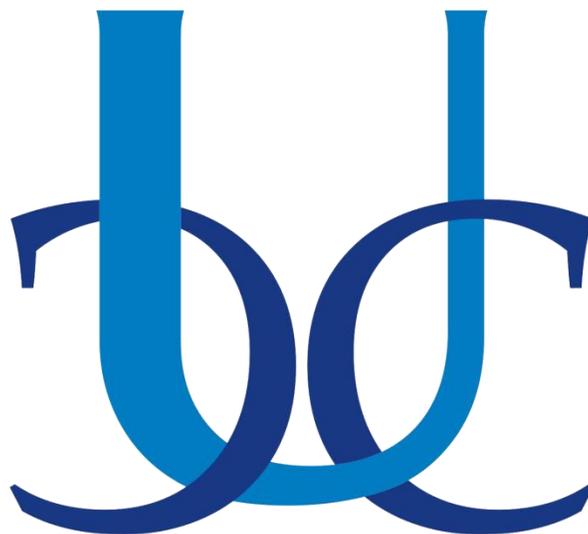


**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS  
CEDE “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

Propuesta tecnológica para la desinfección de las aguas residuales sanitarias  
de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

**Autor:** Yohana Ramírez Alfonso

**Tutor/es:** Ing. Alejandro Valdés López

**Cienfuegos 2018**

# DECLARATORIA DE AUTORIDAD

Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado: *Propuesta tecnológica para la desinfección de las aguas residuales sanitarias de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos* y por este medio reconozco al Departamento de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cienfuegos con todos los derechos patrimoniales del mismo. Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
**Autor:** Yohana Ramírez Alfonso

\_\_\_\_\_  
**Tutor:** Ing. Alejandro Valdés López

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referente a la temática señalada.

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor

\_\_\_\_\_  
Firma del Vicedecano

## PENSAMIENTO

*“Water is the most critical resource issue of our lifetime and our children’s lifetime. The health of our waters is the principal measure of how we live on the land.”*

Luna Leopold

# DEDICATORIA

A mi familia, especialmente a mi madre y mi padre, por su apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí, nada de esto hubiese sido posible sin ustedes.

A mis amigos, donde se incluye mi tutor y en especial a mi mejor amiga por su apoyo.

# AGRADECIMIENTOS

A mi tutor por su amistad, guía y ayuda durante el proceso.

A los trabajadores de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

A todos los que me apoyaron y ayudaron durante el transcurso de la tesis, familia y amigos.

# RESUMEN

El propósito del trabajo fue diseñar un sistema de desinfección con productos clorados para el tratamiento de los residuales sanitarios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos; que permita el control de los coliformes fecales antes de su vertimiento a la bahía, cumpliendo lo establecido en la NC 521:2007. Para su realización se elaboró un diseño de experimentos donde se determinó la dosificación de productos clorados óptima para el proceso usando el software Statgraphics Centurion XV. Se diseñó el sistema de dosificación, teniendo en cuenta las dimensiones de los tanques, el tipo de tubería, válvulas y accesorios necesarios, así como la disposición de los mismos en la planta. Se estimaron los costos de construcción, mano de obra, equipos y el costo anual por el consumo de agentes químicos. La propuesta tecnológica presentada consiste en dos tanques de 8 m<sup>3</sup> de volumen trabajando de manera discontinua acompañados de un sistema hidráulica compuesto por 4 válvulas de bola ¾ in, 3 codos de 90° galvanizado ¾ in, una Tee galvanizada ¾ in, 12 m de tubería galvanizada ¾ in, un nudo galvanizado ¾ in. El sistema diseñado permitirá cumplir con lo establecido en las regulaciones medioambientales, garantizando un mayor control de los vertimientos a la bahía y la preservación de la salud en la comunidad.

**Palabras clave:** coliformes fecales, aguas residuales, dosificación de cloro.

# ABSTRACT

The main objective through the development of this work was to design a water disinfection plant using chlorinate compounds, capable of controlling the fecal coliforms disposed for the Cienfuegos's Thermoelectric Company to the bay, fulfilling what is settled in the regulation norm NC 521:2007. It was elaborated an experiment design in order to calculated the optimum chlorine dosage using the Software Statgraphics Centurion XV. It was design the chlorine dosage system, taking into account the dimensions of the tanks, the type of pipe, valves and accessories needed, along with the disposition of the same in he plant. It was estimated the construction, hand working and equipment cost and the annual costs of chemical agents consumed. The technological proposal design its constituted by two tanks with 8 m<sup>3</sup> of volume working in an intermittent rate, along with an hydraulic system composed by four ball valves ¾ in, a 90° galvanized knuckle ¾, a galvanized Tee ¾ in, a galvanized pipe ¾ in with 12 m long and a galvanized knot ¾ in. The design system will aloud to perform what is settled in the environmental regulations, guarantying a better control from the disposals discharged to the bay and the preservation of the health in the community.

**Keywords:** fecal coliforms, wasting waters, chlorine dosage.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
1.1 Desarrollo sostenible y el problema de la crisis del agua.....	6
1.2 Contaminantes del agua .....	8
1.2.1 Parámetros químico – físicos .....	8
1.2.2 Parámetros biológicos .....	10
1.3 Aguas residuales sanitarias.....	12
1.4 Etapas y equipos para el tratamiento de aguas residuales .....	13
1.5 Tratamientos terciarios. Desinfección.....	19
1.5.1 Factores que influyen en la desinfección .....	20
1.5.2 Métodos de desinfección.....	21
1.5.3 Cinética de la desinfección. La ley de Chick .....	22
1.5.4 Cloración como método de desinfección .....	23
1.5.5 Demanda de cloro. Cloro residual.....	26
1.5.6 Formación de subproductos .....	27
1.6 Indicadores Técnicos Económicos .....	29
1.6.1 Flujo de Cajas e Indicadores Dinámicos de Rentabilidad.....	30
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
2.1 Caracterización del objeto de estudio.....	34
2.1.1 Localización geográfica .....	34
2.1.2 Política de gestión .....	35
2.1.2.1 Misión .....	35
2.1.2.2 Visión .....	35
2.1.3 Características del esquema tecnológico actual .....	37
2.2 Metodología de la investigación .....	37
2.3 Diseño de Experimento .....	39
2.3.1 Determinación del tamaño de la muestra .....	39
2.3.2 Diseño de Experimentos en Statgraphics Centurion XV .....	41
2.4 Dosificación de cloro .....	42
2.4.1 Número final de colonias esperado .....	43

2.4.2 Técnica del Método Yodimétrico.....	44
2.5 Procesamiento Estadístico.....	46
2.5.1 Análisis ANOVA Simple .....	46
2.5.2 Análisis de Regresión Simple .....	48
2.6 Diseño del sistema de dosificación .....	53
2.6.1 Diseño del tanque de dosificación.....	53
2.7.1 Precio del hipoclorito .....	56
2.7.2 Costo de la construcción .....	56
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
3.1 Tamaño de la muestra .....	59
3.2 Dosificación de cloro .....	60
3.3 Procesamiento Estadístico.....	63
3.3.1 Análisis ANOVA simple.....	63
3.3.2 Análisis de Regresión simple para el Hipoclorito de sodio.....	65
3.3.3 Análisis de Regresión simple para el Hipoclorito de calcio.....	67
3.4 Diseño del sistema de dosificación .....	70
3.4.1 Diseño de los tanques de retención .....	73
3.5 Consideraciones Económicas.....	76
3.5.1 Costo del hipoclorito .....	76
3.5.2 Costo de la construcción del sistema.....	77
3.5.3 Planificación de las actividades para la construcción y montaje del sistema .....	78
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>
Anexo 1 .....	92
Anexo 2 .....	93
Anexo 3 .....	94
Anexo 4 .....	95
Anexo 5 .....	96
Anexo 6 .....	97

# INTRODUCCIÓN

## **INTRODUCCIÓN**

La carencia de plantas de tratamiento para las aguas residuales sanitarias en las ciudades, industrias, hoteles y otras actividades económicas, generan grandes volúmenes de contaminantes que afectan al medio ambiente. Muchas de estas aguas son descargadas en los ríos, mares y otros cuerpos receptores sin el tratamiento requerido antes de ser vertidas. La primera prioridad que demanda una comunidad es el suministro del agua, con calidad adecuada y cantidad suficiente, pero otra no menos importante, es la adecuada gestión de las aguas ya utilizadas que se convierten en potenciales vehículos de enfermedades y perturbaciones al medioambiente.

Las aguas de desecho vertidas sin ningún tratamiento ocasionan graves inconvenientes de contaminación que afectan la flora y la fauna. Estas aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause problemas medioambientales. El grado de tratamiento requerido en cada caso para las aguas dependerá de las condiciones del agua residual a tratar y de a dónde será vertida después de su tratamiento. Con este propósito las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser diseñadas, construidas y operadas con el objetivo de convertir el residuo en un efluente final aceptable, lo que obliga a satisfacer cierta normativa.

La Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos ha sido Vanguardia Nacional por más de 25 años y posee certificado un Sistema de Gestión Integrada que abarca las normas cubanas NC-ISO 9001:2008, NC-ISO 18000:2005, NC-ISO 14000:2007, NC-ISO 50001:2012 y NC 3001:2007. Actualmente se encuentra en un proceso de recertificación de cada una de estas normas de conformidad con las nuevas regulaciones vigentes, en particular la relacionada con la regulación medioambiental.

Desde el diseño de la empresa se previó el montaje de una planta para el tratamiento de los residuales albañales, el cual no se ejecutó. Se mantuvo el vertimiento sin control de estas aguas a la bahía, pero con el incremento de las regulaciones medioambientales en el país y la aplicación de las Normas ISO relacionadas con este tema, es necesario el control de estos vertimientos. A raíz de las auditorías para la certificación del Sistema de Gestión Ambiental en la entidad, entre las no conformidades encontradas está la presencia de coliformes

fecales en las aguas albañales que se vierten a la zona costera, con parámetros muy superiores a los establecidos en la norma.

Los coliformes se introducen en gran número al medio ambiente por las heces de humanos. Tradicionalmente se los ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua a razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto, su ausencia es un indicador que el agua es bacteriológicamente segura. Los niveles recomendados de bacterias coliformes fecales en las aguas de la zona costera son de 200 colonias por cada 100 ml de agua, según la norma NC 521:2007 y actualmente la concentración en la zona donde vierte la Termoeléctrica es de 16000 colonias por cada 100 ml de agua, muy por encima de lo establecido. Por estos antecedentes se determinó el siguiente problema de investigación.

### **Problema de investigación**

La Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos no dispone de un sistema de desinfección que permita el control de los coliformes fecales en los residuales sanitarios que son vertidos a la bahía de Cienfuegos.

### **Hipótesis**

La desinfección de los residuales sanitarios de la Termoeléctrica de Cienfuegos mediante la cloración permitirá el control de los coliformes fecales dentro de los parámetros establecidos por la NC 521:2007 para el vertimiento.

### **Objetivo general**

Diseñar un esquema tecnológico que permita el control de los coliformes fecales dentro de los límites permisibles de la NC 521:2007 para el vertimiento de los residuales sanitarios de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

### **Objetivos específicos**

1. Establecer los fundamentos científicos que sustentan la investigación para el establecimiento de un adecuado sistema de tratamiento de aguas residuales sanitarias.

2. Calcular la dosificación óptima de productos clorados para lograr mantener un cloro residual suficiente para la reducción de coliformes fecales por debajo de las especificaciones de la NC 521:2007 para el vertimiento.
3. Determinar las características tecnológicas del sistema de tratamiento para la desinfección de los residuales sanitarios mediante la cloración.
4. Estimar los costos de inversión y operación asociados a la propuesta tecnológica presentada.

### **Estructura de la tesis**

Para conducir la investigación la tesis se estructuró en tres capítulos.

En el Capítulo 1 se analiza el estado actual del problema de la crisis del agua, sus contaminantes, los tipos de aguas residuales y los tratamientos existentes para aguas sanitarias. Se hace hincapié en la desinfección con cloro como tratamiento de aguas residuales y se finaliza explicando los conceptos básicos a tener en cuenta en un análisis económico.

En el Capítulo 2 se analiza las características del objeto de estudio y se describen los pasos para su evaluación y la determinación de la dosis óptima de cloro, mediante un diseño de experimento y un análisis estadístico. Por último, se definen los precios de la construcción del sistema y del consumo de hipoclorito.

En el Capítulo 3 se presentan los principales resultados de la investigación, se analizan los datos obtenidos de la determinación de la dosificación óptima y su procesamiento estadístico. Se diseña el sistema de dosificación con sus componentes y finalmente se hace una evaluación económica de los gastos de la construcción del sistema.

### **Aportes de la investigación**

1. En la investigación se establece un procedimiento sencillo, fundamentado en técnicas estadísticas, para el cálculo de las dosificaciones óptimas de productos clorados para la desinfección de residuales sanitarios.

### **Resultados Obtenidos**

1. La propuesta tecnológica presentada en esta investigación constituye una posible solución al problema de los altos niveles de coliformes fecales en los residuales sanitarios de la Termoeléctrica de Cienfuegos. El sistema tiene la ventaja que para

su implementación no es necesario realizar importaciones, lo que contribuye a minimizar sus costos.

2. Los costos de inversión y operación estimados para la ejecución de la propuesta tecnológica facilitan la toma de decisiones por parte de los directivos de la Termoeléctrica de Cienfuegos.

# CAPÍTULO I

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se resume el estado actual del problema de la crisis del agua y la relación del cuidado y correcta administración de este recurso para garantizar el desarrollo sostenible de un país. Posteriormente se analizan los contaminantes de la misma y los distintos conceptos de aguas residuales. Se explican brevemente los distintos tratamientos para aguas sanitarias, haciendo hincapié en la desinfección con cloro, factores que afectan este proceso, su cinética, su demanda para que el proceso cumpla con su objetivo y los subproductos que se forman durante la cloración. Para finalizar se explican los indicadores dinámicos de rentabilidad y los conceptos básicos a tener en cuenta en un análisis económico.

