ya que una vez que se llega al tope de rendimiento, las aplicaciones adicionales del abono no surten beneficio alguno, incluso pueden resultar en un exceso que afecte el rendimiento o la calidad del producto agrícola (ley del máximo). Por otra parte, existe la posibilidad de daño ecológico, pues la porción del abonado que no es extraída por la planta queda como “residuo” en el suelo, donde podría perderse por diferentes vías, contaminando el entorno o creando un exceso nutricional perjudicial para la producción o para la calidad del producto agrícola..

13.2. Factores edáficos potencialmente limitantes del rendimiento

En evaluaciones realizadas en el ingenio La Margarita en México, se pudo constatar que aquellos agricultores que mas nitrógeno (Figura 13.1), fósforo (Figura 13.2) y potasio (Figura 13.3) aplicaban por unidad de producto agrícola, eran los de menores rendimientos, solo gastaban más, pero no producirán más, debido a que existía

factores que limitaban el rendimiento y la eficiencia de la fertilización (despoblación, malezas, mal drenaje, compactación, etc.)(INICA, 2003).

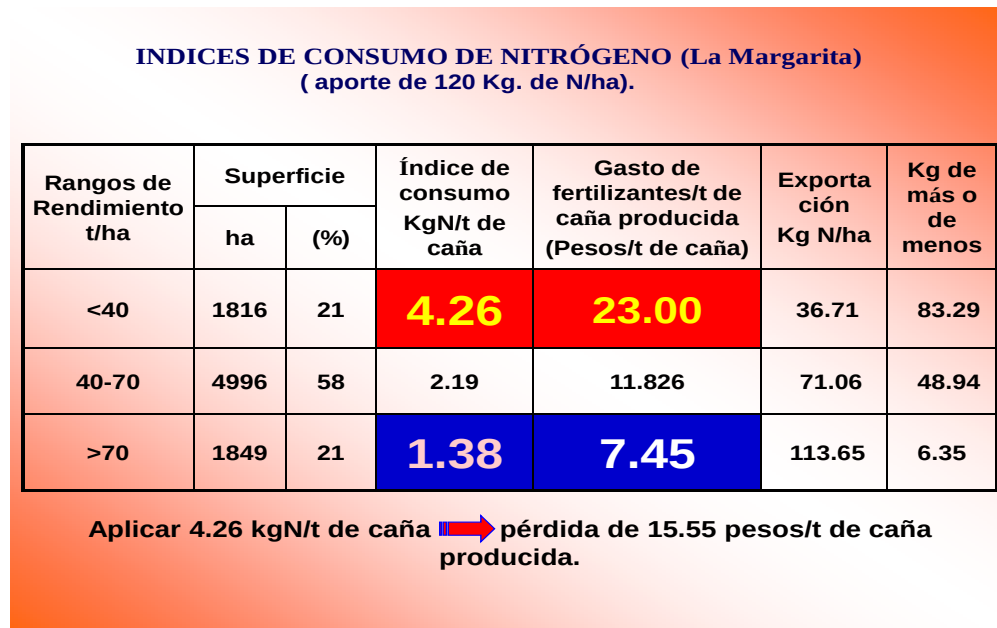


Figura 13.1.Eficiencia de la fertilización nitrogenada al presentarse factores limitantes del rendimiento ajenos al nitrógeno (ingenio La Margarita, Oaxaca, México).

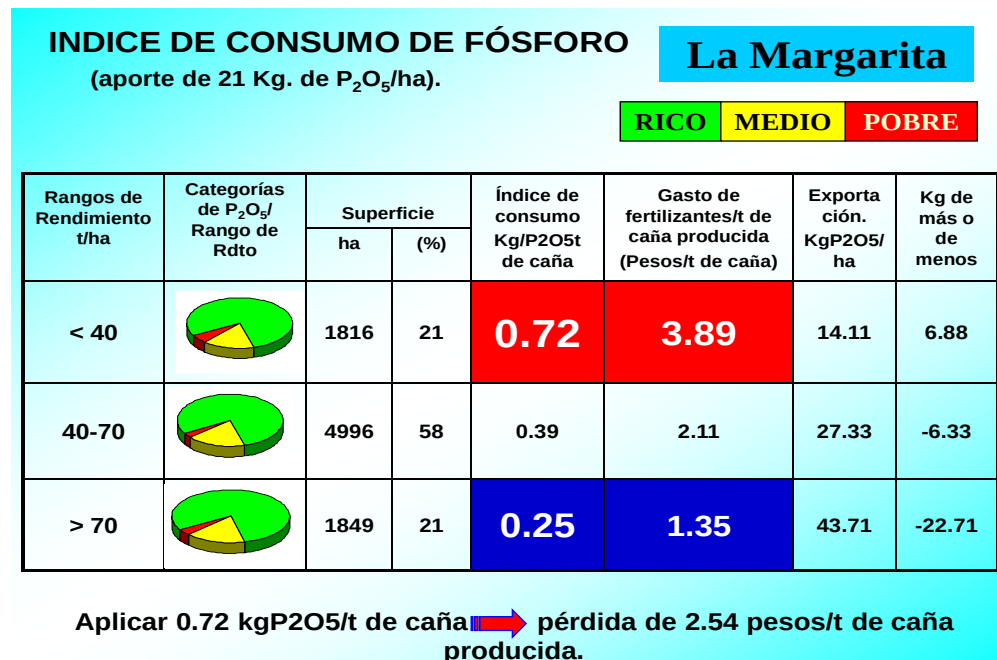


Figura 13.2. Eficiencia de la fertilización fosfórica al presentarse factores limitantes del rendimiento ajenos al fósforo (ingenio La Margarita, Oaxaca, México)

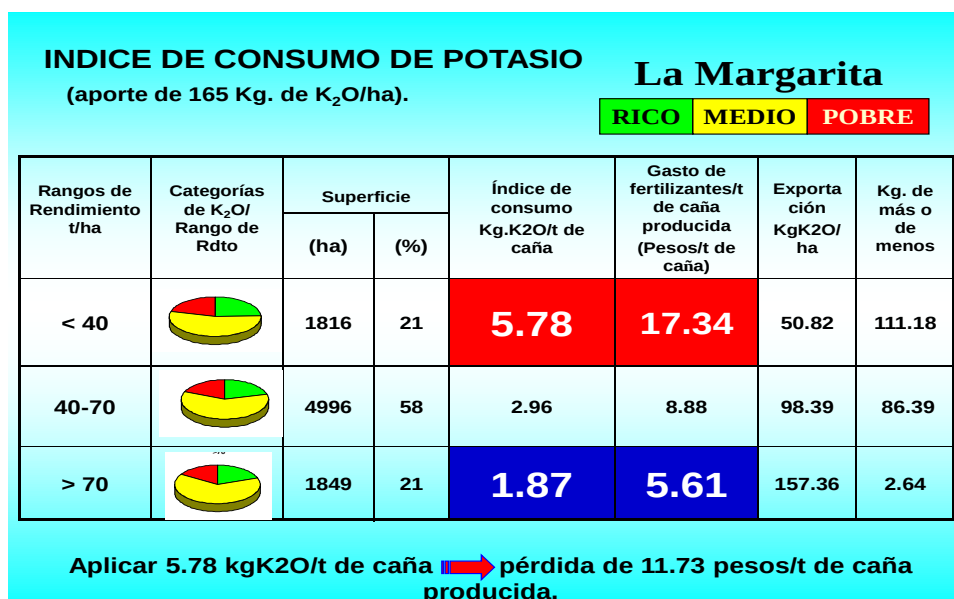


Figura 13.3. Eficiencia de la fertilización potásica al presentarse factores limitantes del rendimiento ajenos al potasio (ingenio La Margarita, Oaxaca, México)

Como se ha comentado, un conjunto de factores pueden limitar los rendimientos y la eficiencia de la fertilización, incluso su efecto puede ocasionar que no se alcance producción alguna, no existiendo en ese caso razón para aplicar fertilizantes. Para ilustrar lo anterior se mostrarán resultados de estudios en recipientes (tanques) en que se plantó caña de azúcar bajo condiciones controladas y se hizo variar la intensidad de diferentes factores edáficos (Arzola y Vilma Contreras, 2010).

- **Drenaje**

La inundación temporal afectó el sistema radical cuando el esqueje permaneció bajo agua; a partir de los primeros 4 días ocasionó reducción del mismo en un 35.75%, a los 8 días la afectación del sistema radical resultó más marcada (58.52%), no alcanzando a brotar la planta a los 16 días de inundación (Cuadro 13.1).

La inundación afecta la formación de tallos, hojas y el azúcar por tanque a partir de los 4 días, mientras sucede lo contrario con el contenido de azúcar de los tallos pues todas las variantes con inundación superan a la del riego a capacidad de campo en este indicador (cuando no se llega a la mortalidad de las plantas, a 16 días de inundación).

El problema del sobrehumedecimiento del suelo que causa una situación de hypoxia, es mundial, se estima que el 6% de la superficie terrestre está ocupada por áreas anegadas o propensas a un encharcamiento temporal (Maltby, 1991). En los suelos con estas características la difusión de los gases a la atmósfera se afecta seriamente, se reducen rápidamente los niveles de oxígeno, lo que perjudica el buen desarrollo del sistema radical (Gomes de Moraes et al., 2001),

Cuadro 13.1: Efecto de la inundación temporal durante la brotación sobre algunos indicadores de calidad y biomasa formada por el cultivo de la caña de azúcar (Suelo arcilloso pesado; variedad Ragnar) (Arzola y Vilma Contreras, 2010).