### **1.1. Desarrollo sostenible y el problema de la crisis del agua**

La definición de desarrollo sustentable más aceptada en la actualidad se plantea como: “el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987). Para esto es necesario alcanzar un ritmo sostenido y equitativo de crecimiento económico y de mejoramiento de la calidad de vida, sin dañar las condiciones ecológicas y sociales, para que ese desarrollo pueda perdurar en el tiempo.

La gestión eficiente del agua es una de las actividades que más puede contribuir al desarrollo sostenible. El crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental dependen en gran medida de los recursos hídricos y de los servicios que proporcionan, destacando su función en la alimentación, la seguridad energética, la salud humana y ambiental y el bienestar social. Para garantizar ese desarrollo, hay que comenzar promoviendo una educación y sensibilización en los temas ambientales donde el tema agua demanda una atención prioritaria y urgente debido a su escasez; a lo que se le suma la contaminación de las fuentes de suministro producto del mal tratamiento, o en muchos casos de ningún tratamiento, de los residuales que son vertidos en las masas receptoras.

De acuerdo al informe (Brundtland, 1987), se estima que en nuestro planeta hay unos  $1\,386 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  de agua, de ellos  $1\,351 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  son de aguas salinas y  $35 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  de agua dulce, representando el 97,47 % y el 2,53 % del total respectivamente. Sin embargo, de las aguas dulces,  $24,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  se encuentran en los casquetes polares,  $10,4 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  son aguas subterráneas y  $0,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  aguas superficiales. El continente americano, con  $3\,856 \cdot 10^6$

km<sup>3</sup>hectáreas y  $830 \cdot 10^6$  habitantes, concentra la mayor cantidad de agua disponible del mundo ( $200\,000\text{ km}^3$ ), pero de ellos sólo  $42\,780 \cdot 10^6\text{ km}^3$  anuales se consideran renovables. Es decir, posee algo más del 31,3% de la superficie terrestre, el 13,7 % de la población global, y casi el 42 % de la disponibilidad mundial de recursos hídricos renovables. Sin embargo, durante los últimos 100 años, debido al crecimiento poblacional, la gran demanda del sector agrícola y el desarrollo de los procesos industriales, los requerimientos de agua aumentaron seis veces; según algunos, más de lo que los ecosistemas pueden soportar (Lobelles, 2016).

Esta situación ligada a que muchas industrias no cuentan con un sistema de tratamiento adecuado ha provocado que en la actualidad América Latina experimente un serio problema con la contaminación del agua. Nuestro país no está exento de estos problemas lo que ha influido en que las masas receptoras, especialmente en las zonas más densamente pobladas y desarrolladas, incapaces por sí mismas de absorber y neutralizar la carga contaminante de los residuos, hayan ido perdiendo sus condiciones naturales de apariencia física y su capacidad para sustentar una vida acuática adecuada, que responda al equilibrio ecológico que de ellas se espera.

La mejora del tratamiento de aguas residuales y el aumento de la reutilización del agua, ayudarán a reducir las extracciones de agua y la pérdida de recursos en sistemas de producción y actividades económicas. Las aguas residuales son un recurso desaprovechado que con un adecuado tratamiento aliviarían los problemas que hoy enfrenta el mundo con el suministro de agua. La reutilización de las aguas residuales en una industria permite mejorar su desempeño ambiental y su capacidad competitiva, ya que muchas de estas aguas contienen subproductos que pueden ser empleados como materia prima en otros procesos. Las aguas residuales sanitarias pueden ser tratadas y reutilizadas para riego en la agricultura, y los lodos que genera del proceso de tratamiento pueden emplearse como fertilizante. Estos tratamientos y reutilizaciones reducen los costos de producción, el consumo de agua y los gastos incurridos en el propio tratamiento de dichas aguas residuales.

Sin embargo, hasta este momento las aguas residuales siguen siendo un recurso infravalorado, visto con demasiada frecuencia como una carga que debe eliminarse o una molestia que debe ignorarse. Una mejor gestión de las aguas residuales ofrece muchas

oportunidades, especialmente en el contexto de una economía circular, donde el desarrollo económico se equilibra con la protección de los recursos y la sostenibilidad ambiental, y donde una economía más limpia y más sostenible tiene un efecto positivo en la calidad del agua (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2017).

## **1.2 Contaminantes del agua**

El agua residual vertida en cualquier cuerpo receptor originará cierto grado de contaminación, por lo que debemos controlar los parámetros con los que esta es vertida para así minimizar efectos indeseables. Los contaminantes del agua pueden estar presentes de diversas formas y cada una de ellas se introduce en el medio ambiente por distintos medios y a su vez cuentan con peligros específicos.

Los principales contaminantes que afectan los cuerpos receptores pueden ser de naturaleza química – física o biológica. Entre los contaminantes químico – físicos están la temperatura, la turbidez, organolépticos (color, olor), los sólidos totales, el pH, la demanda biológica y demanda química de oxígeno, el oxígeno disuelto y el nitrógeno mientras que dentro de los contaminantes biológicos se encuentran los microorganismos patógenos como virus, bacterias, protozoos, entre otros.

### **1.2.1 Parámetros químico – físicos**

La temperatura de las aguas residuales es generalmente mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. La temperatura afecta la actividad de los microorganismos si se aumenta por encima de la temperatura que garantiza las condiciones de vida para ese microorganismo, determina la cantidad de energía neta producida e influye en la relación pH–alcalinidad. Los microorganismos en los ambientes anaeróbicos con relación a la temperatura pueden subdividirse en tres categorías: psicofílico (0 a 20°C), mesofílico (20 a 40°C) y termofílico (45 a 65°C). La descarga de los residuales con una temperatura excesiva puede afectar el equilibrio de los ecosistemas por lo que es uno de los parámetros más monitoreados en los sistemas de vertimientos.

La turbidez es una medida de la propiedad de transmisión de la luz del agua, es utilizada para indicar la calidad de los vertidos de aguas residuales con respecto a la materia suspendida. En la medida que existan más sólidos en suspensión en el residual mayor será

su turbidez y menor su calidad para el vertido. Esta propiedad se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (NTU por sus siglas en inglés).

El color es un indicativo de la edad de las aguas residuales. El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro. En esta condición, se dice que el agua residual es séptica. El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, como el metano y, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica.

Los sólidos totales presentes en el agua residual se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables. Los sólidos suspendidos son las partículas flotantes y aquellas otras que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos sencillos. Los sólidos filtrables se componen de sólidos coloidales y disueltos. Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación, por lo general, se requiere una coagulación seguida de sedimentación para eliminar estas partículas de la suspensión.

El pH es un indicador de la concentración de iones hidronio ( $H_3O^+$ ) que están presentes en el agua. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6,5 a 8,5. El rango de pH adecuado para el vertimiento de aguas residuales a la bahía está entre 5,5 y 9,0 de acuerdo a lo establecido en la NC 521:2007. Fuera de este rango, la concentración de iones ( $H_3O^+$ ) alterarían la composición del agua en el cuerpo receptor, dañando la vida de los organismos.

La demanda biológica de oxígeno (DBO) es una medida de la cantidad de oxígeno consumido al degradar (oxidar) los microorganismos presentes en el agua residual la materia orgánica. Se utiliza para medir el grado de contaminación, la calidad de aguas residuales, diseñar y evaluar las unidades de tratamiento biológico y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.

La demanda química de oxígeno (DQO) mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos presentes en las aguas residuales. Al igual que la DQO, se usa para medir el grado de contaminación del agua a tratar.

El oxígeno disuelto (OD) es una medida de la concentración de oxígeno disuelta en el agua y permite a los organismos aerobios asimilar y degradar la materia orgánica. Su baja disponibilidad limita la capacidad autopurificadora de las aguas residuales haciendo necesario su tratamiento. La determinación del OD es fundamental en el cálculo de la DBO y a la hora de valorar de las condiciones de aerobividad de un agua, siendo un aspecto de importancia para el diseño y evaluación de plantas de tratamiento.

El nitrógeno es un nutriente esencial para la vida microbológica. Las formas de interés del nitrógeno en aguas residuales son el nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y nitrógeno en forma de nitritos y nitratos. Los datos del nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales mediante procesos biológicos. La forma predominante del nitrógeno en aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y si el medio es aerobio, en nitritos y nitratos. El predominio de nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos sin embargo, pueden ser utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas y por ello, puede necesitarse la remoción del nitrógeno para prevenir dichos crecimientos (Marín & Correa, 2010).

### **1.2.2. Parámetros biológicos**

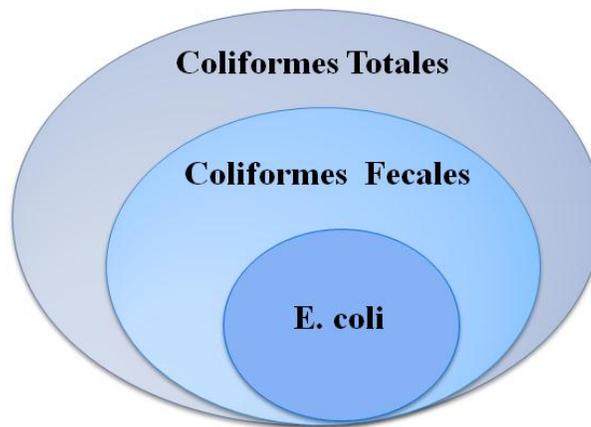
En las aguas residuales habitan varios grupos de microorganismos dentro de los que podemos encontrar bacterias, virus, algas y protozoos, que pueden ser infecciosos o no para los humanos. Los desechos humanos y de animales contienen a menudo patógenos intestinales, que entran al agua a partir de una gran variedad de fuentes como las plantas tratadoras de aguas residuales, sistemas sépticos, las operaciones con el ganado, la fauna, la escorrentía de las tierras rurales y urbanas, y las actividades agrícolas. El más grande impacto de la contaminación del agua sobre la salud humana es a través de su ingestión, al actuar como un vehículo importante para la transmisión de enfermedades donde el grupo coliforme juega un papel activo.

#### **1.2.2.1. Grupo coliforme**

El grupo coliforme incluye las bacterias de forma bacilar, aeróbicas y facultativas anaeróbicas, Gram-negativas, no formadoras de esporas, las cuales fermentan la lactosa con

formación de gas en un período de 48 horas a 35 °C (o 37 °C). Los coliformes fecales se denominan termotolerantes por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas.

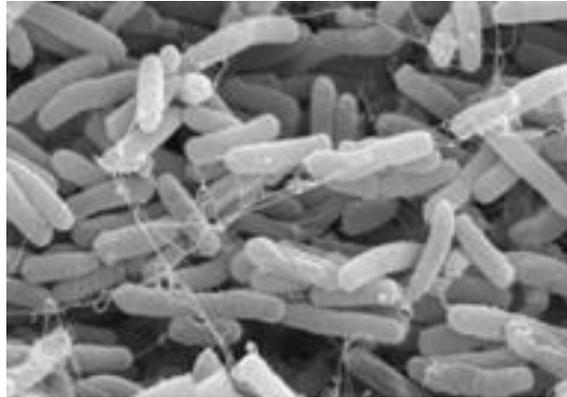
De acuerdo a (Sigler & Bauder, 2012), los coliformes totales son un grupo de bacterias presentes alrededor nuestro, donde la mayoría no representan un peligro para la salud humana. Sin embargo, estas bacterias no están naturalmente presentes en las aguas subterráneas y son un indicador de que pueden estar presentes más organismos dañinos. El coliforme fecal y la *Escherichia coli* (*E.coli*) son subgrupos dentro del grupo de coliforme total, que se puede ver representado en la Figura 1.1, quienes se originan en las heces de animales de sangre caliente. La presencia de *E.coli* indica que el agua ha sido expuesta a heces y existe un inmediato riesgo a la salud humana.



**Figura 1.1.**Relación entre los Coliformes Totales, Coliformes Fecales y la bacteria *E. coli*.  
**Fuente.** (Sigler & Bauder, 2012)

Los coliformes fecales en particular, se han seleccionado como indicadores de contaminación fecal debido a su relación con el grupo tifoide-paratifoide y a su alta concentración en diferentes tipos de muestras. Aproximadamente el 95 % del grupo de los coliformes presentes en heces fecales, están formados por *Escherichia coli* y ciertas especies de *Klebsiella*.

La *Escherichia coli*, representado en la Figura 1.2, es la bacteria indicadora por excelencia del grupo coliforme fecal, debido a su presencia permanente en la flora intestinal del hombre y de los animales de sangre caliente; es gram negativa, facultativa anaerobia, de forma bacilar, de 0,5 a 2 µm de tamaño. La mayoría de los miembros de la especie *E.coli* son comensalitas inocuos, pero algunas cepas son patógenas. La *E.coli* patógena causa diarrea, especialmente en niños y extranjeros (Marín & Correa, 2010).



**Figura 1.2.**Bacteria *Escherichia Coli* (*E.coli*).**Fuente.** (Sigler & Bauder, 2012)

### **1.3. Aguas residuales sanitarias**

Las aguas residuales son aquellas que han sido utilizadas por el hombre; su composición cambia respecto a su origen producto al uso dado y ahora cuentan con componentes contaminantes que pueden dañar al medio ambiente y la salud humana de no ser tratadas. Dentro de las aguas residuales se encuentran las aguas negras, procedentes de las heces y orina de humanos, del aseo personal, la cocina y la limpieza y contienen gran cantidad de materia orgánica. Las aguas blancas procedentes de la limpieza de lugares públicos y de lugares donde las precipitaciones son muy abundantes, necesitan ser evacuadas por separado para que no saturen los sistemas de depuración. Las aguas residuales industriales pueden contener en dependencia de su origen, una diversidad de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, donde se incluyen los aceites, detergentes, grasas, ácidos y otros compuestos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Y las aguas residuales agrícolas y ganaderas, que contienen una alta carga orgánica y abundan en lugares donde se usan tratamientos químicos para el suelo y los cultivos, sustancias y compuestos químicos, donde se incluyen restos de plaguicidas y fertilizantes.

Las aguas residuales sanitarias o aguas residuales urbanas son las que serán tratadas con mayor profundidad en el trabajo. Las zonas residenciales y los centros comerciales constituyen las principales fuentes de generación de aguas residuales urbanas, por lo tanto, la cantidad de agua residual depende directamente de la cantidad de población, por ello es muy típico hacer una determinación del caudal del agua residual en función de la población equivalente (PE). En nuestro caso, será tratada la generación de agua residual sanitaria de

una industria y la población equivalente sería la cantidad de trabajadores con los que cuenta dicha industria.

El agua residual, debido a su composición puede originar problemas medioambientales muy severos, la presencia de materia orgánica junto con nutrientes puede provocar alteraciones en la microbiota de un sistema, llegándose a producir eutrofización del medio, con presencia de sustancias tóxicas que pueden causar daños muy graves, incluso a los seres humanos, si se utiliza esta agua. Entre los distintos elementos contaminantes que contiene el agua residual urbana y que ya fueron abordados anteriormente, cabría destacar la materia orgánica, en ella se encuentran presentes una gran cantidad de microorganismos del grupo coliforme que son portadores de enfermedades como el cólera.

#### **1.4. Etapas y equipos para el tratamiento de aguas residuales**

La complejidad y efectividad de los sistemas de tratamiento del agua residual obedecen a la adecuada aplicación de las operaciones y procesos unitarios tal que, permite cumplir los propósitos por el que el sistema es empleado. Actualmente, dichas operaciones y procesos unitarios, están siendo sometidos a una intensa y continua investigación, tanto desde el punto de vista de ejecución, como de aplicación de los mismos. Como consecuencia de ello se ha desarrollado nuevas operaciones y procesos de tratamiento, y se han llevado a cabo muchas modificaciones en los procesos y operaciones existentes, con el objetivo de conseguir su adecuación a los crecimientos, y rigurosos requerimientos que se establecen, con el propósito de mejorar la calidad del agua residual. (Quiroz, 2009)

El tratamiento de aguas se divide en tres etapas conocidas como tratamiento primario, secundario y terciario. El objetivo del tratamiento primario es para separar sólidos de gran tamaño del agua, para que pueda pasar al tratamiento secundario sin que afecte a los equipos posteriores. El tratamiento secundario tiene como objetivo eliminar la materia orgánica en disolución y en estado coloidal mediante un proceso de oxidación de naturaleza biológica seguido de una sedimentación. Este proceso biológico es un proceso natural controlado en el cual participan los microorganismos presentes en el agua residual. Estos microorganismos, principalmente bacterias, se alimentan de los sólidos en suspensión y estado coloidal produciendo en su degradación en anhídrido carbónico y agua, originándose una biomasa bacteriana. El tratamiento terciario también es conocido como tratamiento de

maduración y tratamiento químico por el producto utilizado para su decantación de sólidos; así el agua queda limpia.

Los tratamientos primarios son físicos, encontrándose la utilización del cribado, tamices estáticos, trituradores de canal, tanques de homogenización, desarenadores, sedimentadores, que funcionan tanto por el principio de la flotación como de sedimentación y filtros como los más usados y, como ya se mencionó anteriormente, la función de este tratamiento y de estos equipos es reducir los sólidos en suspensión del agua residual.

Los tratamientos secundarios disminuyen la DBO y los sólidos suspendidos que no son removidos en los procesos anteriores y las reacciones que generan estos procesos son generalmente biológicos. Existen varios métodos y equipos para tratamiento secundario, donde se encuentran las lagunas de oxidación, filtros percoladores y los reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA o UASB) (Lizarazo & Orjuela, 2013).

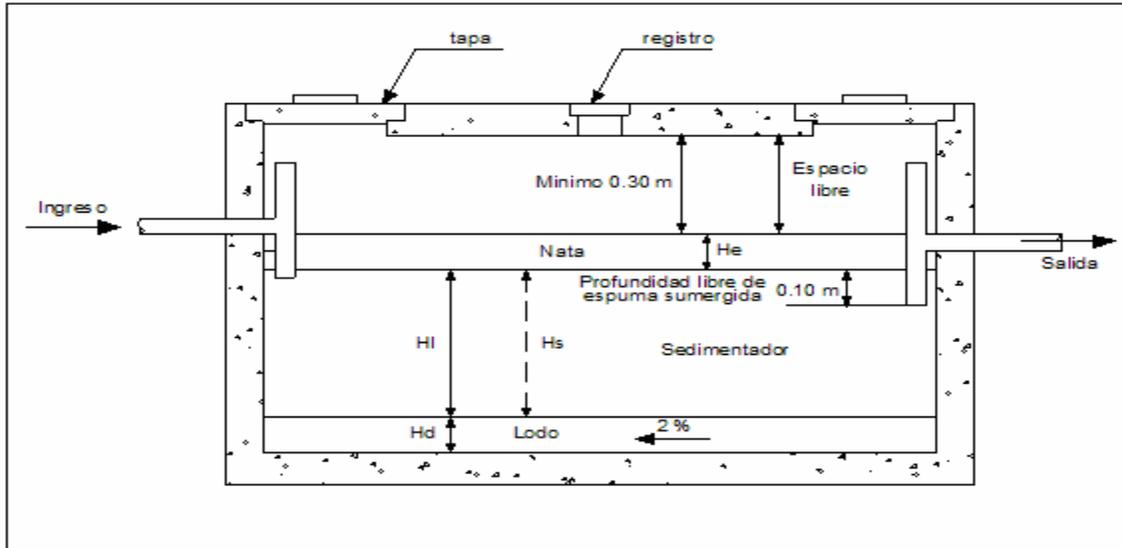
El proceso terciario generalmente es un proceso de desinfección mediante un agente químico con propiedades desinfectantes o un proceso físico, en su mayoría se usa un sedimentador ayudado por una sustancia química que permite el tratamiento final del agua.

Los desarenadores y rejillas (Figura 1.3) son usados para remover los sólidos de gran tamaño que contiene el agua residual. Son empleados cuando el volumen del flujo a tratar es considerable y el agua residual es trasladada desde una zona relativamente lejana hasta el sitio donde se efectuará su tratamiento, por lo cual se aplican mayormente para el tratamiento de las aguas sanitarias de una población y antes de que esta pase a lagunas de oxidación, que son el tratamiento secundario más utilizado para tratar aguas residuales sanitarias de una localidad.



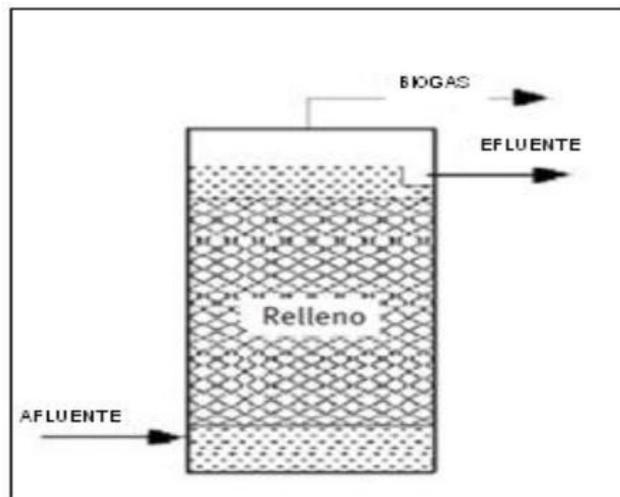
**Figura 1.3.**Rejillas. **Fuente.** (Oakley, 2005)

Los tanques o fosas sépticos (Figura 1.4) se utilizan solo para el tratamiento de aguas residuales sanitarias y para pequeñas poblaciones. Los desechos son sometidos a un tratamiento parcial dentro del tanque donde se separan los lodos y la materia flotante. Es necesario crear dentro de este una situación de estabilidad hidráulica que permita la sedimentación por gravedad de las partículas pesadas. La materia orgánica contenida en las capas de lodo y espuma es descompuesta por bacterias anaerobias y una parte considerable de ella se convierte en agua y gases. Los lodos que ocupan la parte inferior del tanque séptico se compactan debido al peso del líquido y a los sólidos que soportan, por ello su volumen es mucho menor que el de los sólidos contenidos en las aguas servidas no tratadas que llegan al tanque y estos deben extraerse periódicamente. Las burbujas de gas que suben a la superficie crean cierta perturbación en la corriente del líquido. La velocidad del proceso de digestión aumenta con la temperatura, con el máximo alrededor de los 35 °C. La eficiencia de la eliminación de los sólidos por sedimentación tiende a ser grande, alrededor del 80 %; sin embargo, esto depende en gran medida del tiempo de retención y la frecuencia de la extracción de los lodos sedimentados. (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2005)



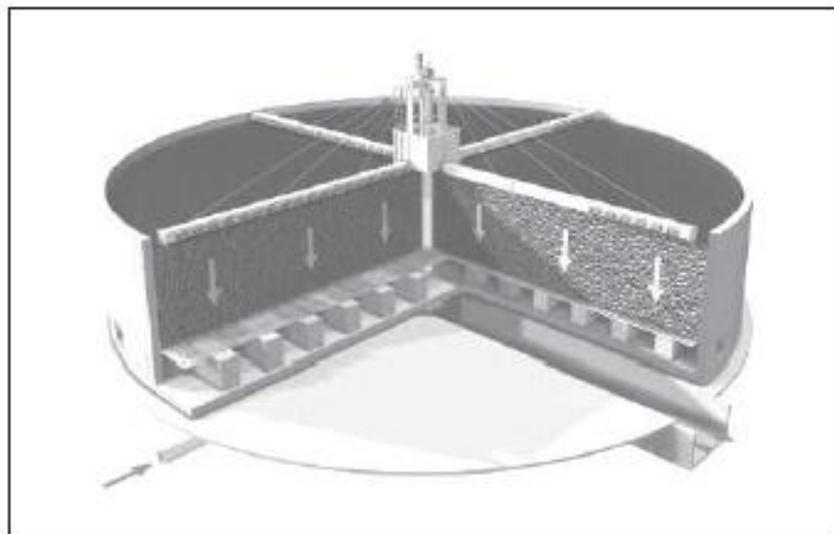
**Figura 1.4.** Tanque séptico. **Fuente.** (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2005)

Como tratamientos secundarios pueden ser empleados filtros anaerobios (Figura 1.5). Esencialmente consiste en un reactor de flujo ascendente empacado con soportes plásticos o con piedras de 3 a 5 cm de diámetro promedio. El coeficiente de vacío debe ser grande para evitar el taponamiento, lo que en algunos casos se traduce en un área específica inferior a  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Debido a la distribución desordenada del soporte, las purgas de lodo no son efectivas, lo que provoca una acumulación lenta pero constante de biomasa que con el tiempo puede crear problemas de taponamiento. Este reactor puede admitir cargas hasta de  $20 \text{ Kg.DQO}/\text{m}^3\text{día}$  (Quiroz, 2009).



**Figura 1.5.** Filtro anaerobio. **Fuente.** (Pinzón & Almeida, 2010)

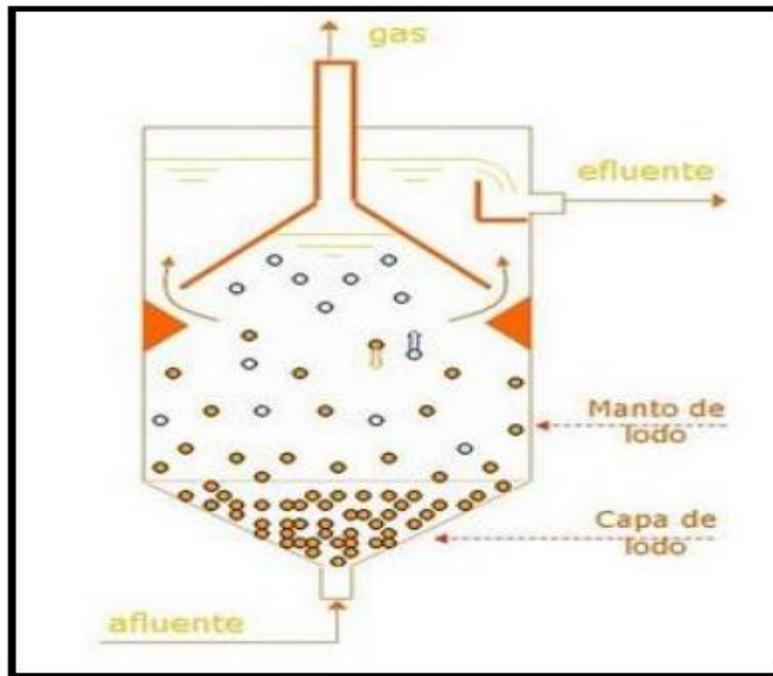
Los filtros percoladores o biofiltros (Figura 1.6), es otra opción para tratamiento secundario de aguas residuales. El mecanismo principal de remoción de la materia orgánica de este sistema no es la filtración sino la adsorción y asimilación biológica en el medio de soporte. Una vez que el filtro se encuentre operando, la superficie del medio comienza a cubrirse con una sustancia viscosa y gelatinosa conteniendo bacterias y otro tipo de microorganismos. El efluente de la sedimentación primaria es distribuido uniformemente en el medio de soporte del filtro a través de un sistema distribuidor de flujo. Al cabo de un tiempo, comienza el crecimiento microbiano en la interfase anaerobia del medio filtrante, generando el crecimiento de organismos anaerobios y facultativos que junto con los organismos aerobios forman el mecanismo básico para la remoción de la materia orgánica. El efluente del filtro percolador deberá pasar a través de un clarificador secundario para colectar la biomasa desprendida. La sedimentación primaria es necesaria antes de los filtros para minimizar los problemas de obstrucción (Quiroz, 2009).