Tratamientos	Peso raíces/ tanque (g)	Kgde azúcar/ t de caña	kg.de azúcar/ tanque	Peso total tallos y hojas (g)	
				verde	secas
1. Riego hasta Capacidad de Campo	373.70a	78.95b	0.74a	11640.00a	4618.06a
2. Inundado por 2días	355.60a	87.77a	0.77a	11090.00a	4506.22a
3. Inundado por 4días	240.10b	90.19a	0.74a	10685.00a	4703.97a
4. Inundado por 8días	155.00c	87.19a	0.50b	7507.50b	3181.42b
5. Inundado por 16días	0.00d	0.00c	0.00c	0.00c	0.00c
CV	9.90	4.75	15.21	13.63	16.61
Significancia	**	**	**	**	**

- **Graviliosidad**

Como se puede apreciar en el Cuadro 13.2, por encima del 40% de grava se afecta toda la biomasa formada en la parte aérea de la planta, mientras que el sistema radical es afectado por encima del 20% de grava, en mayor medida, mientras más abundan estas. Los Kg de azúcar/t de caña, incrementan en general, a medida que aumenta el contenido de grava, lo que significa que un alto contenido de la misma en el suelo ocasiona menor rendimiento agrícola pero mayor industrial, esto explica que no se aprecie disminución del azúcar por tanque al aumentar el contenido de gravas, excepto en contenidos extremadamente elevados de la misma, pues este indicador disminuye solo con 60% de gravas.

Atendiendo a estos resultados la producción de azúcar por unidad de superficie agrícola en suelos gravillosos, que no alcancen contenidos extremadamente altos de gravas (60%)no seria una limitación para este cultivo, siempre que se empleen medidas adecuadas en estas condiciones como: plantación a distancias estrechas, enmiendas orgánicas y riego.

Cuadro 13.2. Influencia del contenido de grava del suelo, sobre algunos indicadores de calidad y biomasa formada por el cultivo de la caña de azúcar (Suelos de textura gruesa; variedad Ragnar) (Arzola y Vilma Contreras, 2010).

Tratamientos	Peso raíces/ tanque (g)	Kg de azúcar/tde caña	Kg azúcar/ tanque	Peso total tallos y hojas (g)	
				verde	secas
1.- sin gravas	1528.47a	84.86bc	0.61ab	9600.00a	3437.62ab
2.- 10% gravas	1532.20a	83.35 c	0.60ab	9653.33a	3682.08ab
3.- 20% gravas	1451.97a	88.64abc	0.64ab	9520.00a	3657.51ab
4.- 40% gravas	1246.10b	93.90ab	0.74a	10186.67a	4195.45a
5.- 60% gravas	706.83c	96.70a	0.42b	5853.33b	2674.96b
C.V.	0.17	3.76	14.76	10.99	12.61
Significancia	**	**	*	**	*

- **Profundidad efectiva**

La formación de raíces y de biomasa en la parte de la planta sobre el suelo es mayor cuando aumenta la profundidad del suelo, con menos de 20 cm. se afecta el sistema radical y con menos de 30cm. la biomasa de la planta sobre el suelo y la cantidad de azúcar por tanque; contrariamente, el contenido de azúcar de la caña es mayor a menor profundidad efectiva (Cuadro 13.3).

Cuadro 13.3. Efecto de la profundidad efectiva, sobre algunos indicadores de calidad y biomasa formada en el cultivo de la caña de azúcar (Suelo de textura gruesa; variedad Ragnar) (Arzola y Vilma Contreras, 2010).

Tratamientos (Profundidad en cm.)	Peso de raíces/ tanque (g)	Kg de azúcar/ t de caña	Kg de azúcar/ tanque	Peso total tallos y hojas (g)	
				verde	Secas
1.- (0-10 cm.)	430.35 b	100.37a	0.26c	3360.00d	1599.18d
2.- (0- 20cm.)	676.73a	95.38ab	0.50b	6570.00c	2994.17c
3.- (0-30cm.)	530.03ab	92.34ab	0.59ab	8345.00b	3368.12bc
4.- (0- 40cm.)	545.78ab	89.65bc	0.63a	9345.00ab	3747.18abc
5.- (0-50cm.)	565.03ab	87.14bc	0.66a	10185.00a	4398.39a
6.- (0- 60cm.)	646.55a	80.40c	0.65a	10335.00a	3990.59ab
C.V.	14.46	5.03	9.63	7.47	9.99
Significancia	**	**	**	**	**

Las medidas para mejorar los suelos con esta limitación se deben dirigir a eliminar o atenuar la causa de la poca profundidad del suelo, por ejemplo, si es una capa compacta, romper esta con las labores. En caso de no ser posible incrementar la

profundidad efectiva, las medidas deben consistir en mejorar la fertilidad, de esa delgada capa de suelo, mediante el empleo de abonos orgánicos y minerales y el suministro de agua con el regadío, también es conveniente la utilización de distancias estrechas de plantación.

Un aspecto que debe estar presente principalmente en aquellos terrenos con pendiente, en los cuales la erosión causa pérdidas de la capa arable, es evitar o atenuar ese proceso, para conservar la poca profundidad del suelo.

- **Consideraciones generales**

La presencia de factores edáficos limitantes como: drenaje, profundidad efectiva o contenido de gravas a determinado nivel o rango limita la formación de biomasa por el cultivo y ocasiona, una menor producción de caña y de azúcar por unidad de superficie, sin embargo no afecta el contenido de azúcar por t de caña, por el contrario generalmente este aumenta lo que se debe tener presente en la programación de corte.

Cualquier de los factores mencionados, cuando son limitantes, pueden originar estrés hídrico y como respuesta al mismo aumenta la concentración de ácido abscísico (ABA), hormona que ocasiona el cierre de los estomas, disminución de la transpiración y del crecimiento de la planta (Lucía Quemada, 2005), al no crecer la planta, se afecta el rendimiento agrícola, pero se acumula sacarosa.

Si los factores edáficos son limitantes y no se pueden corregir, disminuye la eficiencia de los fertilizantes, se requiere por esa razón, mayores dosis de estos y se elevan los costos y la contaminación del entorno. Si este efecto es muy pronunciado, no resulta sostenible la producción de caña y debe buscarse otra opción de uso a la tierra.

13.3. Fundamentos para el eficiente empleo de los Fertilizantes Minerales en la Caña de Azúcar

Para lograr el objetivo planteado en este epígrafe, es necesario determinar con el mayor detalle posible, cual o cuales nutrientes limitan el rendimiento y que dosis, momento, lugar y forma de aplicación del fertilizante que lo(s) contiene debe utilizarse.

13.3.1. Nitrógeno

- **Generalidades.**

Los fertilizantes químicos nitrogenados se sintetizan a partir del nitrógeno atmosférico, proceso que requiere del hidrógeno y de altas temperaturas y presiones las que se alcanzan a partir del uso de combustibles derivados del petróleo. Un elevado costo y gasto energético, contribuyendo su elaboración a la destrucción de un recurso natural no renovable, el petróleo y al efecto invernadero.

Si bien estos fertilizantes suelen incrementar con más frecuencia que cualquier otro los rendimientos de la caña de azúcar, en exceso pueden afectar el contenido de sacarosa, hacer más susceptible el cultivo al ataque de plagas y enfermedades y propiciar el acamado. Por estas razones, es necesario aplicar el nitrógeno en la cantidad adecuada, pues tanto una insuficiencia como un exceso son perjudiciales.

Se debe reiterar que, como principio deberá buscarse que exista un máximo aprovechamiento del fertilizante nitrogenado por el cultivo y un mínimo de "residuo" en el suelo, debido a los elevados costos de estos fertilizantes y a los daños que para la salud y bienestar del hombre origina el nitrógeno perdido de los agrosistemas por diferentes vías (Arzola, 1990).

- **Criterios para Recomendar Fertilizantes Nitrogenados**

a) Rendimiento esperado

Este factor resulta de una gran importancia con la finalidad de establecer la dosis de nitrógeno a emplear (Arzola, 1973; Yera et al., 1995). A mayor rendimiento mayor extracción de nitrógeno realizará el cultivo y con más rapidez se agotarán las reservas del suelo; desde otro punto de vista, bajos rendimientos de la caña de azúcar frecuentemente se asocian con la presencia de factores limitantes ajenos a la nutrición nitrogenada (enyerbamiento, compactación, despoblación), lo que origina que la aplicación de elevadas dosis del nutriente no resuelva la causa de los bajos rendimientos.

b) Cepa (planta o retoños)

La frecuencia de encontrar aumentos de rendimiento con la fertilización nitrogenada en caña de planta es baja, las excepciones se presentan, en suelos arenosos pobres en materia orgánica y en suelos con pobre aireación (por exceso de humedad o compactación), en que las fuertes condiciones de reducción limitan el proceso de mineralización del nitrógeno de la materia orgánica y propician pérdidas gaseosas de este elemento por desnitrificación (Arzola, 1975b). El primer retoño, aunque más exigente que la cepa de planta, requiere, por lo general, de dosis reducidas, que rara vez superan los $75 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ y el índice de consumo de $0.8\text{-}1.0 \text{ kg de N} \cdot \text{t}^{-1}$ de tallos. Con el envejecimiento de la cepa (aumento del número de cortes) se incrementa frecuentemente la necesidad de aplicar nitrógeno. Del segundo retoño en adelante, la necesidad de fertilizantes nitrogenados, por lo general, se encuentran entre 1.5 y $2.0 \text{ kg de N} \cdot \text{t}^{-1}$ de tallos, valores superiores raramente son requeridos.

c) Contenido de materia orgánica del suelo

Como más de un 90% del nitrógeno total del suelo es orgánico, la materia orgánica representa la reserva de este nutriente en el suelo, la que disminuye con el transcurso de las cosechas (Arzola, 2005).

d) Características del suelo

En suelos en que se presentan fuertes condiciones reductoras (Gley), la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico del suelo es lenta, lo que origina menor disponibilidad de nitrógeno asimilable, además en esas condiciones las pérdidas por desnitrificación de los nitratos son mayores ya que al faltar el aire en el suelo los microorganismos emplean el oxígeno de los nitratos para su respiración, quedando el nitrógeno en forma gaseosa (desnitrificación) (Arzola, 1973b; Arzola, 1981; Arzola et al., 1994). El menor suministro de nitrógeno por el suelo y las mayores pérdidas de este nutriente en forma gaseosa explican la intensa respuesta que a la fertilización nitrogenada ha mostrado la caña de azúcar en estos suelos. La influencia de la hidromorfía sobre la respuesta de la caña de azúcar a la fertilización nitrogenada se estudió en un experimento de larga duración sobre un Vertisol, que durante un

período de 14 años recibió dosis desde 0 hasta 250 kg de N/ha, a intervalos de 50 y fondo de 50 y 150 kg/ha de P_2O_5 y K_2O . La fertilización nitrogenada reveló un efecto positivo sobre los rendimientos. El índice de consumo encontrado fue de 1,2 kg de N/t de caña producida; las dosis encontradas para las plantas fueron menores que para los retoños (Hidalgo y de León, 2000).

Rodríguez (2002) reporta que de los factores estudiados, el suelo, la cepa y el contenido de materia orgánica, resultan de utilidad para predecir la respuesta a la fertilización nitrogenada, pero solo los Kg. de N/ t de caña producida (índices de consumo) y los rendimientos esperados proporcionaron una vía para la estimación de las dosis de nitrógeno. Gracias al gran volumen de información experimental utilizada este autor logro establecer índices de consumo en diferentes condiciones.

En suelos arenosos, conjuntamente con las mayores pérdidas de nitrógeno (principalmente nitratos) por lavado, se presenta generalmente un bajo contenido de materia orgánica, lo que puede explicar la necesidad de aplicar nitrógeno en caña planta y de fraccionar la dosis en cada cosecha (Hernández, 1996).

Como más de un 95% del nitrógeno total del suelo es orgánico, los suelos con muy pobres reservas orgánicas suelen requerir de la fertilización nitrogenada con mayor frecuencia que los ricos. En un estudio realizado en un suelo Mollisol de Maracay y un Ultisol de Cojedes en Venezuela se encontró que los dos indicadores del suelo de mayor importancia para definir la absorción de nitrógeno y la formación de materia seca fueron el contenido de nitrógeno mineral del suelo y el de materia orgánica (Delgado, 1994).

Los resultados alcanzados en estudios realizados por Pérez(s/a) en suelos variables en su contenido de materia orgánica, lo llevaron a elaborar un sistema de recomendación de nitrógeno, cuyas dosis varían, de acuerdo al contenido de materia orgánica del suelo. Esto sin embargo, deberá integrarse mas en un futuro, pues no es posible aislar la respuesta del nitrógeno al contenido de materia orgánica del suelo, dado que el proceso de mineralización, es realizado por los microorganismos (primer sistema orgánico) cuya actividad es muy variable de acuerdo con las condiciones ambientales y lo mismo ocurre con la asimilación de nitrógeno por la planta (segundo sistema biológico).

e) Precipitaciones

Como las plantas toman el nitrógeno de la solución del suelo, se infiere que de existir deficiencias de este nutriente se necesitaría mayor cantidad de agua (hasta un óptimo) para que la cantidad de nitrógeno de la solución del suelo sea mayor y la planta pueda absorberlo. En otras palabras: con mayor humedad en el suelo, será mejor la utilización del nitrógeno por la planta y se requerirá de menos fertilizante nitrogenado para producir una tonelada de caña. Por otra parte, bajo esas condiciones adecuadas de humedad las plantas alcanzaran mayor rendimiento y su consumo de nitrógeno aumentara, por lo que se requerirá de menos nitrógeno para producir una tonelada de caña pero probablemente de una dosis mayor por hectárea.

Trabajos realizados por el INICA en Cuba, han mostrado que a bajos niveles de lluvia corresponde mayor dosis de nitrógeno a aplicar para producir una tonelada de caña, hasta un límite. "Cuando la lluvia excede los 1000 mm. se necesita una dosis menor. Un nivel de precipitación anual de 1200 mm. se considera óptimo y con precipitaciones de 1600 mm. en lo adelante el efecto de la aplicación de nitrógeno

sobre la producción prácticamente es nulo”, lo que podría explicarse por una mayor disponibilidad del nitrógeno en la medida que se incrementa la humedad del suelo”. Considerando las características de los suelos, si el drenaje es adecuado podría no ser necesaria la utilización de fertilizante nitrogenado con una elevada pluviometría como se resume en el párrafo anterior, pero en suelos donde prevalece el mal drenaje y fuertes condiciones de reducción, un exceso de humedad (abundantes lluvias) limitara la mineralización del nitrógeno contenido en la materia orgánica del suelo, incrementara las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación y al no existir oxígeno para la respiración aerobia de las raíces se afectara la absorción de nitrógeno por la planta; todo lo cual conllevara a un uso ineficiente de este nutriente y al empleo de excesivas dosis para tratar de resolver un problema cuya mejor solución sería un buen drenaje y no el empleo de elevadas dosis de nitrógeno, incluso de ser el mal drenaje un factor fuertemente limitante, solo corrigiendo esa limitación y no mediante el nitrógeno podrían aumentar los rendimientos.

f) Edad de cosecha

Cuando el nitrógeno limita los rendimientos de la caña de azúcar, el aumentar la edad de cosecha incrementa las t de caña/ha/mes, por lo que una mayor edad de cosecha es particularmente favorable cuando no se dispone de suficiente fertilizante nitrogenado, por otra parte, mayor necesidad de aplicar nitrógeno se requiere cuando la cosecha se realiza a temprana edad (Cuadro 13.4).

Cuadro 13.4: Variación de la necesidad de aplicar nitrógeno al aumentar la edad de cosecha de la caña de azúcar (Arzola, 2006)

Edad de cosecha (meses)	Suelo Pardo sin Carbonatos gleysoso		
	NPK	PK	Diferencia
12	10.41	4.51	5.90
18	10.00	9.01	0.99

g) Interacción nitrógeno-variedad.

Las variedades muestran entre sí diferencias morfológicas y fisiológicas que pueden obrar sobre la capacidad para asimilar los nutrientes. Así se tiene por ejemplo distinta amplitud del sistema radical o de la actividad fotosintética, o de la aptitud para acumular nutrientes.

- **Formas, fuentes y momentos de aplicación**

Para la fertilización nitrogenada de la caña de azúcar cualquiera de las fuentes es adecuada. En el caso de las fuentes sólidas, estas deben incorporarse al suelo, a unos 10 cm. de profundidad (centro de la cepa o ambos lados del surco). Para el caso del amoníaco debe existir buena preparación del suelo, enterrarse a 20-30 cm. y no estar el suelo ni muy seco ni extremadamente húmedo.

Los mejores resultados se obtienen cuando todo el nitrógeno se aplica lo más rápidamente posible después del corte (el fraccionamiento de la dosis solo ha sido

favorable en suelos arenosos). No es conveniente aplicarlo con más de 3-4 meses de edad de la caña.

13.3.2. Fósforo

- **Generalidades**

De los tres nutrientes mayores primarios (N-P-K), es el fósforo el que las plantas extraen en menor cantidad; sin embargo, es frecuente que se presente insuficiencia de este elemento en regiones agrícolas del mundo, debido a un pobre contenido de su forma asimilable en el suelo. El fósforo se pierde de los agrosistemas por la extracción que realizan las cosechas y por erosión, ya que las pérdidas por lavado generalmente se consideran despreciables debido a que este forma compuestos de muy baja solubilidad en los suelos.

Las reacciones en el suelo que originan la formación de compuestos de fósforo no asimilables, explican la necesidad de emplear fertilizantes fosfóricos, en regiones donde el contenido total de este elemento resultaría suficiente para abastecer varias cosechas sucesivas de cualquier cultivo. En otros casos, las insuficiencias de fósforo se presentan en suelos que por su origen (ej. Suelos muy evolucionados, originados a partir de rocas ácidas) no poseen reservas o que un manejo inadecuado del hombre los ha empobrecido.

Los grandes yacimientos de este elemento se localizan en algunos países, mientras otros que apenas poseen reservas deben importarlo a un elevado costo. Debe realizarse un óptimo empleo de este recurso natural no renovable cuyo valor se incrementa en la medida que se agotan sus reservas.

- **Criterios para Recomendar Fertilizantes fosfóricos**

a) Contenido de fósforo asimilable en el suelo.

La caña de azúcar es una planta que posee alta capacidad para absorber fósforo de soluciones diluidas, la necesidad de fertilizantes fosfóricos para este cultivo es baja, raramente supera los 0.4-0.6 kg de P_2O_5 por t de tallos.

Existe una estrecha relación entre el contenido de formas asimilables de fósforo en el suelo, determinadas en extracciones realizadas con diversas disoluciones, y la respuesta en rendimiento que es posible obtener con la fertilización fosfórica.

Pérez Zamora (2002) en Argentina evaluó en el momento de la cosecha el peso de caña de la parcela y el contenido de fósforo asimilable (30cm. superficiales) (por la técnica extractiva Bray y Kurtz 2). También formaron parte del análisis, los resultados de 27 estaciones de referencia, en las que se determinaron los contenidos de fósforo asimilable en los 30cm. superficiales, y contenidos foliares en la lámina de la hoja +1 (Kuijper) al 5^{to} mes desde la brotación. El procesamiento estadístico de la información consistió en análisis de varianza, aplicación de funciones de producción, análisis factoriales y métodos gráficos basados en principios dictados por Cate y Nelson (1965). Las evaluaciones fueron realizadas en el momento de cosecha, determinándose el peso de caña de la parcela, y el contenido de fósforo asimilable. Incrementos significativos de los rendimientos de caña de azúcar con la fertilización fosfórica se obtuvieron cuando los contenidos asimilables en el suelo, eran inferiores a 13 ppm de P (2.9 mg de P_2O_5 /100 g de suelo).

López (1986) realizó en suelos Pardos y Vertisuelos 34 experimentos sobre fertilización fosfórica, en los cuales se efectuaron 107 cosechas, estos abarcaron una amplia variación en cuanto: al contenido de fósforo asimilable del suelo, grado de carbonatación y otras características y tomaron muestras de suelo antes de la plantación de 0-25 cm. de profundidad. Encontró que de los métodos comparados el más confiable para predecir la necesidad de fertilizante fosfórico de la caña de azúcar era el de Bray y Kurtz 2 (1 min. agitación) con un nivel crítico de 2.2 mg de $P_2O_5/100g$ de suelo.

b) Reacción del suelo.