**Figura 1.6.**Sección de un filtro percolador. **Fuente.** (Sainz, 2005)

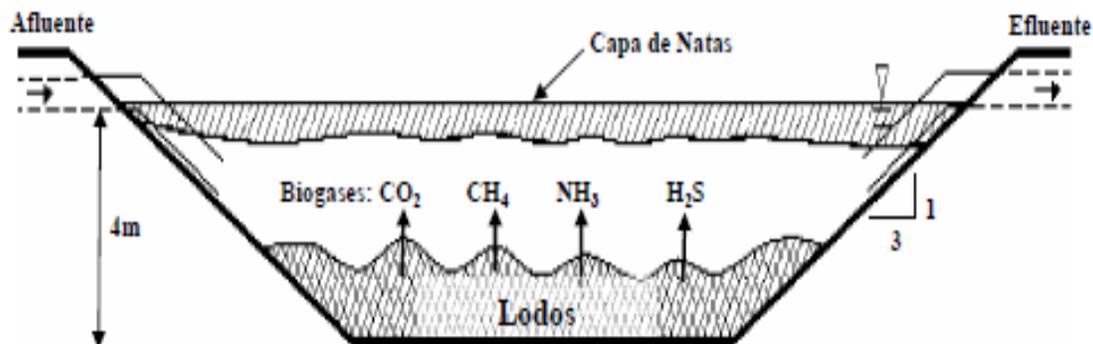
Los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA) o UASB por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), que se muestra en la Figura 1.7, son comúnmente usados como tratamiento secundario y tienen una que consiste en que no requieren ningún tipo de soporte para retener la biomasa, lo que implica un ahorro importante. Su principio de funcionamiento se basa en la buena sedimentabilidad de la biomasa producida dentro del reactor, la cual se aglomera en forma de granos o flóculos. Estos granos o flóculos cuentan

además con una actividad metanogénica muy elevada, lo que explica los buenos resultados del proceso. El reactor es de flujo ascendente y en la parte superior cuenta con un sistema de separación gas-líquido-sólido, el cual evita la salida de los sólidos suspendidos en el efluente y favorece la evacuación del gas y la decantación de los flóculos que eventualmente llegan a la parte superior del reactor (Quiroz, 2009).



**Figura 1.7.**Reactor UASB. **Fuente.** (Pinzón & Almeida, 2010)

Las lagunas anaerobias (Figura 1.8) generalmente se usan como una primera etapa de depuración; se puede considerar como un gran digestor ya que se le aplican cantidades de materia orgánica o carga orgánica por unidad de volumen, de manera tal que prevalezcan las condiciones anaerobias, es decir ausencia de oxígeno. La eficiencia esperada en este tipo de lagunas varía con el tiempo de retención hidráulica; con tiempos de 1 a 5 días se obtienen eficiencias de remoción de DBO de 40 a 60 %, respectivamente. La temperatura es uno de los factores que más influencia tiene en estas unidades, se puede decir que su eficiencia decrece notablemente con valores inferiores a 15 °C. Una desventaja de estas lagunas es la producción eventual de malos olores que impide su localización en lugares cercanos (500 m) de zonas habitadas. Generalmente son estanques profundos, de 3 a 4 metros de profundidad (Quiroz, 2009).



**Figura 1.8.** Diagrama de una laguna anaeróbica. **Fuente.** (Oakley, 2005)

Como tratamiento físico también puede emplearse la cavitación para la eliminación de los microorganismos. La cavitación ocurre al producirse oscilaciones de presión dentro de un líquido. Si la presión mínima alcanza la presión de vapor del líquido se produce el crecimiento de burbujas, que colapsan cuando la presión vuelve a crecer. En determinadas ocasiones el colapso de las burbujas resulta implosivo y los efectos de compresión sobre los gases internos de las burbujas pueden provocar picos de temperaturas y presiones internas del orden de  $10^4$  K y  $10^3$  atm respectivamente. En estas condiciones se generan radicales hidroxilo, los cuales son muy oxidantes y consecuentemente, reacciones en cadena que provocan la destrucción química de las sustancias presentes en las burbujas. Las burbujas formadas en el seno del líquido equivalen por tanto a microreactores donde tienen lugar el tratamiento de las aguas contaminadas. (Benito & Arrojo, 2006).

### 1.5. Tratamientos terciarios. Desinfección

El concepto de desinfección es definido por muchos autores que hablan sobre el tratamiento de aguas. Según (Gómez & Payán, 2008), la desinfección significa la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de estos microorganismos. Si estos microorganismos no son eliminados el agua no es potable y es susceptible de causar enfermedades. El agua potable no puede contener estos microorganismos. La desinfección se logra mediante desinfectantes químicos y/o físicos. Estos agentes también extraen contaminantes orgánicos del agua, que son nutrientes o cobijo para los microorganismos. Los desinfectantes no solo deben matar a los microorganismos, sino que deben además tener un efecto residual, que significa que se

mantienen como agentes activos en el agua después de la desinfección para prevenir el crecimiento de los microorganismos en las tuberías provocando la recontaminación del agua.

Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos que pueden ser tanto físicos como químicos. Dentro de los métodos físicos está el empleo de calor y radiación y dentro de los químicos, la ozonificación, tratamientos con corriente eléctrica por electrólisis y el uso de agentes oxidantes como el cloro y algunos de sus derivados.

La desinfección normalmente provoca la corrosión de la pared celular de los microorganismos, o cambios en la permeabilidad de la célula, cambios en la actividad de protoplasma celular o actividad enzimática (debido al cambio estructural de las enzimas). Estos problemas en la célula evitan la multiplicación de los microorganismos. Los desinfectantes también provocan la oxidación y destrucción de la materia orgánica que son generalmente nutrientes y fuente de alimentación de los microorganismos (Gómez & Payán, 2008).

#### **1.5.1. Factores que influyen en la desinfección**

Como todo proceso, la desinfección se ve afectada por parámetros físicos – químicos y biológicos. Los parámetros físicos – químicos incluyen el tiempo de contacto, la concentración del desinfectante, las características químicas y físicas del agua a tratar y la temperatura y dentro de los biológicos, el tipo de microorganismos y la edad de estos.

El tiempo de contacto es el tiempo necesario en que el agua a tratar y el agente desinfectante deben estar en contacto para que la eliminación de los microorganismos patógenos pueda llevarse a cabo y es utilizado para calcular la cantidad de desinfectante necesario en el tratamiento.

La concentración total de agente desinfectante necesaria en el agua es igual a la concentración necesaria para satisfacer la demanda de agente desinfectante en función de las propiedades del agua y la concentración necesaria de desinfectante residual. Además, la concentración residual se tiene que mantener el tiempo de contacto necesario para matar los microorganismos patógenos. Por lo tanto para una desinfección efectiva es necesario suministrar una concentración mayor de desinfectante que la meramente requerida para matar los microorganismos patógenos (Gómez & Payán, 2008).

Las características químicas y físicas del agua influyen en la desinfección, hay sustancias presentes en el agua a tratar que reaccionan con los agentes desinfectantes, como el hierro, manganeso, sulfuro de hidrogeno y nitratos y esto supone un impedimento para la desinfección.

La temperatura influye en la velocidad de la reacción química que ocurre entre el agua sanitaria y el agente desinfectante. En las zonas tropicales la temperatura es más elevada y su aumento produce un incremento en la velocidad de las reacciones y, por lo tanto, en la desinfección. También puede provocar la volatilización o inactivación del agente desinfectante en dependencia de sus propiedades.

La influencia del tipo de microorganismos se debe a que hay microorganismos más resistentes que otros, por ejemplo la bacteria *E.coli* es más resistente a los desinfectantes que otras bacterias, por lo cual es utilizada como organismo indicador.

La edad de los microorganismos: Las bacterias jóvenes son más fáciles de matar que las más adultas. Esto es debido a que las bacterias desarrollan una capa protectora de polisacáridos en la pared celular que las hace más resistentes a los desinfectantes.

### **1.5.2. Métodos de desinfección**

La desinfección del agua puede llevarse a cabo por procesos químicos o físicos. Cada uno de ellos tiene sus ventajas y sus desventajas y se emplean uno u otro método según sean las circunstancias. Los métodos químicos incluyen el empleo de sustancias con propiedades desinfectantes como el cloro, bromo o yodo y sus respectivos derivados, peróxido de hidrógeno, sales metálicas, ácidos o álcalis y el ozono. Dentro de los métodos físicos se encuentra la radiación ultravioleta y el uso de calor. La cloración, la radiación ultravioleta y el ozono son los más empleados entre los distintos métodos para la desinfección.

La cloración es la más empleada entre estos tres principales debido a las ventajas que presenta. Tiene efecto residual, es de fácil aplicación y bajo costo comparada con el resto de las tecnologías, requiere cortos periodos de contacto, es muy efectivo contra bacterias y virus y la operación y mantenimiento de equipos es simple. Aunque también tiene desventajas a tener en cuenta, puede agregar sabor, olor y color al agua, su capacidad desinfectante en aguas con pH mayores a 7,5 es baja, requiere cuidadoso almacenamiento y manipulación, es altamente corrosivo, puede generar subproductos peligrosos para la salud (trihalometanos y compuestos orgánicos halogenados y no halogenados) y no es efectivo

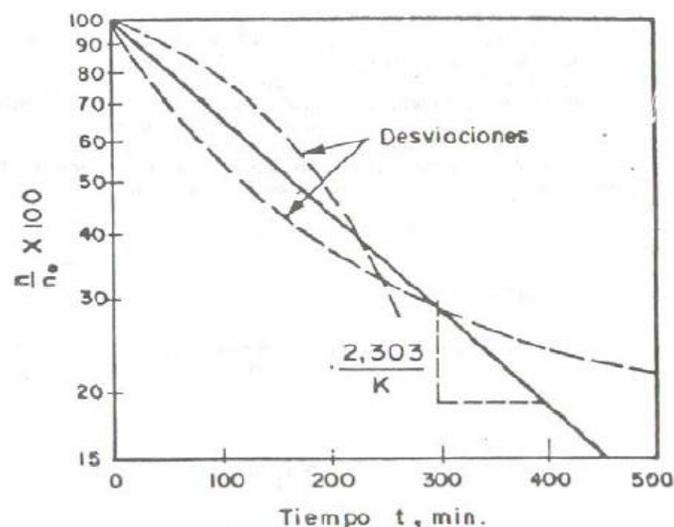
para remover huevos y quistes de parásitos. (Programa de Agua Potable y Alcantarillado (PROAGUA), 2017)

El empleo de ozono es el método de desinfección más frecuentemente empleado después de la cloración. Sus principales ventajas son su tiempos de contacto, mucho menores que el del cloro y su capacidad de desinfección que no depende del pH. Como desventaja se encuentran su alto costo respecto al cloro, no tiene efecto residual, tiene una baja vida media en el agua, menor de 30 minutos, requiere equipos especializados y energía para su aplicación y el mantenimiento de equipos es complicado.

La radiación ultravioleta es la menos empleada de las tres, es capaz de destruir ADN de bacterias y virus, no requiere de tiempos de contacto altos, no altera las características del agua y su aplicación es sencilla y de bajo costo; pero no tiene efecto residual, el mantenimiento de las lámparas requiere personal calificado, necesita energía eléctrica para su aplicación y su eficacia puede disminuir en aguas turbias o con color.

### 1.5.3 Cinética de la desinfección. La ley de Chick

La desinfección del agua no ocurre de forma instantánea, esta se realiza a una cierta velocidad que está determinada por tres factores, el tiempo de contacto, la concentración del desinfectante y de la temperatura del agua. Bajo condiciones ideales, una célula expuesta contiene un solo centro activo, vulnerable a una sola unidad de desinfectante. En este caso la velocidad de destrucción sigue la Ley de Chick representada en la Figura 1.9 (Barreiro & Ghislieri, 2011).



**Figura 1.9.** Representación gráfica de la Ley de Chick. **Fuente.** (Arboleda, 2000)

La ley establece que  $y$ , número de organismos destruidos en la unidad de tiempo  $t$ , es proporcional a  $N$ , número de organismos remanentes, siendo  $N_0$ , el número de organismos iniciales como muestra la Ecuación 1.1:

$$-\frac{dy}{dt} = k(N_0 - y) \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde  $k$  es la constante de velocidad de la reacción en unidades de tiempo<sup>-1</sup>.

Integrando la Ecuación 1.1 desde  $y = 0$  a  $t = 0$  e  $y = y$  a  $t = t$  se llega a las Ecuaciones 1.2 y 1.3:

$$\ln \left[ \frac{(N_0 - y)}{N_0} \right] = \ln \left( \frac{N}{N_0} \right) = -kt \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kt} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

El valor de  $t$  se calcularía por la Ecuación 1.4:

$$t = \frac{-2,303}{K} \log \frac{N}{N_0} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Las ecuaciones anteriores se cumplen en condiciones ideales, para condiciones no ideales la ley toma la forma de la Ecuación 1.5:

$$\ln \left( \frac{N}{N_0} \right) = -k^m t \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde  $m$  es una constante que depende del tipo de microorganismo, se obtiene empíricamente y está tabulada para diferentes tipos de microorganismos.

El comportamiento de la desinfección para distintas concentraciones de desinfectante se puede expresar a través de la Ecuación 1.6:

$$C^n * t_p = cte \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde  $C$  es la concentración del desinfectante y  $t_p$  es el tiempo necesario para lograr la muerte de los microorganismos, generalmente de toma a un 99 % de eliminación (Barreiro & Ghislieri, 2011).