El pH del suelo influye de manera notable sobre la solubilidad de los diferentes compuestos de fósforo. En suelos muy ácidos aumenta considerablemente la fijación del fósforo por el hierro, en los ácidos es notable la fijación por el aluminio. En suelos dominados por arcillas 2:1, la solubilidad de varios compuestos de fósforo está determinada por el pH del suelo. Estas arcillas no tienen superficie reactiva y retienen poco fósforo. Al incrementarse la acidez del suelo tiene lugar la descomposición de las arcillas, cualquiera que sea su tipo, y la consecuente liberación de aluminio y hierro, que precipitan el fósforo como fosfatos insolubles, mientras que al incrementar el pH por encima de la neutralidad generalmente se forman fosfatos cálcicos poco solubles. El pH (en agua) óptimo del suelo en relación con la disponibilidad del fósforo, está entre 6 y 7. Así, en la medida en que la reacción del suelo avanza hacia la acidez o la alcalinidad generalmente es necesario aplicar mayor cantidad de fertilizantes fosfóricos (Arzola y Melián, 1975; Villegas, 1981; López, 1986).

c) Otras características de los suelos.

La fijación de fósforo, como parte de los procesos químicos que ocurren en el suelo, es uno de los aspectos más importantes a considerar para la recomendación de fertilizantes fosfóricos. Los suelos con mucha arcilla fijan más fósforo que los que contienen menos arcilla. Los suelos con alto contenido de arcillas 1:1 u óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, retienen o fijan más fósforo que otros suelos. La compactación reduce la aireación y el espacio poroso en la zona radical, así como el volumen de suelo explorado por las raíces, lo que consecuentemente reduce la absorción de fósforo por la planta. El hecho de que el fósforo se mueve muy poco en el suelo acrecienta los problemas ocasionados por un desarrollo restringido del sistema radical. El incremento de la humedad del suelo hasta niveles óptimos hace que el fósforo sea más disponible para las plantas, pero la deficiencia de oxígeno por exceso de humedad reduce notablemente la capacidad de las plantas para absorber el fósforo del suelo. La materia orgánica del suelo contiene fósforo y al mineralizarse lo deja disponible para el cultivo, además la capacidad de fijación de fósforo de los suelos disminuye cuando aumenta su contenido de materia orgánica, en correspondencia con ello la aplicación localizada en el surco de 50 t de cachaza /ha, al momento de la plantación, cubrirá la necesidad fertilizantes fosfóricos del cultivo durante no menos de 5 cosechas, por lo que no es necesario utilizar fertilizantes fosfóricos durante estos cortes (Fundora et al., 1975; Villegas, 1981; López, 1986; Arzola y Blanco, 1986).

- **Formas, fuentes y momentos de aplicación**

El fósforo es poco móvil, sus pérdidas se limitan, en lo esencial, a la exportación que de él se realiza con la cosecha y a la erosión. Su poca movilidad indica que el fertilizante fosfórico debe colocarse lo más cerca posible del sistema radical de la caña; en el fondo del surco, al momento de la plantación y enterrarse lo antes posible después del corte cerca del sistema radical en los retoños. Por otra parte, sus limitadas vías de pérdidas sugieren que es posible, conocer con bastante aproximación su balance de poseerse información sobre lo que extrae la cosecha y lo que se aplica con los abonos.

En suelos ácidos cultivados con caña de azúcar, además del superfosfato sencillo o del superfosfato triple que son las fuentes generalmente utilizadas para suministrar este elemento, puede utilizarse roca fosfórica o caliza fosfatada como una alternativa de fertilizante menos costosa. La solubilización de la roca fosfórica (RF), aumenta con la acidez del suelo, altos niveles de Al intercambiable y alta capacidad de fijación de P del suelo.

La utilización de la roca fosfórica también puede ser favorecida por la aplicación de inóculos de hongos micorrízico arbusculares (HMA). Los foráneos son más eficientes en promover el uso del P por la planta, que los endófitos nativos (Mendoza y Ramírez, 2001).

Uno de los problemas de los suelos ácidos en Venezuela, es la deficiencia de fósforo (P), pero la baja solubilidad de la RF, no garantiza siempre resultados satisfactorios, especialmente cuando se usa en cultivos de ciclo corto. Una alternativa para enfrentar este problema ha sido la acidulación parcial de la RF, con lo cual aumenta su valor agronómico, a un costo más bajo que el requerido para fabricar el fertilizante convencional, mostrando este tratamiento resultados satisfactorios, incluso comparables a los obtenidos con este (Sequera, Ramirez y Castillo, 2001).

En un suelo Oxic Tropustutults de pH 5.2 del estado de Cojedes en Venezuela no se encontro diferencia como fuente de fósforo asimilable para la planta, entre el fertilizante convencional 12-24-12 y esa misma formula elaborada con un 15 a un 20% del fósforo proveniente de la roca fosfatada de Riecito (Ramírez y Villegas, 1994).

13.3.3. Potasio

- **Generalidades**

De los tres nutrientes mayores primarios es el potasio el que las plantas extraen en mayor cantidad, habiéndose reportado en ocasiones en cultivos como la caña de azúcar, cifras que superan los 1000 Kg. de K_2O /ha./cosecha, aunque afortunadamente, las reservas de los suelos en potasio total generalmente también son elevadas, variando de 1 a 3% (Garavito, 1979). No obstante, la forma en que este elemento se encuentra en el suelo y el equilibrio entre las mismas, juega un importante papel en la nutrición potásica de los cultivos.

Principalmente, los suelos fuertemente meteorizados de los trópicos húmedos, son pobres en potasio total y asimilable, pudiendo obtenerse en esos casos un notable aumento de los rendimientos con una adecuada fertilización potásica (Fundora et al., 1988).

- **Criterios para Recomendar Fertilizantes potásicos**

a) Contenido de K intercambiable en el suelo.

El potasio intercambiable es el retenido por las cargas negativas de las arcillas, la materia orgánica y los hidróxidos, del suelo. A medida que baja el contenido de potasio intercambiable en el suelo, decrece la absorción de este nutriente por las raíces de las plantas y es mayor la respuesta en rendimiento que es posible obtener con la fertilización potásica. Para su determinación analítica se utiliza generalmente la extracción con acetato de amonio (H_4NOAc) 1 N a pH 7. Como guía general los suelos con valores por debajo de $0.35 \text{ cmol}^{(+)}.\text{Kg}^{-1}$ de K son considerados insuficientes en potasio, mientras que los que superan esa cifra están bien abastecidos (Arzola et al., 1990).

b) Rendimiento esperado

En la medida que incrementa el rendimiento agrícola de la caña de azúcar, mayor es la exportación de potasio del suelo que realiza el cultivo, con lo cual se empobrecen las reservas de este elemento, lo que da lugar a la necesidad de suplirlo a través de fertilizantes potásicos (Arzola, 1973a; Yera et al., 1995). Por otra parte, los rendimientos mayores están asociados, generalmente, con un buen manejo agronómico y ausencia de manifestaciones limitativas intensas de otros factores, en tanto que, los rendimientos bajos, por el contrario, se asocian con frecuencia a mal manejo agronómico, presencia de factores limitantes ajenos a la nutrición potásica (malas hierbas, despoblación, compactación) y a otros factores que hacen que los esfuerzos por incrementar los rendimientos mediante la fertilización potásica sean inútiles.

Atendiendo a lo antes explicado, los kilogramos de potasio a aplicar por tonelada de caña producida muestran valores bastante estables y menores cuando no están presentes un conjunto de factores limitativos asociados con un mal manejo agronómico. Por lo general, con el empleo de 1.8 kilogramos de potasio a aplicar por tonelada de caña a producir se obtienen óptimos resultados productivos y económicos.

c) Cepa

Por lo general la planta y la primera soca responden poco a las aplicaciones de fertilizantes potásicos, siendo mucho mayor el efecto sobre el rendimiento de la tercera soca en adelante (Arzola, 1973b; Arzola, 1981; Arzola et al., 1994)). En ello interviene la mejor aireación del suelo de las plantas y primera soca, el aporte de residuos de cosecha que se incorpora al suelo en su labranza, así como la exploración de mayor volumen de suelo por las raíces en las primeras cepas debido a estar el suelo recién preparado, en tanto que con el transcurso del tiempo este se compacta.

d) Precipitaciones pluviales

El agua es necesaria para que se mueva por difusión el potasio en el suelo hacia las raíces de las plantas, pero un exceso de humedad afecta la aireación del suelo y por tanto, la respiración radical, disminuye por esa causa la energía que se requiere para la absorción activa de este elemento. Tanto el estrés por falta de agua como el exceso de humedad en suelos mal drenados son factores que reducen la absorción de potasio por la planta.

e) Características de los suelos

La deficiente aireación del suelo afecta más la absorción de potasio que la de cualquier otro nutriente, así las condiciones de compactación o hidromorfía manifiestas limitan los efectos de la fertilización potásica sobre el rendimiento de la caña de azúcar. Esto también ocurre debido al reducido desarrollo del sistema radical cuando están presentes los referidos factores edáficos limitativos. El contenido de arcillas de tipo 2:1, con alta capacidad para atrapar potasio y retenerlo en forma no disponible, reduce la cantidad del mismo que puede ser absorbido por la planta y consecuentemente es necesario aplicar mayores dosis de fertilizantes potásicos (Fundora et al., 1988).

f) Aprovechamiento de residuos en la agricultura

Los residuos de cosecha al quemarse dejan el potasio en el suelo, en tanto que, casi todo el potasio de los tallos cosechados que va al ingenio se presenta en la miel, que es la materia prima para producir alcohol, concentrándose finalmente este elemento en la vinaza, utilizada para fertirrigar los campos.

Por cada litro de etanol se obtienen 13 litros de vinaza, por ello en una destilería como Produccargo en Ecuador, con una capacidad de 1.5 millones de litros de producción de alcohol mensual, 18 millones de litros de producción de alcohol al año (18000 m^3), se podrían haber producido 234000 m^3 de vinaza, que con una concentración de 3294 ppm de K (Reporte CINCAE 15/12/2003), representa 770796 kg de potasio al año, en veinte años de trabajo serían 15.4 millones de kg de potasio (18.6 millones de kg de K_2O), que expresado como KCl significan 31 millones de kg, lo que en sacos de 50 kg. equivale a 620000 sacos.

Autores de diferentes países coinciden en que el nivel crítico para la caña de azúcar, de potasio cambiante en el suelo, se encuentra entre $0.3\text{-}0.4 \text{ cmol}^{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo (Pérez et al., 2000 en Argentina; Fundora et al., 1988 en Cuba; Ayres, 1949 en Hawai; Bonet, 1953 en Puerto Rico; Sobulo, 1974 en Nigeria y Meinniczuk, 1979 en Brasil). Dosis que superen lo exportado por el cultivo deben emplearse cuando el contenido de potasio es insuficiente, en tanto que menores a lo exportado se emplearan en suelos bien abastecidos.

Un ejemplo donde se conjugan los contenidos de potasio cambiante del suelo con lo exportado por la caña de azúcar, se expone en el Cuadro 13.5, con diferentes unidades mínimas de manejo agrícola del ingenio Ecudos S.A. de Ecuador.

Cuadro 13.5. Dosis de potasio empleadas al variar el contenido de potasio del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar en áreas de abasto cañero del ingenio ECUDOS (Arzola y Vilma Contreras, 2010).

Contenido de Potas del suelo $\text{cmol}^{(+)} \text{Kg}^{-1}$	Ubicación	Rendimiento (t de caña/ha)	Kg de K_2O /ha	Kg de K_2O /t de tallo cosechado
Bajo (<0,2)	Cecilia 08A	100	190	1,9*
Medio (0,2-0,4)	Cecilia 02A	75	135	1,8*
Alto (0,4-0,7)	Ana Luisa 12A	100	90	0,9
Muy alto (>0,7)	Valle Verde 03C	85	40	5

*Spaans y Núñez (2006) reportan para la variedad Ragnar una extracción de potasio de 1.64 Kg. de K_2O /t de tallo cosechado

- **Formas, fuentes y momentos de aplicación.**

El potasio aunque se mueve más que el fósforo en el suelo, debe ser aplicado al momento de la plantación, o lo antes posible después del corte en los retoños. Como fuente puede emplearse el sulfato de potasio y el cloruro de potasio, pero se prefiere esta última por su menor costo.

13.4. Absorción de nutrimentos en plantaciones enmalezadas y con mal drenaje

Se seleccionaron áreas bajo condiciones de producción para evaluar la influencia del tiempo de permanencia de la plantación con malas hierbas y el drenaje sobre el contenido de nutrientes foliares del cultivo.

13.4.1. Malezas

En la Cuadro 13.6, se puede apreciar que el contenido de macro y micronutrientes disminuye, en mayor medida, mientras mayor es el tiempo que permanece con malezas la plantación de caña de azúcar, por lo que, la limpieza oportuna de las malezas contribuye a una mejor nutrición del cultivo.

Cuadro 13.6: Estudio sobre la influencia del periodo de enyerbamiento sobre el contenido de nutrientes foliares (Ruidoso 12; Ragnar, caña planta, aplicación superficial de nitrógeno)(Arzola y Vilma Contreras, 2010).

Nutriente	60 días			90 días			120 días		
	Limpio	Con malezas	Diferencia	Limpio	Con malezas	Diferencia	Limpio	Con malezas	Diferencia
N	1.79	1.83	-0.04	1.82	1.78	0.04	1.82	1.73	0.09
P	0.14	0.13	0.01	0.14	0.13	0.01	0.15	0.12	0.03
K	1.37	1.36	0.01	1.41	1.23	0.18	1.39	1.28	0.11
Zn	20.44	25.06	-4.62	21.09	20.53	0.56	23.78	20.06	3.72
Cu	6.86	6.67	0.19	6.65	6.62	0.03	7.58	6.11	1.47
Fe	103.00	89.53	13.47	87.11	85.11	2.00	122.90	90.31	32.59
Mn	211.10	182.30	28.80	190.20	191.50	-1.30	192.20	185.90	6.30

Como las malezas generalmente son muy competitivas y absorben los nutrientes con gran rapidez, debe preferirse eliminarlas; en lugar de emplear mayores dosis de fertilizantes en campos enmalezados, pues en tales casos las malezas podrían ser más vigorosas y competitivas con la caña de azúcar.

13.4.2. Mal drenaje

En la Cuadro 13.7 puede apreciarse que bajo condiciones de mal drenaje, disminuye el contenido foliar de macro y microelementos (excepto manganeso) lo que puede atribuirse a causas específicas para los diferentes nutrientes, pero de forma general, se podría explicar este resultado atendiendo a que al faltar oxígeno para la respiración de la raíz, no existe energía para transportar los nutrientes por la membrana citoplasmática, desde la solución del suelo hacia el interior de las células de la raíz.

El mal drenaje afecta sobre todo la nutrición nitrogenada, lo que se puede explicar, además del efecto general mencionado en el párrafo anterior, a ocasionar una menor mineralización de la materia orgánica del suelo y mayores pérdidas de nitrógeno por el proceso de desnitrificación.

La solución racional para mejorar los rendimientos y la eficiencia de los fertilizantes, en estos casos, es emplear sistemas adecuados de drenaje, siembra en bancos, variedades resistentes al mal drenaje y aplicar abonos orgánicos para mejorar la estructura, aireación y drenaje.

Cuadro13.7. Efecto del mal drenaje sobre la composición foliar de plantaciones de caña de azúcar (soca) en áreas de abasto cañero del ingenio Ecudos, S.A. de Ecuador) (Arzola y Contreras, 2010).

Sector	Cantero	Tratamiento	%			ppm			
			N	P	K	Zn	Cu	Fe	Mn
Banatel	8B (B 7678)	Buen drenaje	1.89	0.28	1.66	30.32	7.71	117.40	38.54
	9B (Ragnar)		2.01	0.31	1.77	22.52	7.30	141.70	42.29
Buen Drenaje(BD)			1.95	0.30	1.71	26.42	7.50	129.55	40.41
Banatel	8 E (B 7678)	Mal drenaje	1.79	0.27	1.58	20.81	6.82	98.47	45.76
	9D (Ragnar)		1.55	0.22	1.48	21.51	5.41	73.70	65.16
Mal drenaje(MD)			1.67	0.25	1.53	21.16	6.11	86.09	55.46
Diferencia(BD-MD)			0.28	0.05	0.18	5.26	1.39	43.46	15.05

13.5. Criterios internacionales para recomendar fertilizantes con NPK

Como se ha mencionado anteriormente existen un grupo de factores a considerar para elaborar una recomendación de fertilizante, algunas de las mas importantes se recogen por Arzola (1998).A modo de ilustración, se relacionan sistemas utilizados en diferentes países (Cuadro 13.8).

Cuadro 13.8. Factores considerados en las recomendaciones de fertilizantes en diferentes países (Pineda, 2003)

País	Factor	Fuente	País	Factor	Fuente	
Argentina	Materia orgánica	Villegas y Arcía (1995). Pérez et al. (1997)	Suecia	Contenido de arcilla	INICA (1996c)	
	Nivel freático			Textura		
	Drenaje			Materia orgánica		
Sur África	Mineralización de N	Meyer (1991)		Fósforo del suelo		Potasio del suelo
	Fósforo del suelo					
	Potasio del suelo		Colombia	Materia orgánica	Quintero (1993)	
	Fijación de fósforo			Nivel freático		
	Profundidad del suelo			Fósforo del suelo		
	Textura			Potasio del suelo		
	Australia	Materia orgánica				
Textura		Chapman (1994)	Hungría	Textura	INICA (1996c)	
Brasil	Fósforo del suelo	Filho (1996)		pH		
	Potasio del suelo			Carbonatos		
	Textura			Profundidad efectiva		
	Drenaje			Salinidad		

Los factores incluidos en los sistemas de recomendación de fertilizantes antes mencionados no incluyen componentes del clima, los cuales podrían estar integrados. En la actualidad con el aumento en la atmósfera de gases con efecto invernadero, se pronóstica un aumento de la temperatura menos pronunciado en el trópico que en la zona fría, pero capaz de originar mayores lluvias, mayor crecimiento vegetativo y mayores pérdidas de nutrientes del suelo, en tanto que, en las zonas depresionales podría pronosticarse la saturación o el anegamiento del suelo. Esto sugiere que existirá mayor necesidad de fertilizantes en el futuro y que se requiere del uso racional de los mismos para garantizar la prolongación de la existencia de este recurso y la alimentación de una población cada día mayor.

13.6. Implementación de las recomendaciones de fertilizantes

Al área que representa una muestra de suelo a partir de la cual se realizara la recomendación y aplicación de fertilizante, se le denomina unidad de muestreo. En la medida en que es menor la variabilidad espacial de la característica objeto de estudio y que disminuya el tamaño de la unidad de muestreo, se lograra mayor representatividad de la muestra y mayor exactitud en la recomendación de fertilizante. La composición y características de los suelos, el clima, factores bióticos y el manejo agrícola, hacen que los requerimientos de fertilizantes minerales sea muy variable y

que para lograr precisar cada vez mas lo requerido, el área que representa una muestra de suelo (a partir de la cual se definirá la dosis y formula de fertilizante mineral) debe ser lo más homogénea posible. En la medida que la recomendación de fertilizante se elabore con información proveniente de un área homogénea, disminuirá el error proveniente de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y será precisa la recomendación de fertilizantes minerales. Siguiendo ese principio y disponiendo de la tecnología moderna la agricultura en los EE.UU., ha introducido, principalmente en cultivos de cereales, un procedimiento que permite aplicar prácticamente lo que se requiere en cada metro lineal de suelo, surgiendo con ello el término "agricultura de precisión" o "por sitio específico".