#### **1.5.4. Cloración como método de desinfección**

(Christman, 2002) señala que “la cloración ha desempeñado una función crítica al proteger los sistemas de abastecimiento de agua potable de las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua durante casi un siglo. Se ha reconocido ampliamente a la cloración del agua potable como uno de los avances más significativos en la protección de la salud

pública. Desde hace 90 años, la cloración desempeña una función trascendental en la protección de los sistemas de abastecimiento de agua potable contra enfermedades infecciosas transmitidas por el agua”. Ciertamente la cloración no es el único método que existe para tratar los organismos patógenos presentes en el agua, pero sus características lo hacen un sistema de tratamiento ampliamente empleado.

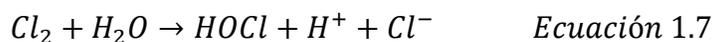
Según (Pérez & Espigares, 1995) la cloración es el procedimiento más extendido en la desinfección de aguas de consumo en razón a que el cloro reúne la mayoría de las propiedades del "desinfectante ideal". Entiéndase como desinfectante ideal a que el cloro reúne las propiedades expuestas por (Barreiro & Ghislieri, 2011), barato, fácil de aplicar, fácil de dosificar, deja efecto residual, no afecta a formas superiores de vida en las concentraciones en que es mortal para todo tipo de microorganismo, actúa en un amplio grado de temperatura y de pH (aunque a determinados pH la especie presente pueda tener más poder desinfectante que a otros pH).

El objetivo de la cloración es destruir los microorganismos presentes en el agua mediante la acción germicida de los compuestos clorados. Además, tiene otros efectos como la oxidación de sustancias inorgánicas reducidas (hierro, manganeso y sulfuros) y la destrucción de compuestos que producen olor y sabor. Dentro de los compuestos clorados que se pueden emplear en la desinfección se encuentran el gas cloro licuado, cloro líquido, las soluciones de hipoclorito sódico o gránulos de hipoclorito cálcico.

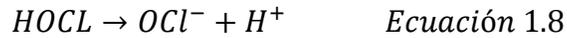
Un inconveniente del cloro es su capacidad de reaccionar con materia orgánica natural y producir trihalometanos y otros SPD halogenados. No obstante, la formación de subproductos puede controlarse optimizando el sistema de tratamiento. (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2006)

#### **1.5.4.1. Química de la cloración**

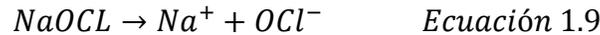
(Gómez & Payán, 2008) establecen de forma sencilla como el cloro elemental gaseoso y el líquido reaccionan con el agua a través de las Ecuaciones 1.7 a 1.10. Cuando se añade cloro al agua químicamente pura se forma una mezcla de ácido hipocloroso (HOCl) y ácido clorhídrico (HCl):



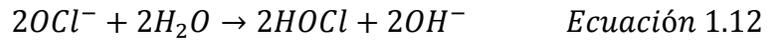
Posteriormente el ácido hipocloroso se ioniza formando el ion hipoclorito como muestra la Ecuación 1.8:



Si se dosifica hipoclorito de sodio se obtienen las Ecuación 1.9 y 1.10:



Si se dosifica hipoclorito cálcico se obtienen las Ecuación 1.11 y 1.12:



Como puede observarse en la Ecuación 1.7, al adicionar cloro al agua bajará su su pH producto a la formación de los iones hidrógeno que se producen en las reacciones con el agua.

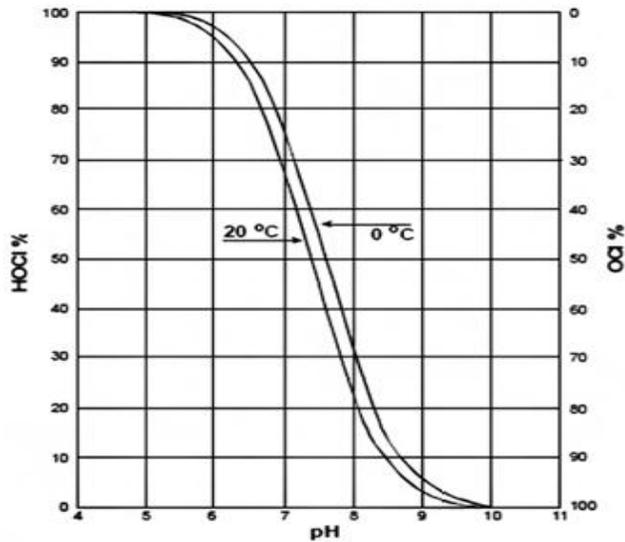
En la Ecuación 1.8 se observa que la disociación del ácido hipocloroso depende de la concentración de ion hidrógeno. A pH bajo la disociación del HOCl se inhibe, a pH igual a 6 o menor el residual es predominantemente HOCl, a pH igual a 7,7 los residuales de HOCl y OCl<sup>-</sup> son aproximadamente similares y a pH igual o mayor que 9,0 casi todo el residual es OCl<sup>-</sup>.

En el caso de las Ecuaciones 1.9 a la 1.12 se presentará un incremento de alcalinidad, dependiente de la magnitud con que el OCl<sup>-</sup> reaccione con el agua.

La suma de HOCl y OCl<sup>-</sup> se llama cloro libre residual y es el desinfectante primario empleado. El HOCl es el desinfectante más efectivo; como lo expresa la Ecuación 1.7, se produce en una relación uno a uno con la adición de Cl<sub>2</sub> junto con una reducción de pH que limita la conversión a OCl<sup>-</sup> (Ecuación 1.8) (César Valdez & Vázquez González, 2003).

La única, pero importante diferencia entre el uso de cloro, hipoclorito de sodio o hipoclorito cálcico es el pH resultante y por tanto las cantidades relativas de HO Cl y de OCl<sup>-</sup> existentes en el equilibrio. El cloro tiende a disminuir el pH inicial, mientras que los hipocloritos tienden a aumentarlo.

La desinfección es más eficiente a niveles de pH bajos debido a que favorece la formación de ácido hipocloroso, un agente alrededor de 80 veces más eficaz que el ión hipoclorito. El ión hipoclorito predomina en un pH mayor de 7,5, mientras que el ácido hipocloroso predomina en pH menores de 7,5 (Manual de tratamientos del agua de consumo humano, 2009). En la Figura 1.10 se ve representado en una gráfica los porcentos relativos de ión hipoclorito y ácido hipocloroso con respecto al pH.

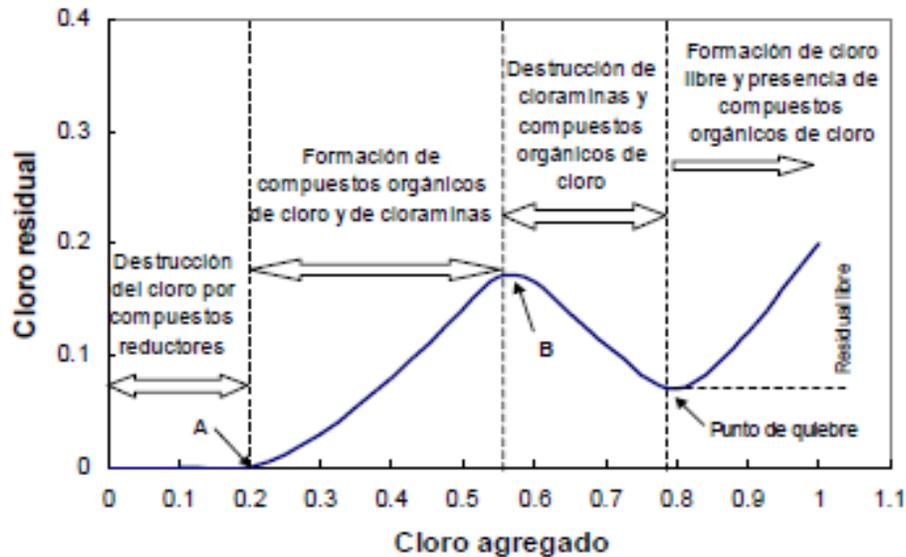


**Figura 1.10.** Cantidades relativas de ácido hipocloroso e ión hipoclorito en función del pH. **Fuente.** (Junta de Castilla y León. Consejería de Sanidad, 2009)

#### 1.5.5. Demanda de cloro. Cloro residual

La dosis de cloro requerida para la desinfección depende del gasto de agua a tratar, el tiempo de contacto adecuado para hacer efecto, la cantidad de cloro residual especificada y la demanda de cloro necesario (César & Vázquez, 2003).

Si se le añade al agua una cantidad muy pequeña de cloro, este reaccionará con las sustancias disueltas o suspendidas en el agua que son fácilmente oxidables, como el hierro y manganeso, anulando su poder desinfectante. Si se agrega la cantidad suficiente para que reaccione con estos compuestos y luego se continúa añadiendo, reaccionará entonces con la materia orgánica presente y el amoníaco formando compuestos orgánicos clorados, los cuales tienen un bajo o ningún poder desinfectante. Si se continúa agregando cloro de tal forma que reaccione con todos los compuestos anteriores, la cantidad añadida después de este punto es el cloro residual, que es el que actúa como agente desinfectante. En la Figura 1.11 se representa mediante una gráfica la explicación anterior, la gráfica en cuestión se conoce como “Curva de demanda de cloro”.

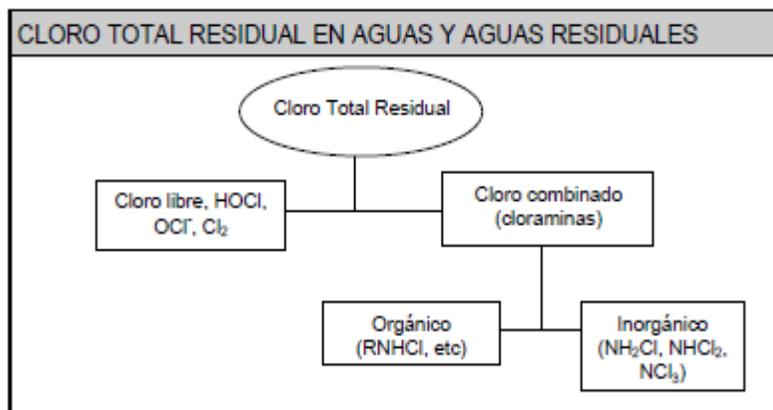


**Figura 1.11.** Curva de demanda de cloro. **Fuente.** (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007)

La primera parte de la gráfica representa el momento en que el cloro reacciona con las sustancias fácilmente oxidables. Del punto A al B ocurren las reacciones con los compuestos orgánicos, al seguir aumentando la dosis, los compuestos formados a partir de amoníaco y sustancias orgánicas con el cloro se reducen hasta llegar al punto mínimo de la curva, el cual se conoce como “punto crítico” o “break point”. A partir de aquí el cloro libre disponible comienza a aumentar. Se recomienda emplear en la desinfección una dosificación de cloro que supere el breaking point, de esta forma se garantiza que en el agua halla presente una concentración de cloro residual suficiente para eliminar los microorganismos patógenos.

### 1.5.6. Formación de subproductos

El agua sanitaria a tratar contiene materia orgánica y otros compuestos que al reaccionar con el cloro forman subproductos. Los principales subproductos de la cloración incluyen trihalometanos, ácidos acéticos halogenados y cloraminas. Estos subproductos se pueden ver representados en la Figura 1.12.



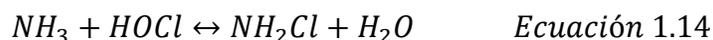
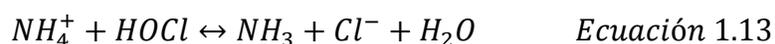
**Figura 1.12.** Especies que conforman el cloro total residual. **Fuente.** (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007)

Los trihalometanos son un grupo de compuestos orgánicos derivados del metano en cuya molécula tres de los átomos de hidrógeno son sustituidos por halógenos. Los principales trihalometanos que se forman son el cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), bromodichlorometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ), dibromoclorometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) y bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ ).

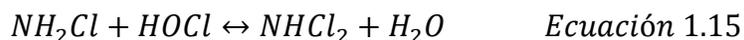
Los ácidos acéticos halogenados son los más abundantes después de los trihalometanos. Dentro de ellos se encuentran los ácidos cloroacético, dicloroacético, tricloroacético, bromoacético, dibromoacético, tribromoacético, bromocloroacético, dibromocloroacético y bromodichloroacético (Reyes López, 2016).

Las cloraminas son derivados del amoníaco que se forman al sustituir uno, dos o tres átomos de hidrógeno por átomos de cloro, dando como resultado monoclорamina, dicloramina y tricloramina. La formación de estos compuestos se ve representada en las Ecuaciones 1.13 a 1.16.