Esta tendencia actual es contraria a la de agrupar áreas con una formula de fertilizante, por ello siempre que existan condiciones y recursos para la inversión inicial que esto requiere, la agricultura por sitio específico, posibilitara mayores ganancias, rendimientos y protección ambiental.

13.7. Biofertilizantes

Los biofertilizantes se preparan en biofermentadores con bacterias fijadoras de nitrógeno o con microorganismos solubilizadores del fósforo del suelo, estos sintetizan también aminoácidos, vitaminas, citoquininas, auxinas, giberelinas y otras sustancias que actúan como estimuladoras del crecimiento vegetal.

La fijación biológica del nitrógeno (FBN) es realizada por gran variedad de microorganismos de vida libre como: bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Clostridium*; asociativos como: *Azospirillum*, *Acetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum*; Cianobacterias como: *Anabaena* y simbióticos como *Rhizobium* y *Brady rhizobium*.

En Colombia aislamientos de bacterias asociadas a la caña de azúcar, como: (*Acetobacter diazotrophicus*), (*Herbaspirillum seropedicae*), (*Acetobacter diazotrophicus*), (*Azotobacter sp.*₁) y (*Azotobacter sp.*₃) presentan una actividad nitrogenasa entre 40 y 200 nanomoles de etileno/hora/cultivo y representan organismos promisorios para el mejoramiento de los cultivos de caña de azúcar dado su alto potencial nitrofixador (Valero, Lozano y Valencia, 2001). En Cuba los mejores resultados en caña de azúcar se han alcanzado con un biofertilizantes elaborado a partir de *Azospirillum*.

Grupos bacterianos presentes en la Rizosfera son capaces de solubilizar las formas insolubles de los compuestos fosfatados, mediante la producción de ácidos orgánicos, esto ha sido el fundamento para preparar biopreparados de bacterias fosfato-solubilizadoras que mejoran la disponibilidad del fósforo del suelo, disminuyendo el uso de fertilizantes fosfatados, los costos de producción del cultivo y favoreciendo el medio ambiente (Martínez y Martínez, 2001).

13.8. Encalado

13.8.1. Generalidades

El encalado es una enmienda mineral y se puede definir como la aplicación a los suelos ácidos de materiales que posean dos requisitos: disminuir la acidez y aportar calcio o magnesio.

El empleo de enmiendas calcáreas para neutralizar la acidez que presentan algunos tipos de suelos ha sido una práctica empleada en la agricultura desde hace varios siglos, dirigida fundamentalmente a crear condiciones edáficas más favorables al desarrollo de las plantas cultivadas, elevar los rendimientos y calidad de las cosechas. En el Trópico, las respuestas al encalado han sido contradictorias, unas veces positivas y en otras perjudicial, probablemente debido a que las condiciones climáticas han originado una mayor acidificación de los suelos y los cultivos se han adaptado o han sobrevivido por selección natural los más resistentes a tales condiciones.

Con frecuencia en la mayoría de los suelos altamente meteorizados de los Trópicos el encalado hasta pH 7 origina más daños que bien, resultando tal práctica en un sobreencalado (Sánchez, 1981).

13.8.2. Efectos del encalado

En el Trópico se han obtenido efectos positivos del encalado sobre los rendimientos de los cultivos, así como también efectos negativos o nulos (Kamprath, 1967; Martíni, 1968), lo cual es consecuencia de las múltiples modificaciones que se originan en los suelos con dicha práctica, pudiendo ser estas favorables o perjudiciales, según las características de los suelos ácidos donde esta enmienda se ha aplicado (Fundora et al., 1989; Fundora et al., 1991; Arzola y Fundora, 1983y1989). Dentro de las modificaciones favorables o perjudiciales en las características de los suelos, pueden mencionarse varias (Cuadro 13.9).

Cuadro 13.9. Resumen de los efectos del encalado en el Trópico.

Modificaciones favorables	Modificaciones perjudiciales
En suelos deficientes en calcio y/o magnesio se eliminan estas insuficiencias.	En suelos pobres en potasio cambiante se puede agudizar la deficiencia por antagonismo de ese nutriente con el calcio y el magnesio.
El calcio disminuye el grosor de la doble capa eléctrica de los coloides del suelo aumentan por ello las fuerzas de atracción entre estos y se favorece la formación de agregados y la estructura del suelo.	Con el aporte del calcio, aumenta la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo, empeora la estructura, en el caso en que la materia orgánica sea de gran importancia en ese aspecto.
En los suelos con tipos de arcilla que poseen cargas variables, el aumento de pH originado por el encalado favorece la capacidad de intercambio catiónico (CIC).	En suelos en que la materia orgánica desempeña un papel muy importante en la CIC la destrucción de la misma, por el encalado puede perjudicar la CIC.
Se aportan nutrientes (N, P, S) en forma disponible para las plantas debido a la descomposición de la materia orgánica del suelo, se favorece durante un tiempo después del encalado la nutrición del cultivo.	La mayor destrucción de la materia orgánica origina que a largo plazo se agoten o disminuyan las reservas de nutrientes del suelo. Un viejo proverbio dice "la cal hace rico al padre y empobrece al hijo".
Por aumento del pH producto del encalado disminuye la retención aniónica (en los coloides con cargas variables) y aumenta la solubilidad del fósforo de los fosfatos de hierro y aluminio: $\text{PO}_4\text{Fe} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{PO}_4^{4-} + \text{Fe}(\text{OH})_3$ $\text{PO}_4\text{Al} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{PO}_4^{4-} + \text{Al}(\text{OH})_3$ Todo ello favorece el contenido de fósforo asimilable del suelo.	Disminuye la asimilabilidad del fósforo de formarse fosfatos cálcicos insolubles.
De existir toxicidad por aluminio, manganeso o hierro esta puede eliminarse mediante el encalado.	Pueden crearse insuficiencias de microelementos como hierro, manganeso, boro, zinc y cobre.
La fijación de nitrógeno por el <i>Azotobacter</i> se favorece con el encalado.	En el Trópico se ha reportado la presencia de <i>Beijerinckia</i> , (bacteria fijadora de nitrógeno) cuyo pH óptimo es de 4,5; requiere poco calcio y fósforo, pero mucho hierro, por lo que para este microorganismo el encalado sería perjudicial.

La necesidad de calcio como elemento esencial, es de tal importancia, que algunos autores consideran que la finalidad del encalado debe ser sólo la de suplir la insuficiencia de este nutriente (Ayres, 1961).

El nivel crítico de calcio cambiante del suelo ha variado entre los países que cultivan caña de azúcar. En Guyana se encontró respuesta cuando el contenido de calcio era menor de $3 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ de suelo; en tanto que Feillafe, 1995 (citado por García, 1996), obtuvo respuesta en suelos de Mauricio con un contenido de calcio de $5.3 \text{ cmol}^{(+)}.\text{kg}^{-1}$ de suelo.

En el resumen sobre los resultados alcanzados con el encalado de la caña de azúcar en Cuba, Medina (1988) señala lo siguiente:

- Sólo se obtuvieron respuestas sistemáticas al encalado en los rendimientos de la caña de azúcar en las condiciones de los suelos cuarcíticos (textura ligera y pobres en calcio cambiante). En los demás suelos no hubo respuesta o se alcanzaron resultados no definidos.
- Se manifestó una tendencia a la disminución de los rendimientos y de la calidad de los jugos, así como de los contenidos de pol en caña con el aumento de la dosis de encalado.
- Los rendimientos, tanto agrícolas como azucareros, mostraron estar poco influidos por los niveles de pH y de acidez hidrolítica de los suelos, pero si presentaron un elevado grado de asociación (positiva) con los contenidos de Ca cambiante de los mismos.

En Hawái, Guyana, Jamaica y otros países cañeros entre 1920 y 1940, se llegó a la conclusión de que la aplicación de cal a los suelos cultivados de caña, no debía basarse solamente en la relación acidez del suelo – dosis de cal, sino que era imprescindible valorar otras características de los suelos y fundamentalmente la respuesta de la planta.

13.9. Alternativa para un mejor aprovechamiento de los suelos, fertilizantes y enmiendas

Se debe resaltar que existen potencialidades genéticas que pueden ser aprovechadas con importantes beneficios en la actualidad, existen variedades denominadas energéticas, capaces de producir de 50-90 t de masa seca /ha/año, lo que supera a las 30-82 t de masa seca /ha/año que se obtienen con las tradicionales. Esas variedades energéticas alcanzan elevados rendimientos en suelos que no poseen la mejor aptitud para las tradicionales, ni para otros cultivos, sin requerimientos especiales en la aplicación de fertilizantes, enmiendas y en el control de plagas y enfermedades (Campo Zabala, 1998). Los tallos de las variedades energéticas poseen un valor de combustión de 4500 a 4800 kcal/kg en comparación con 4600 que posee el bagazo tradicional de las variedades explotadas para la producción de azúcar de caña.

La mayor producción de biomasa por unidad de superficie y tiempo y el menor gasto energético en el empleo de fertilizantes, enmiendas, pesticidas e insumos en general, hace a estas variedades energéticas atractivas en un mundo donde el petróleo y los suelos fértiles son cada vez más escasos, en tanto que, resultan más necesarios por el explosivo crecimiento de la población mundial.

Estas variedades no son adecuadas para producir azúcar, pero poseen grandes perspectivas desde el punto de vista de la producción de energía, de ahí su importancia, en un mundo cada día más necesitado de energía y con menos reservas naturales para su obtención.

Bibliografía Consultada

Arzola, N.: Resultados preliminares sobre la dinámica del NPK en el suelo y en la Caña de Azúcar, Serie Caña de Azúcar 1973(a).