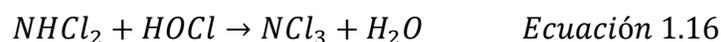
La primera en producirse es la monoclорamina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), como muestran las Ecuaciones 1.13 y 1.14:



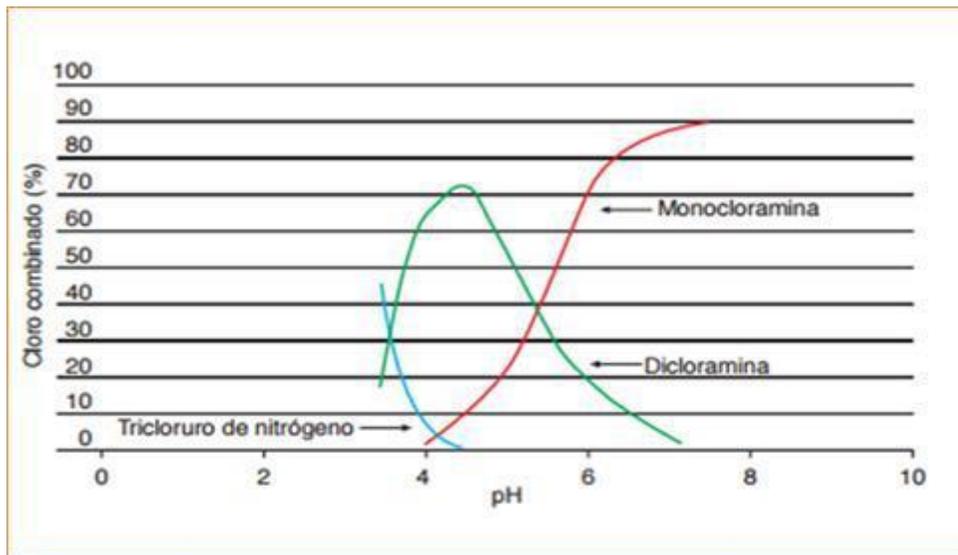
Cuando se agrega más cloro que el requerido para convertir completamente el amoníaco en monoclорaminas, se producen las dicloraminas como muestra la Ecuación 1.15:



Si se sigue agregando cloro se forma la tricloroamina (Ecuación 1.16):



La formación de una cloramina específica así como la velocidad de reacción, dependen del pH del agua, la temperatura y la relación de cloro/amoníaco. En la Figura 1.13 se muestra la relación entre las diferentes especies de cloraminas en función del pH. A pH superior a 7 y una relación molar de cloro/amoníaco igual a 1 o menor, predominará la formación de monocloramina, la dicloramina se alcanza a pH de 4,5 (Reyes, 2016).



**Figura 1.13.** Relación de la formación de cloraminas con respecto al pH. **Fuente.** (Reyes, 2016)

### 1.6. Indicadores Técnicos Económicos

A la hora de ejecutar cualquier proyecto de inversión la evaluación económica es uno de los análisis fundamentales a realizar. Todo proyecto ingenieril requiere la utilización de productos, equipos y procesos que, en general, conllevan altos costos. Los recursos con los que cuentan las empresas tienden a ser escasos o limitados, por lo que se hace indispensable saber con claridad cuánto es necesario invertir y en qué invertir. Con el objetivo de minimizar los costos se optimizan los procesos y se escogen los equipos más adecuados para llevar a cabo el trabajo necesario, teniendo en cuenta no solo costos, sino disponibilidad de los recursos necesarios. Para saber si el proceso que se quiere implementar es económicamente factible, existen indicadores técnicos económicos que evalúan y determinan si el proyecto es conveniente.

La evaluación económica es realizada mediante los indicadores dinámicos de rentabilidad e incluye la estimación del costo total de un proyecto y la rentabilidad de la inversión. Los indicadores dinámicos más empleados en una evaluación económica son el Valor Actual

Neto (VAN), el Período de Recuperación de la Inversión (PRI) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) y serán tratados con más profundidad más adelante en este capítulo.

El costo total de un proyecto es igual a la suma de los costos de inversión y los costos de explotación. Entiéndase por costo de inversión a los costos del terreno, construcción, compra de equipos, montaje, licencias, patentes y transporte y por costo de explotación a los que involucran el personal, suministro de materias primas, suministro de energía, agua y sustancias auxiliares, mantenimiento y administración (Guía del análisis costes - beneficios de los proyectos de inversión, 2003). Además se incluye dentro del costo de un proyecto la depreciación y dentro del costo de inversión la ganancia económica.

Los equipos, edificios y construcciones que componen una determinada planta necesitan una inversión inicial. Con el objetivo de cancelar este costo inicial, se asume un valor de disminución del valor del equipo o material en el tiempo durante su vida útil. A este valor se le conoce como depreciación (S. Peters & D. Timmerhaus, 1991). Para calcular la depreciación se emplea la Ecuación 1.17 donde  $D$  es la depreciación,  $V_0$  es el valor económico inicial de la planta, equipo o material,  $V_f$  el valor al final de su vida útil y  $td$  el plazo de vida útil.

$$D = \frac{V_0 - V_f}{td} CP \quad \text{Ecuación 1.17}$$

La ganancia económica ( $G$ ) es la diferencia existente entre el dinero obtenido en la venta ( $V$ ) y los costos de producción ( $CP$ ). Matemáticamente queda expresada como lo indica la Ecuación 1.18:

$$G = V - CP \quad \text{Ecuación 1.18}$$

### **1.6.1. Flujo de Cajas e Indicadores Dinámicos de Rentabilidad**

El flujo de cajas (FC) es la acumulación neta de activos líquidos en un período de tiempo, o sea, los flujos de entrada y salida de efectivo de una empresa en un determinado período de tiempo. La entrada de puede darse en forma de préstamos, acciones, bonos, entre otras fuentes incluyendo el efectivo obtenido del proceso. La salida está dada por el pago de las deudas, inversiones, operaciones industriales, entre otros. Es empleado para determinar los valores del Valor Actual Neto y de la Tasa Interna de Retorno.

Los indicadores de rentabilidad nos dan una idea de la conveniencia o rentabilidad de un proyecto. Se utilizan para apoyar la toma de decisión de ejecutar o no un proyecto de inversión. La evaluación económica de un proyecto de inversión cuyos beneficios y costos se distribuyen a lo largo de un período de tiempo en el futuro (desde  $t=0$  hasta  $t=T$ ) consiste en determinar cuál es el valor actualizado (en el momento en el que debe tomarse la decisión) de la suma de dichos beneficios menos los costos. Esto es lo que se denomina Valor Actual Neto (VAN), también conocido como Valor Presente Neto (VPN). Se calcula como está expresado en la Ecuación 1.19:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{F_{Ci}}{(1+D)^i} - I_0 \quad \text{Ecuación 1.19}$$

Donde  $I$  es la inversión total del proyecto,  $F_{Ci}$  es el flujo neto de caja del proyecto para el año  $i$ ,  $D$  es la tasa de descuento,  $n$  es la vida útil de la instalación expresada en años e  $i$  son los años de inversión. Normalmente si el valor del VAN es mayor o igual a cero, se lleva a cabo la inversión y si es menor que cero se rechaza.

El Período de Recuperación de la Inversión (PRI) es el período de tiempo que se necesita para recuperar la inversión inicial, o sea, el desembolso neto inicial de caja. Este se expresa matemáticamente a través de la ecuación 1.20, donde  $I$  es la inversión inicial, en caso de ser solo un equipo se refiere a su costo o en caso de ser una planta, al de esta completamente,  $VP$  es el valor de la producción y  $CP$  el costo de la producción.

$$PRI = \frac{I}{VP - CP} \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Cuando los flujos netos de caja son constantes, el PRI quedaría como muestra la Ecuación 1.21.

$$PRI = \frac{I}{FC} \quad \text{Ecuación 1.21}$$

Para llevar a cabo el proyecto su PRI debe ser menor o igual a un período de pago límite arbitrariamente fijado por la empresa o seleccionado por referencia a inversiones similares. En caso de compararse varias alternativas para la inversión generalmente se selecciona la que menor PRI tenga.

La Tasa Interna de Retorno (TIR), es la tasa de descuento a la cual los beneficios y costos, presentes y futuros de un proyecto, se igualan, es decir el VAN es igual a cero, o sea que representa el porcentaje o tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una

inversión, de forma tal que al finalizar el período de evaluación o vida útil, el saldo no recuperado sea igual a cero. Este indicador da una idea del rendimiento del capital invertido. Se expresa matemáticamente por la Ecuación 1.22 y la inversión que represente la mayor TIR será la más rentable.

$$-I + \sum_{i=1}^n \frac{F_{c_i}}{(1 + D)^i} = 0 \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Estos indicadores son analizados en conjunto para determinar la rentabilidad de la inversión y permiten determinar en qué tiempo es posible recuperar la inversión, además de las ganancias que generará. Si al analizar estos indicadores el resultado no es factible, no se recomienda proseguir con la inversión. Hay casos donde se continúa con el proyecto porque satisface una necesidad que no es económica, como es el caso de una inversión para el tratamiento de residuales antes de verterlos al medio, evitando dañar el ecosistema.

# CAPÍTULO II

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se analizaron las características del objeto de estudio: ubicación geográfica y particularidades del sistema tecnológico. Posteriormente, se describieron los pasos empleados para conducir la evaluación de la entidad. Se realizó un diseño de experimento para determinar la cantidad óptima de cloro a emplear en la desinfección, el tiempo de retención necesario y las características del sistema de desinfección. Por último, se definieron los precios del hipoclorito y el equipamiento.

### **2.1. Caracterización del objeto de estudio**

#### **2.1.1. Localización geográfica**

La Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos, perteneciente a la Unión Nacional Eléctrica del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) fue creada por la Resolución No. 78 del Ministro de la Industria Básica.

La CTE “Carlos Manuel de Céspedes” es una de las mayores y más importantes plantas productoras de energía eléctrica con que cuenta nuestro país, muy cercana al litoral de la bahía, se localiza en los 22° 09’30’’ de Latitud Norte y los 80° 22’20’’ de Longitud Oeste, ocupando áreas de la Llanura de Cienfuegos, la cual se extiende por toda la porción centro-sur de la provincia, y se sirve de las aguas del lóbulo noreste de la bahía de Jagua para su sistema de enfriamiento.

Se encuentra situada en la zona industrial de la ciudad de Cienfuegos, específicamente en el Consejo Popular Pastorita - O´Bourke; teniendo como colindantes: por el norte, el Instituto Politécnico “5 de Septiembre”, por el este, la Empresa de Mantenimiento de Centrales Eléctricas (EMCE), por el sur, la Bahía, y por el oeste, las viviendas de la Draga (Fig. 2.1).

El proceso productivo cuenta con dos unidades generadoras, puestas en operación comercial en los años 1978 y 1979, con una capacidad nominal de 158 MW cada una, la unidad CMC-4 recientemente modernizada, muestra importantes indicadores productivos, y la unidad CMC-3 actualmente de reparación capital. La entidad cuenta con 421 trabajadores según la nómina al final del año 2017.

### **2.1.2. Política de gestión**

La Empresa Termoeléctrica Cienfuegos se consolida como la termoeléctrica más rentable y eficaz en el ámbito nacional, exhibiendo indicadores técnico-productivos de primer nivel mundial, comprometida su alta dirección en desarrollar un Sistema Integrado de Gestión Empresarial que abarque las normas NC-ISO 9001, para brindar el servicio de generación de energía eléctrica; mediante una explotación de sus instalaciones que satisfaga los requisitos del Cliente, con la responsabilidad de cumplir con los requerimientos estatales y regulatorios aplicables, monitoreados por la organización a partir de una adecuada planificación, encaminados a la prevención de la contaminación de los impactos ambientales que provocan sus procesos, según la norma NC-ISO 14001; propiciando condiciones de seguridad y control para el logro de la eliminación o disminución de los riesgos inherentes a los trabajadores y bienes inmuebles, según la norma NC-18001; potenciando el control y el desempeño energético en la utilización de la energía, según la norma NC-ISO 50001; usando mediciones confiables, según la norma NC-ISO 10012, en un clima laboral que permite el desarrollo de la Innovación y del Capital Humano, constituyendo el autocontrol sistemático la base para la mejora continua del Sistema de Gestión.

#### **2.1.2.1. Misión**

Generar y suministrar energía eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional, para garantizar la satisfacción de los requerimientos y necesidades crecientes de nuestro cliente, con un alto nivel de profesionalidad y cultura en la gestión de seguridad y salud de sus trabajadores, garantizando el necesario equilibrio con el entorno y el medio ambiente.

#### **2.1.2.2. Visión**

Consolidar la entidad como la termoeléctrica más eficiente y eficaz en el ámbito nacional, alcanzando indicadores técnico-productivos de primer nivel mundial, manteniendo y priorizando la cultura en la gestión de seguridad, salud y medio ambiente, sobre sólidos valores y un alto sentido de pertenencia de los trabajadores, caracterizado, además, por una elevada gestión de los recursos humanos.

La Empresa Termoeléctrica Cienfuegos tiene como OBJETO EMPRESARIAL aprobado la Generación de la Energía Eléctrica, el cual entró en vigor mediante la Resolución No 233 de fecha 27 de abril de 2006 del Ministerio Economía y Planificación.

Actualmente cuenta con recursos humanos, medios e instalaciones que permiten cumplimentar este objeto y con las potencialidades necesarias para ampliar el alcance de nuestras acciones a nuevas actividades por lo que el Objeto Empresarial es el siguiente:

- Generar y suministrar energía eléctrica al sistema eléctrico nacional, en pesos cubanos.
- Prestar servicios de consultoría en dirección y planificación de mantenimiento industrial, en pesos cubanos.
- Realizar estudios de diagnóstico industrial, calderas y equipos rotatorios, en pesos cubanos.
- Brindar servicios técnicos, de reparación y mantenimiento a equipos estáticos y rotatorios, así como electrónicos, de comunicaciones y de automática, en pesos cubanos.
- Realizar la comercialización mayorista del excedente de agua desmineralizada, vapor e hidrógeno, así como escoria residual de las calderas y residuales de la producción de agua desmineralizada, en pesos cubanos.
- Prestar servicios de calibración de equipos de medición, en pesos cubanos y pesos convertibles, al costo.
- Prestar servicios técnicos especializados de mecánica, eléctrica y automática, en pesos cubanos.
- Prestar servicios técnicos químicos especializados, en pesos cubanos.
- Comercializar de forma mayorista productos ociosos o de lento movimiento, en pesos cubanos.
- Comercializar de forma mayorista chatarra al Sistema de la Unión de Empresas de Recuperación de Materias Primas, en pesos cubanos y pesos convertibles.
- Prestar servicios de transportación de carga por vía automotor, en pesos cubanos.
- Brindar servicios de alimentación a sus trabajadores y de otras entidades que participen en la Modernización, Reparación y Mantenimiento a las Unidades Generadoras en pesos cubanos.