Arzola, N.: Resultados sobre fertilización de la Caña de Azúcar en la Costa Norte de las Villas, II Encuentro Nacional de Técnicas Agronómicas. La Habana, 1973(b).

Arzola, N.: Fertilización en el cultivo de la Caña de Azúcar en suelos de Las Villas, Informe Parcial de Tema de Investigación, 1981.

Arzola, N.: Aprovechamiento de residuos de origen orgánico en la Agricultura. Cursos de postgrado impartidos en el ISACA. Ciego de Ávila. Cuba, 1989, 120pp.

Arzola, N.: Efectividad de los fertilizantes nitrogenados en los suelos más abundantes en que se cultiva la caña de azúcar en la Provincia Cienfuegos, Información Científico-Técnica, No. 1(1990) 9-10 pp.

Arzola, N.: Utilization of conventional and non-conventional nutrient sources in the sugar cane crop, Symposium ID-27. Integrated soil management in sugarcane agroecosystems and its impact in a sustainable agricultura. 15th World Congress Soil Science, Acapulco, México, 1994, 406-414pp.

Arzola, N.: Diagnóstico de la necesidad de fertilizantes minerales en caña de azúcar. Centro Agrícola. N° 3, V-.25 (1998) 13-17pp.

Arzola, N.: Influencia del cultivo continuado de la caña de azúcar sobre el contenido total de carbono orgánico del suelo. Revista ATAC, N°2, 2005: 49-54pp.

Arzola, N.; Melián, G.: Relaciones entre algunas características de varios suelos de la provincia de las Villas, Revista Centro agrícola, 1975: 17-28pp.

Arzola, N.; Fundora, O.: Evaluación del efecto del encalado en los suelos cañeros de la Provincia de Cienfuegos, Boletín INICA No. 3 (86) (1983) 38 – 49 pp.

Arzola, N.; Blanco, C.: Efecto de dos métodos de aplicación de la cachaza sobre algunas características del suelo, Boletín INICA, No. 3(1986) 38-49 pp

Arzola, N.; Fundora, O.: Evaluación del efecto del encalado sobre algunas características de los suelos cañeros, Revista Centro Agrícola, 16(3) (1989) 46-54 pp.

Arzola, N.; Marín, R.; Justiz, A.: Diagnostico de la necesidad de nitrógeno y potasio en la caña de azúcar mediante el análisis químico de los suelos, Revista Centro Azúcar, 3/90(1990) 3-11 pp.

Arzola, N.: Nuevo enfoque para el diagnóstico de la necesidad de fertilizantes nitrogenados en caña de azúcar. VI Congreso de Técnicos Azucareros Latinoamericanos y del Caribe. Guayaquil, 2006.

Arzola, N.; Contreras Vilma: Evaluación del estado nutricional de las plantaciones cañeras en el Ingenio Ecudos S.A. La Troncal. Informe Técnico, 2010

Ayres, A.S.: Release of non-exchangeable potassium in Hawaiian sugar cane soils. Hawaii Agric. Exp.Sta., 1949.

Ayres, A.S.: Absorption of mineral nutrients by sugar cane at successive stages of growth. Hawaiian Planters Records. 41(1961), 335-351.

Bonnet, E.: Potassium content of Puerto Rico soils as related to sugar cane growing. The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico. 37(3) 1953:83-195pp.

Campo Zabala, R.: Variedades energéticas de caña de azúcar, en Revista Cuba – Azúcar, No. 1, Enero–Abril, INICA, (1998)1- 11pp.

CINCAE: Reporte de análisis 15/12/2003.Ecuador

Delgado, R.: Soil mineral N and organic matter mineralization effect on maize response to N-fertilizer application on a Mollisol and Ultisol soil in Venezuela. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Vol. 5b (1994):351- 352 pp.

Fox, R.H.; Piekielek, W.P.; Macneal, K.E.; Shenk, J.S.; Toth J.D.; Quick Tests for Assessing Nitrogen Fertilizer Needs of Maize in Humid Regions. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Volume 5 b (1994): 113-114 pp.

Fundación azucarera para la investigación y la productividad: Actividades realizadas. FUNDAZUCAR.. Boletín N° 1. 1993:17 pp.

Fundora, O.; Valdés, M.; Rubio, R.; Cuellar I.; Brunet, R.: El potasio en el suelo y la fertilización potásica. Monografía. Impreso en CENIC. U.C.L.V., 1988:124pp.

Fundora, O.; Arzola N.; Lamadrid, R.: Movimiento del fósforo en suelos cubanos, Revista Centro agrícola, Año 2, No. 2, 1975.

Fundora, O.; Machado, J.; Arzola, N.; Rojas, F.: Efecto de calizas de diferentes grados de finura sobre algunas características del suelo. Revista Centro Azúcar, 4/89(1989) 87-94 pp.

Fundora, O.; Machado J.; Arzola, N.; Truffin, J.: Efecto del encalado sobre los rendimientos agrícolas en la caña las características de un suelo Ferralítico cuarcítico amarillo rojizo lixiviado, Revista Centro Azúcar, 2/90(1991) 63-74 pp.

Garavito, F.: Propiedades Químicas de los Suelos. Editorial Andes. Bogotá, Colombia, 1979:321pp.

García, E.: El calcio en la caña de azúcar. Curso de especialidad en explotación de agroecosistemas de caña de azúcar. Universidad Veracruzana. México, 1996:78-94 pp.

Gomes de Moraes, M.; Donizate, J.; Mota de Oliveira, L.; Vitorino, P. y Murad, M. : Caracterizacao do crescimento e a atividade das desidrogenases alcoólicas e láctica em seis espécies herbáceas sob condições de hipoxia. Ciencia y agrotecnología, 25 (1) (2001): 86-95 pp.

Hernández, J.: Evaluación, manejo y corrección de la fertilidad de los suelos Ferralíticos cuarcíticos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Tesis en opción al grado científico de doctor. en ciencias agrícolas. INICA, Cuba, 1996.

Hidalgo, M.; de León Mario: La hidromorfía del suelo como criterio de diagnóstico de las necesidades de fertilizantes nitrogenados para la caña de azúcar, Centro Azúcar 3(2000)11-16pp.

INICA: Estudio de suelos para el manejo integral de la caña de azúcar en el ingenio "La Margarita", Oaxaca, México, 2003.

Kamprath, E. V.: Soil acidity and response to liming. North Caroline State University .Tech. Bull. 4, 1967.

López, M.: Diagnostico de la fertilidad fosfórica de los suelos Pardos y Vertisuelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Tesis presentada en opción al grado de doctor en ciencias agrícolas. La Habana, 1986.

Lucía Quemada: Naturaleza química, metabolismo, niveles endógenos. Efectos fisiológicos, mecanismo y modo de acción. Receptores. 2005. [Http://es.wikipedia.org/wiki/% Ácido_absc](http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_absc).

Maltby, E.: Wetlands their status and role in the biosphere. In: Jackson, M.; Davies, D.; Lambers, H.; Plant life under oxygen deprivation. Ecology, physiology and biochemistry. SPB Academic, 1991. 3-21 pp.

Martini, J.A.: Algunas notas sobre problemas del encalado en los suelos de los trópicos. Turrialba 18 (3) (1968): 249-256 pp.

Martínez, A.; Martínez, M.: Efecto de bacterias solubilizadoras de fosfatos durante el periodo de enraizamiento de la caña de azúcar (*saccharum officinarum*) var. Venezuela 5171. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, 2001.

Medina, N.: Nutrición de la caña de azúcar y enmiendas calcáreas en suelos cañeros. Informe científico técnico. INCA, 1988:25pp.

Mendoza, B.; Ramírez, R.: Influencia de los hongos micorrízico arbusculares sobre la producción de materia seca y absorción de fósforo por plantas de maíz fertilizadas con rocas fosfóricas. Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba, 2001.

Meiniczuk, J.: Formas de potasio en suelos de Brasil. Revista de la potasa. Secc. 4, 1979.

Pérez, F.; Scandaliaris, J.: Efecto de la fertilización fosfórica sobre los niveles productivos de caña de azúcar en Tucumán. XVII Congreso de Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, 2000.

Pérez, O.; Melgar, P.: Respuesta de la caña de azúcar a la fertilización con potasio en suelos Andisoles, Entisoles y Mollisoles de la región cañera de Guatemala. <http://www.inpofos.org/ppiweb/mexcnca.nsf>, 2000.

Pineda, E.: Factores asociados de la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes minerales. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA. La Habana, 2002.

Pineda, E.: Métodos y cálculo para conocer la necesidad de fertilizantes en caña de azúcar. Conferencia sobre fertilidad del suelo. Universidad Veracruzana, México, 2003.

Ramirez, R.; Villegas, G.: Efficiency of NPK Fertilizer with Partial Substitution of Available P for Riecito Phosphate Rock. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Vol. 5b (1994): 407-408 pp.

Rodríguez, E.: Bases de conocimientos para generar modelos predictivos de respuesta a los fertilizantes nitrogenados en agro sistemas cañeros. Tesis de MSc. La Habana, 2002. <http://www.monografias.com/trabajos/pdf/conocimientos>.

Sánchez P. A.: Suelos del trópico, características y manejo. Editorial IICA. Costa Rica, 1981:71 pp.

Sequera, O.; Ramírez Castillo, J.: Efectividad de la roca fosfórica de riecito acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba. 2001.

Sobulo, R.A.: Evaluation of analytical methods for determining potassium status of Nigerian soils. In potassium in tropical crops and Soils. Colloquium International potash Institute, Abdjan(1974):119-129pp.

Spaans, E.; Núñez, O: Manejo de suelos con precisión, labranza optima y fertilización calculadas. Segunda Cumbre Internacional de Agricultura Sostenible. Guayaquil, 2006.

Valero, N.; Lozano, A.; Valencia, H: Fijadores biológicos de nitrógeno asociados a caña de azúcar panelera en algunos cultivos de Cundinamarca (Colombia). XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, Cuba, 2001.