### **2.1.3. Características del esquema tecnológico actual**

La empresa tiene instalada una fosa séptica de 44 m<sup>3</sup> que realiza un tratamiento primario al agua sanitaria. Los elementos básicos de una fosa séptica son: el tanque séptico y el campo de oxidación. En el primero se sedimentan los lodos y se estabiliza la materia orgánica mediante la acción de bacterias anaerobias, en el segundo las aguas se oxidan y se eliminan por infiltración en el suelo.

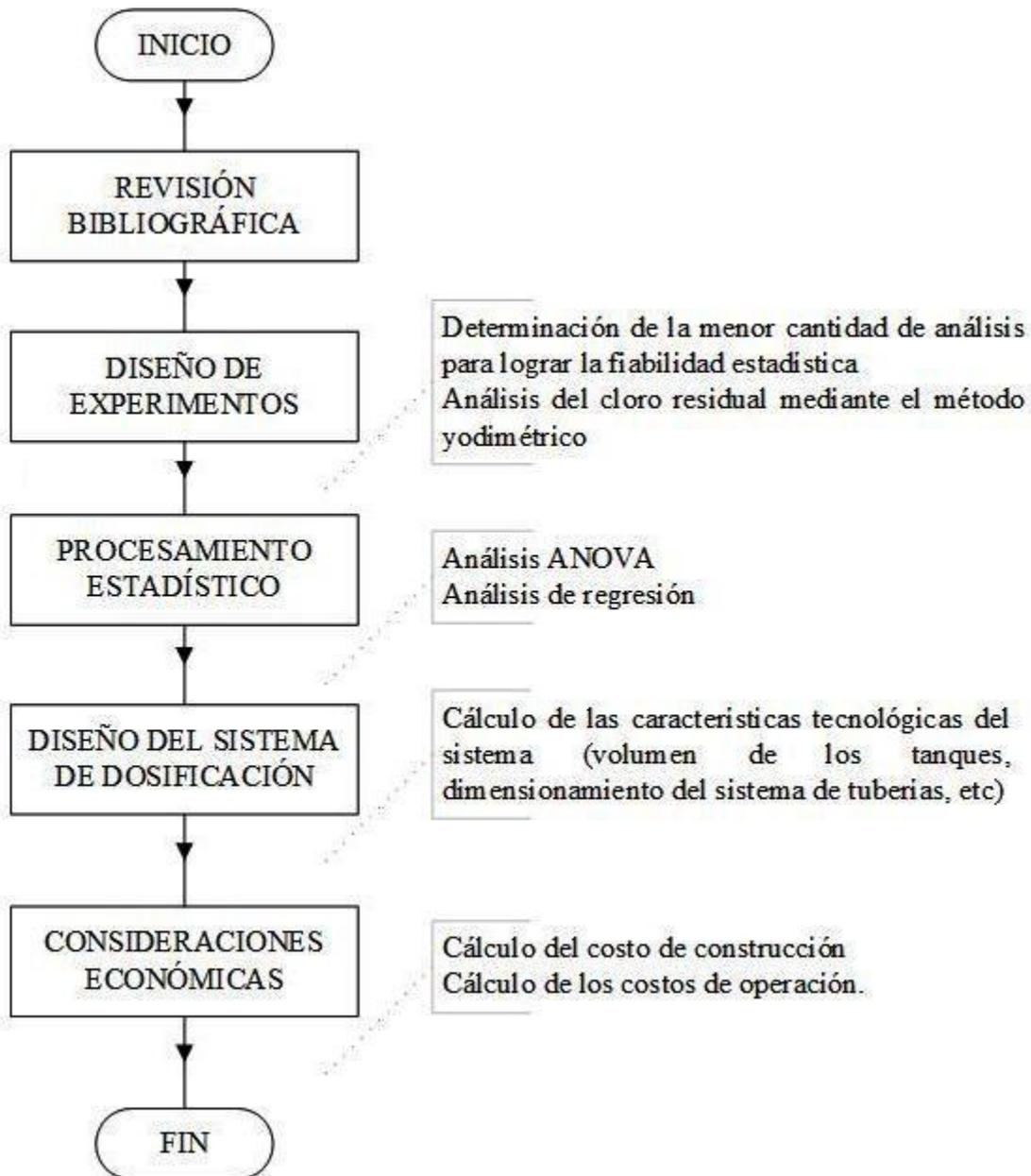
La fosa está compartimentada de forma tal que dentro existe una situación de estabilidad hidráulica, en una sección se realiza la digestión y en otra la decantación. Los sólidos sedimentables que se encuentren en el agua residual cruda forman una capa de lodo en el fondo del tanque séptico. La materia orgánica contenida en las capas de lodo y espuma es descompuesta por bacterias anaerobias y una parte considerable de ella se convierte en agua y gases más estables como dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno. Los sólidos se sedimentan y asciende la materia flotante, ambos permanecen dentro de la fosa en un proceso de descomposición anaeróbica. El efluente a la salida de la fosa séptica es anaerobio, está libre de sólidos y materia flotante, pero contiene un número elevado de agentes patógenos.

A pesar de que se cuenta con un primer tratamiento, este no es suficiente para que el agua vertida a la bahía cumpla con lo establecido en la norma con respecto a los coliformes fecales. Cuando se previó el montaje de la termoeléctrica, los planos incluían un sistema de cloración además de la fosa séptica, pero nunca se instaló. Al no ser factibles el resto de sistemas de tratamiento y al ser la desinfección con cloro uno de los métodos más usados en el tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos, se propondrá el diseño de un sistema de cloración a continuación de la fosa séptica como tratamiento para el agua sanitaria de la empresa.

### **2.2. Metodología de la investigación**

El diseño del sistema de dosificación se realizó siguiendo la metodología expuesta en la Figura 2.1. Se comenzó con un diseño de experimento, donde se analizó el cloro residual a distintas muestras del agua sanitaria a tratar después de añadirle hipoclorito a diferentes concentraciones. Los datos obtenidos de los análisis fueron procesados estadísticamente a través de un análisis de Regresión Simple en el Software Statgraphics Centurion XV, para

determinar la dosificación óptima. Con el valor de la dosificación óptima de hipoclorito, se diseñaron los tanques de retención con sus respectivas características y se seleccionaron las válvulas, tubería y accesorios necesarios. Para finalizar se calcularon los costos asociados al equipamiento y al consumo de reactivos y se trazó la planificación de las actividades para la construcción del sistema mediante el Microsoft Project.



**Figura 2.1.** Algoritmo seguido durante la investigación. **Fuente.** Elaboración propia

Hay que destacar que un sistema de tratamiento de aguas residuales para que sea sostenible y apropiado, tiene que tener una mínima utilización de recursos, incluyendo la

disponibilidad del espacio, y generación de residuos, ser de bajo coste y al mismo tiempo tiene que ser aceptado positivamente por la población a la que sirve.

Para el tratamiento del agua sanitaria de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos se propuso el uso de un sistema de cloración. El agua podría ser tratada por otros métodos de tratamiento expuestos en el capítulo anterior, pero por las condiciones de espacio y flujo a tratar, la opción más viable es la desinfección. Las lagunas de oxidación ocuparían mucho espacio, además de que generan malos olores. No es recomendable el uso de un filtro percolador, ya que el flujo de agua a tratar es relativamente bajo, por lo que hasta el filtro percolador de menor tamaño quedaría con sobrediseño y tampoco se dispone de un área lo suficientemente amplia para su instalación. Este es el mismo problema que se tendría si se decidiera emplear un reactor UASB o lodos activados. La cavitación a pesar de que en este caso sería una alternativa viable, para que se produzca a la salida de la tubería de descarga, se requiere una altura mayor de la que se dispone, ya que se encuentra a nivel de suelo y muy próxima al nivel del mar, que es donde se descarga y la altura disponible no es la suficiente para que se produzca este fenómeno.

### **2.3. Diseño de Experimento**

Para determinar la dosis de cloro necesaria para lograr una concentración de 2 g de cloro activo por m<sup>3</sup> de agua (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2013), se le realizaron experimentos al agua sanitaria de la Termoeléctrica a la salida de la fosa séptica por 5 días. Se empleó hipoclorito de sodio al 12 % e hipoclorito de calcio al 65 % para una concentración de cloro activo de 4, 6, 8, 10 y 12 mg/L en ambos casos. Se realizó el análisis a estas concentraciones al ser las recomendadas por varias bibliografías (Grupp, 2010) (Reyes, 2016). Se realizaron 6 análisis diarios, para un total de 30 análisis a la semana. Para el análisis del cloro residual se empleó la Técnica del Método Yodimétrico y se calculó teóricamente la cantidad de microorganismos que quedarían en el agua a la salida del tanque de retención luego de estar en contacto con el cloro y el tiempo de retención necesario.

#### **2.3.1. Determinación del tamaño de la muestra**

En la determinación del tamaño de muestra se empleó el libro (Montgomery, 2012).

Para cualquier diseño experimental es importante determinar el tamaño de la muestra. Si se quieren detectar efectos pequeños es necesario realizar más replicas que cuando se quieren detectar efectos grandes. La curva de operación característica es una gráfica de probabilidad de error tipo II de una prueba estadística para un tamaño de muestra particular contra un parámetro que refleja la medida es que la hipótesis nula es falsa. Se pueden usar estas curvas como guías en la selección del número de réplicas para que el diseño sea sensible a diferencias potenciales importantes en los tratamientos.

Si se usa el mismo tamaño de muestra en cada tratamiento se considera el error tipo II del modelo con efectos fijos como muestra la Ecuación 2.1.

$$\beta = 1 - P\{\text{Rechazar } H_0 | H_0 \text{ es falsa}\} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\beta = 1 - P\{F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} | H_0 \text{ es falsa}\}$$

Para evaluar la Ecuación 2.1, es necesario conocer la distribución del estadístico de prueba  $F_0$  si la hipótesis nula es falsa. Puede demostrarse entonces que si  $H_0$  es falsa, el estadístico  $F_0 = MS_{\text{Tratamientos}}/MS_E$  se distribuye como una variable aleatoria F no central con  $a - 1$  y  $N - a$  grados de libertad y parámetros de no centralidad. Si  $\delta = 0$ , la distribución F no central se convierte en la distribución F (central) común. La curva de operación para este caso se puede ver en el Anexo 1. En ella se grafica la probabilidad del error tipo II contra un parámetro  $\Phi$ , que se calcula como se muestra en la Ecuación 2.2.

$$\Phi^2 = \frac{\sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a\sigma^2} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

La cantidad  $\Phi^2$  está relacionada con el parámetro de no centralidad  $\delta$ . Se cuenta con curvas para  $\alpha = 0,05$  y  $\alpha = 0,01$  y un rango de grados de libertad para en numerador y el denominador.

Al usarse estas curvas se debe especificar el parámetro  $\Phi^2$ . Esto es difícil de hacer en la práctica, una manera de determinarlo es elegir los valores reales de las medias de los tratamientos para los que se querría rechazar la hipótesis nula con una alta probabilidad. Un enfoque alternativo es seleccionar un tamaño tal que si la diferencia entre las medias de dos tratamientos cualesquiera excede un valor especificado, la hipótesis nula deberá rechazarse. Si la diferencia entre las medias de dos cualesquiera es tan grande como D, puede demostrarse que el valor mínimo de  $\Phi^2$  se calcula por la Ecuación 2.3.

$$\Phi^2 = \frac{nD^2}{2a\sigma^2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Puesto que este es un valor mínimo de  $\Phi^2$ , el valor que se obtiene de la curva de operación característica proporciona una potencia al menos tan grande como la que especificó el experimentador.

### **2.3.2. Diseño de Experimentos en Statgraphics Centurion XV**

La sección de Diseños de Experimentos en Statgraphics Centurion XV construye y analiza muchos tipos de experimentos. Estos incluyen diseños para investigación, diseños de optimización, experimentos con mezclas, diseño robusto del tipo pionero por Taguchi, diseños D-Óptimos y diseños para estudiar factores categóricos. El programa analiza los datos una vez que se desarrollaron los experimentos, aumentando el diseño si es necesario para la obtención de más información y en la determinación de condiciones óptimas una vez que se tiene el modelo estadístico.

Para asistir en la construcción de un experimento, el menú Diseño de Experimentos proporciona varias selecciones, en caso del presente trabajo, la opción empleada fue Crear Diseño y el tipo de experimento que se desarrolló fue el de Un Solo Factor Categórico.

La documentación de diseños de experimentos utiliza una notación estándar que representa los factores a ser manipulados por la letra X y las variables respuestas por la letra Y. Al diseñar un experimento, un conjunto de n corridas experimentales son construidas en orden para estimar un modelo estadístico de la forma general expresada en la Ecuación 2.4, donde k representa el número de factores experimentales y  $\varepsilon$  representa el error experimental.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) + \varepsilon \quad \text{Ecuación 2.4}$$

En particular se asigna a  $Y_i$  como la respuesta observada sobre la i-ésima corrida experimental, donde  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $X_{ij}$  como el nivel del i-ésimo factor sobre i-ésima corrida experimental, donde  $j = 1, 2, \dots, k$  y  $\varepsilon_i$  como el error experimental sobre la i-ésima corrida experimental. Entonces quedaría expresado como muestra la Ecuación 2.5.

$$Y_i = f(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{ik}) + \varepsilon_i \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde la función f representa la media o valor esperado de la variable respuesta como una función de los factores experimentales. El error experimental  $\varepsilon$  es típicamente asumido que sigue una distribución normal con media 0 y desviación estándar  $\sigma$ , el cual pueden indicarse por  $\varepsilon \sim N(0, \sigma)$ . Si se ha registrado más de una variable de respuesta, se registran los modelos por separado para cada respuesta.