Villegas, R.: El fósforo de los suelos y efectividad del empleo de los fertilizantes fosfóricos en la caña de azúcar en la República de Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas/en ruso). Moscú, 1981:108pp.

Yera, B.; Arzola, N.; Pérez, H.: Dinámica de la extracción de nutrientes (NPK) por la caña de azúcar en un suelo Pardo con carbonato. Revista Centro Azúcar 2/95(1995)66-72 pp.

ANEXO.UNIDADES Y NOMENCLATURA EN LA CIENCIA DEL SUELO

Las expresiones tradicionales, no han perdido su valor, pero han cambiado, se ha establecido un sistema internacional de unidades (SI) que facilita el intercambio de información y evita las dificultades y confusiones que ocasiona la falta de estandarización en las unidades y dimensiones (Cuadro 1).

Cuadro 1: Unidades y dimensiones de las magnitudes físicas en SI y su relación con las unidades CGS

Denominación	Designación	Contiene unidades CGS
Longitud	m (metro)	100 cm
Masa	Kg	1000 g
Cantidad de sustancia	Mol	1
Unidades derivadas		
Area	m ²	10 ⁴ cm ²
Volumen	m ³	10 ⁶ cm ³
Densidad	Kg.m ⁻³	10 ⁻³ g/ cm ³

El SI no reconoce algunas unidades tradicionalmente empleadas como las del Cuadro 2.

Cuadro 2: Unidades no reconocidas en el SI y su definición

Nombre de la unidad	No pertenece al SI (símbolo)	Definición de la unidad en el SI
hectárea	Ha	10 ⁻⁴ m ²
Kg/ha	Ha	kg10 ⁻⁴ m ⁻²

El 30 de Diciembre de 1982 y mediante el decreto-Ley No 62, se establece en Cuba, el uso obligatorio del SI en todas las actividades de la economía nacional. A pesar de no pertenecer al SI se permite la utilización por las normas cubanas de los dos términos siguientes:

- Tonelada métrica (contiene 1000 Kg.)
- Hectárea (por tiempo indefinido, en campos especializados)

Para conformar una expresión de acuerdo a las normas del SI se debe considerar lo siguiente:

- Cuando una unidad de medida del Sistema Internacional está formada por la división de una entre otra se puede utilizar la línea oblicua o bien las potencias negativas. Es igual, kg. ha⁻¹ o kg /ha.
- Si para el símbolo de una de las unidades de medida se establece una potencia negativa no se permite utilizar la línea horizontal u oblicua.
- El mole es la cantidad de sustancia que contiene tantas unidades elementales como átomos hay en 0,012 kg de carbono 12. Cuando se emplea el mole , las entidades elementales **deben ser especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones**, electrones, otras partículas o grupos especificados de tales partículas. Añado a esto: esa especificación sería en este caso (+) para especificar que no son pesos moleculares sino equivalentes-gramo.
- En cuanto a la unidad de conductividad: es el dS/m o dS.m a la menos 1. Se lee decisimen y es el apellido alemán Siemens.

Como las expresiones tradicionales están presentes en toda la información existentes antes de que se implementara el SI, pero a partir de ese momento las expresiones cambiaron, es necesario conocer la equivalencia entre ambas para no perder todo el conocimiento acumulado por la humanidad (Cuadro 3).

Cuadro 3: Equivalencia entre algunas expresiones tradicionales y el SI.

EXPRESION TRADICIONAL	NUEVA EXPRESION
(mg/100 g de suelo)(10)	mg.kg ⁻¹
meq /100 g	cmol(+).kg ⁻¹
Conductividad eléctrica (mmho/cm)	dS. m ⁻¹ (siemens por metro, S/m o S.m ¹)
Diferentes unidades de expresión de masa y área (libra, quintal, caballería, etc.)	kg .ha ⁻¹ o kg ha ^{- 1} t. ha ^{- 1} o t ha ^{- 1}
Densidad aparente(10 ³ g/cm ³)	kg.m ⁻³

Muy utilizadas en la ciencia del suelo son expresiones y unidades químicas, como las que se relacionan a continuación:

- Molaridad: Número de moléculas gramo o moles de una sustancia disueltos en un litro de solución
- Normalidad: Número de equivalentes gramos de soluto disueltos en un litro de disolución, es decir, es la relación entre el número de equivalentes gramos y el volumen de la disolución expresado en litros.
- La unidad empleada durante mucho tiempo en relación con el intercambio catiónico fue el miliequivalente, que se define así: «Un miligramo de hidrógeno o la cantidad de cualquier otro ion que puede combinarse con él o desplazarle»

Así, si una arcilla tiene una CIC de 1 meq/100 g, es capaz de intercambiar y combinarse con 1 mg de H o su equivalente, para cada 100 g de sustancia seca

Esto es: 1 mg para cada 100 000 mg de arcilla, o sea 10 ppm

Por ejemplo: Consideremos el Ca. Este elemento tiene un peso atómico de 40 en comparación de 1 para el H. Cada ion Ca⁺⁺ tiene 2 cargas, y así es equivalente a 2 H⁺. De esta forma, la cantidad de calcio requerido para desplazar 1 mg de H es 40/2 = 20 mg. Este es el peso de 1 meq de Ca.

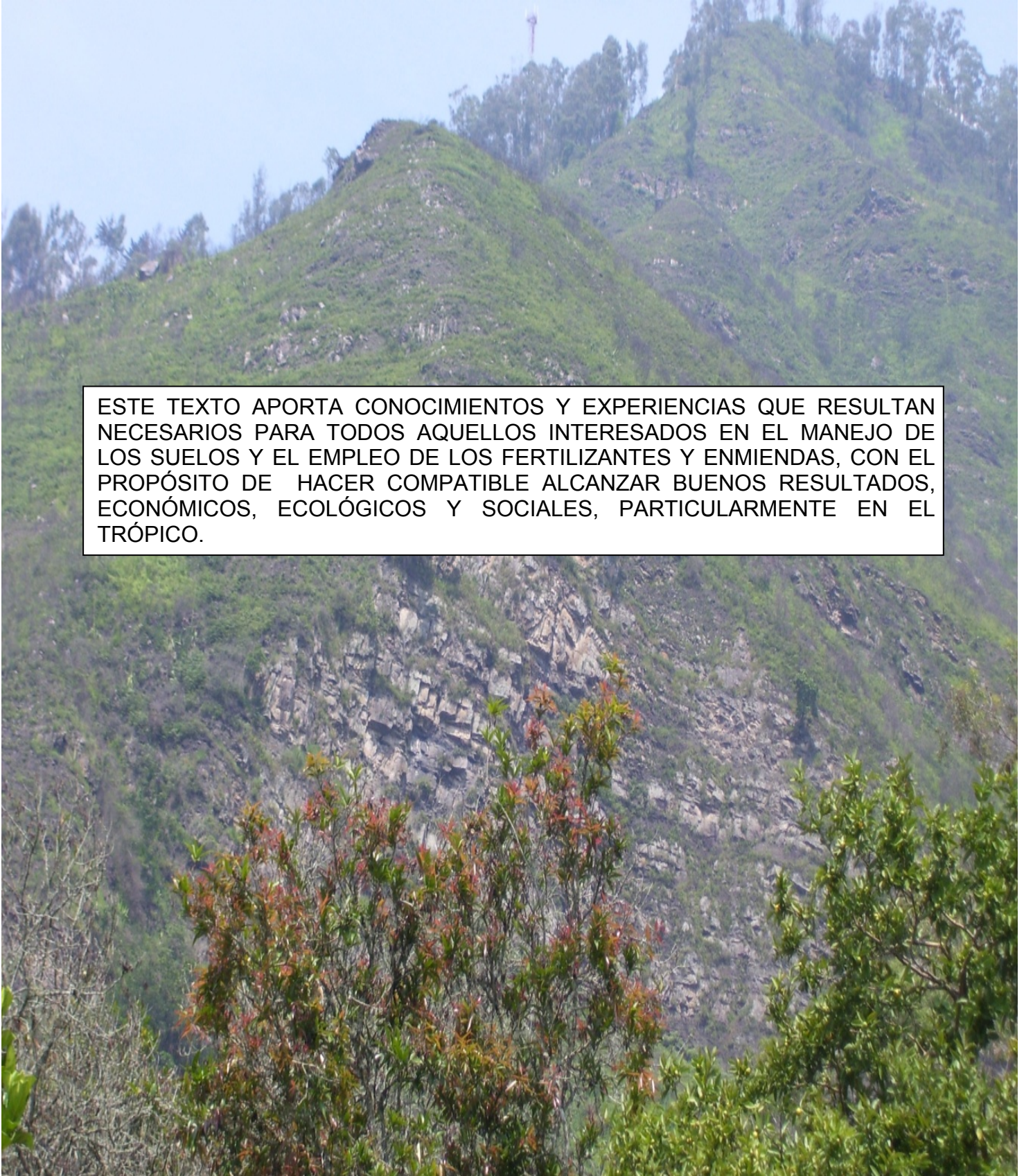
Molaridad de una disolución: Es la relación entre el número de fórmulas gramo y la masa del disolvente expresada en kilogramos

Molaridad: Fórmulas gramo de soluto disuelto/ kg de disolvente

Su unidad es el mole por kilogramo (mol/kg).

Unidades derivadas: mole por gramo (mol/g) y céntimo por kilogramo (cmol/kg).

$1\text{meq}/100\text{g} = 10\text{ meq}/\text{kg}$, es igual a $1\text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$



ESTE TEXTO APORTA CONOCIMIENTOS Y EXPERIENCIAS QUE RESULTAN NECESARIOS PARA TODOS AQUELLOS INTERESADOS EN EL MANEJO DE LOS SUELOS Y EL EMPLEO DE LOS FERTILIZANTES Y ENMIENDAS, CON EL PROPÓSITO DE HACER COMPATIBLE ALCANZAR BUENOS RESULTADOS, ECONÓMICOS, ECOLÓGICOS Y SOCIALES, PARTICULARMENTE EN EL TRÓPICO.