## 2.4. Dosificación de cloro

Retomando lo expuesto en el capítulo anterior, la dosis de cloro necesaria depende del gasto o flujo de agua a tratar, del tiempo de contacto necesario, la cantidad de cloro residual que se requiere para eliminar los microorganismos y la demanda de cloro del proceso.

El cloro empleado en la desinfección se puede encontrar en forma de hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio o cloro líquido. En nuestro país se comercializa hipoclorito de sodio al 12 % e hipoclorito cálcico al 65 %.

Las características del efluente a tratar están representadas en la Tabla 2.1, donde LMPP es el Límite Máximo Permisible Promedio según la norma NC 521:2007. El análisis al agua fue previamente realizado por el CEAC y se trabajará en base a los resultados que ellos obtuvieron.

**Tabla 2.1:** Características del agua sanitaria a tratar. **Fuente:**(CEAC, 2018)

Parámetro	Unidad de medida	Salida de la fosa séptica	Incertidumbre	LMPP
Sólidos Sedimentables	mL/L	<L.C	-	<b>5</b>
Sólidos suspendidos	mg/L	-	-	<b>30</b>
DBO5	mg/L	17,5	± 5,6	<b>30</b>
DQO	mg/L	36,2	± 6,9	<b>75</b>
NTK	mg/L	-	-	-
N-NO3	mg/L	2,08	± 0,30	-
NTK + N-NO3	mg/L	-	-	<b>10</b>
PT	mg/L	0,569	± 0,055	<b>5</b>
pH	u/pH	7,56	± 0,06	<b>5,5-9,0</b>
Temperatura	°C	26,1	± 0,02	<b>40</b>
Coliformes fecales	NMP/100 mL	≥16000	6000	<b>200</b>

El experimento se llevó a cabo con concentraciones de cloro de 4, 6, 8, 10 y 12 g/m<sup>3</sup>.

La dosis que se debe agregar por día se calculó mediante la Ecuación 2.6a, conociendo que el hipoclorito de sodio contiene un 12 % de cloro activo y el de calcio un 65%:

$$W = \frac{Q_v * D}{\%Cl_{act}} \quad \text{Ecuación 2.6 a}$$

Donde W es el hipoclorito de sodio requerido (g/día),  $Q_v$  es el gasto o flujo a tratar (14,4 m<sup>3</sup>/día), D es la dosis de cloro activo (g/m<sup>3</sup>) y %<sub>Clact</sub> es el % de cloro activo contenido en la tableta de hipoclorito.

Al ser un experimento a nivel de laboratorio fue necesario modificar la Ecuación 2.6 a, la dosis no quedaría expresada en g/día sino solamente en mililitros, que es lo que fue necesario conocer para llevar a cabo el experimento, solo la cantidad de hipoclorito a añadir en la muestra dando como resultado la Ecuación 2.6 b, donde V es el volumen y W quedaría expresado solo en gramos, por lo cual decidimos sustituir W por M al ser la masa lo que se calculó.

$$M = \frac{V * D}{\%_{Clact}} \quad \text{Ecuación 2.6 b}$$

El volumen se fijó según la Técnica del Método Yodimétrico, para una demanda de 500 mL de muestra para una concentración de cloro de 1 a 10 g/m<sup>3</sup> y va disminuyendo proporcionalmente para concentraciones de cloro superiores a 10 g/m<sup>3</sup>, la dosis de cloro activo es la concentración de cloro a la que se quiere realizar los experimentos.

#### **2.4.1. Número final de colonias esperado**

El parámetro regulatorio para dosificar la cantidad de cloro necesaria en el proceso de desinfección es el cloro residual. Existen diversos métodos para determinar el cloro residual después de un tratamiento secundario, que van desde métodos experimentales hasta correlaciones teóricas establecidas. Como método experimental se aplicó la técnica del método yodimétrico, se tomó una muestra de agua sanitaria a tratar en la Termoeléctrica durante una semana y en el horario pico, se analizó empleando esta técnica el cloro residual. Como método teórico se empleó la correlación establecida propuesta por Selleck en el año 1978 y modificada por White en el 2000 (Grupp Gutiérrez, 2010).

La correlación establecida propuesta por Selleck en el año 1978 y modificada por White en el 2000 se ve expresada en la Ecuación 2.7:

$$\frac{N}{N_0} = \left[ \frac{C_R t}{b} \right]^{-n} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde  $C_R$  es el cloro residual remanente luego del tiempo t, t es el tiempo de contacto, b es la constante de intercepción y n es la pendiente de inactivación. Varias bibliografías dentro de las cuales podemos citar (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007),

(LeChevallier & Au, 2004), (Reyes, 2016) y (Alianza por el agua, 2008), especifican valores de  $t$ ,  $b$  y  $n$  para el tratamiento de aguas residuales sanitarias. Todos estos autores coinciden en que es necesario un tiempo de contacto de al menos 30 minutos y en los valores de  $b$  igual a 3 y  $n$  entre 3 y 4 para coliformes fecales.

Mediante la Ecuación 2.5 se pudo determinar tanto el tiempo de contacto entre el cloro y el agua residual como los microorganismos que quedarían después de transcurrido este tiempo. Fijando la cantidad de organismos remanentes después de la cloración ( $N$ ) a 200 colonias/ml como establece la norma, podemos calcular el tiempo de contacto necesario. Fijando el tiempo de contacto a 30 minutos como especifican las bibliografías se puede obtener teóricamente la cantidad de organismos remanentes.

#### **2.4.2. Técnica del Método Yodimétrico**

Mediante el método explicado en (Giraldo, 1995), se puede cuantificar el cloro residual total, o sea, el cloro libre más el cloro combinado. Este método es el estándar contra el que se evalúan otros métodos. Se basa en que el cloro libera yodo en soluciones de yoduro de potasio cuando el pH es 8 o menos. El yodo liberado se valora con solución estándar de tiosulfato de sodio empleando almidón como indicador, a pH entre 3 y 4. Pueden detectarse hasta 40  $\mu\text{g/L}$  de cloro con solución 0,01 N y 500 mL de muestra.

Objeto y campo de aplicación:

Este método tiene por objetivo establecer un procedimiento de valoración yodométrica para determinar cloro residual total en cualquier tipo de aguas naturales e industriales cuyo contenido de cloro residual se encuentra preferiblemente por encima de 1mg/L, aunque es un método preciso y se usa como patrón.

#### **Principio del método:**

El cloro residual reacciona con el yoduro de potasio liberando yodo libre en cantidades proporcionales a la existencia de cloro en la muestra.

El yodo liberado se valora con una solución de tiosulfato de sodio, usando como indicador la solución de almidón-

#### **Interferencias:**

El punto final de la valoración puede verse limitado oscurecido por exceso de turbidez o color.

La presencia de materia orgánica y otros halógenos o derivados halogenados afectan la determinación, aunque las dos últimas rara vez aparecen en concentraciones suficientes para introducir un error de importancia.

El hierro III, los nitritos y los óxidos o sales mangánicas interfieren a pH ácido.

**Reactivos:**

1. Ácido acético glacial
2. Yoduro de potasio (KI)
3. Solución estándar de tiosulfato de sodio a 0,01 N
4. Indicador de almidón

**Almacenamiento:**

Es recomendable que las determinaciones de cloro se inicien inmediatamente después del muestreo, evitando el exceso de luz y de agitación, que reducirían el contenido de cloro presente.

**Procedimiento:**

1. Vierta en un erlenmeyer de tamaño apropiado la muestra, para concentraciones de cloro de 1 mg/L emplee 1000 ml de muestra y para concentraciones entre 1 y 10 mg/L, 500 mL de muestra. Agréguele 5 mL de ácido acético para reducir el pH y añada aproximadamente 1 g de KI, mezcle con un agitador de vidrio y espere de 5 a 10 minutos colocando el erlenmeyer en la oscuridad.
2. Valore con la solución de tiosulfato de sodio hasta que el color comience a ser débilmente amarillo. Agregue 1 mL de solución indicadora de almidón y continúe la valoración con el tiosulfato de sodio hasta que desaparezca el color azul.
3. Anote el volumen de tiosulfato consumido y repita la valoración en caso necesario.

**Cálculos:**

$$Cl_2 (mg/L) = \frac{M * N * Peq * 1000}{V_m}$$

Donde M es el volumen consumido de tiosulfato, N la normalidad exacta del tiosulfato, Peq el peso equivalente del cloro (35,45) y  $V_m$  el volumen de la muestra.

## **2.5. Procesamiento Estadístico**

Los resultados de los análisis realizados al agua fueron procesados empleando el Software Statgraphics Centurión, llevándose a cabo un Diseño de Experimentos y se procesaron los resultados mediante un análisis ANOVA y de Regresión Simple.

### **2.5.1. Análisis ANOVA Simple**

Al comparar varias muestras hay dos posibles fuentes de variación, el error en la medida y lo que se denomina factor controlado. En este caso los factores controlados fueron el desinfectante (hipoclorito de sodio e hipoclorito cálcico) y las concentraciones en las que fue realizado el análisis (10, 15, 20, 25 y 30 mg/L). El análisis de la varianza o ANOVA es uno de los más empleados ya que permite la separación de las distintas fuentes de variación. Para utilizar el ANOVA debe cumplirse que cada conjunto de datos sea independiente del resto, deben seguir una distribución normal y las varianzas de cada conjunto no deben diferir de manera significativa.

El procedimiento ANOVA Simple (o de un criterio de clasificación) está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor categórico X sobre una variable dependiente Y. Se realizan pruebas para determinar si hay o no diferencias significativas entre las medias, varianzas y/o medianas de Y en los diferentes niveles de X. Además, los datos se pueden presentar gráficamente de varias formas, incluyendo un gráfico múltiple de dispersión, un gráfico de medias, un gráfico ANOM, y un gráfico de medianas.

En este procedimiento los datos fueron colocados los datos obtenidos en dos columnas en el Statgraphics Centurion XV, una para la variable dependiente Y (resultados del experimento) y una segunda identificando los niveles de X (las concentraciones iniciales). En la opción Mejorar, Análisis de Varianza se selecciona el análisis ANOVA Simple. Para ingresar los datos, Y (resultados del experimento) fue colocada en Variable dependiente (columna numérica que contiene las n observaciones de Y) y X (las concentraciones iniciales) en Factor (columna numérica o no numérica que contiene un identificador para los niveles del factor X).

En el Resumen del Análisis obtenido se muestra el número de niveles de X y el número total de observaciones n.

La ventana Resumen Estadístico calcula un número de diferentes estadísticas que se emplean comúnmente para resumir una muestra de datos de variables, dígame Promedio, Desviación Estándar, Rango, Sesgo Estandarizado y Curtosis Estandarizada. El Sesgo Estandarizado y la Curtosis Estandarizada deben estar entre  $-2$  y  $+2$  si los datos vienen de una distribución normal. En las Opciones de Ventana para el Resumen Estadístico se pueden escoger las estadísticas que se desean conocer del análisis.

La Tabla de Medias presenta la media de cada nivel junto con un intervalo de incertidumbre, el tipo de intervalo depende del escogido en las Opciones de Ventana.

El Gráfico de Medias muestra las medias de los niveles y pueden ser graficadas junto con los intervalos de incertidumbre. Siempre que todos los tamaños muestrales sean los mismos (o casi iguales), se puede determinar qué media es significativamente diferente de cuáles otras empleando el procedimiento LSD, de Tukey, de Scheffe, o de Bonferroni simplemente viendo si un par de intervalos se traslapan o no en dirección vertical. Un par de intervalos que no se traslapan indican una diferencia estadísticamente significativa entre las medias al nivel de confianza elegido.

La Suma de Cuadrados se realizó empleando la Ecuación 2.8 para los entre grupos, la Ecuación 2.9 para los intra grupos y la Ecuación 2.10 para el total. El G.L. se calculó para los entre grupos por la Ecuación 2.11, para los intra grupos por la Ecuación 2.12 y para el total se resta  $n - 1$ . El Cuadrado Medio para los entre grupos fue calculado por la Ecuación 2.13 y para los intra grupos por la Ecuación 2.14. La Razón F fue calculada por la Ecuación 2.15.

$$SC_{entre} = \sum_{j=1}^q n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$SC_{intra} = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$SC_{total} = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$gl_{entre} = q - 1 \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$gl_{intra} = \sum_{j=1}^q (n_j - 1) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$CM_{entre} = \frac{SC_{entre}}{gl_{entre}} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$CM_{intra} = \frac{SC_{intra}}{gl_{intra}} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$F = \frac{CM_{entre}}{CM_{intra}} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

### 2.5.2. Análisis de Regresión Simple

El procedimiento de Regresión Simple está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor cuantitativo X sobre una variable dependiente Y. Cualquiera de los 27 modelos lineales y no lineales pueden ser ajustados usando ya sea el procedimiento de mínimos cuadrados o el procedimiento de estimación resistente. Las pruebas se corren para determinar la significancia estadística del modelo. El modelo ajustado puede ser graficado con límites de confianza y/ o límites de predicción. Los residuos también pueden ser graficados y las observaciones influyentes pueden ser identificadas también. A través de este análisis pudimos ver la correlación existente entre la concentración de cloro inicial y la de cloro residual, obteniéndose la ecuación que las relaciona y su representación gráfica. El modelo se ajustó a la que tenía un valor mayor en la correlación y a partir de aquí se determinó cuál concentración de cloro inicial es la óptima.

Se ingresan los datos donde Y es la columna numérica que contiene las n observaciones para la variable dependiente (resultados del análisis) y X es la columna numérica que contiene los n valores para la variable independiente (concentraciones iniciales del hipoclorito). En la opción Mejorar, Análisis de Regresión, Un Factor se selecciona el análisis Regresión Simple.

El Resumen del Análisis muestra la información acerca del modelo ajustado. Se encuentran incluidos en el resultado Variables y modelo, que es una identificación de las variables de captura y el modelo que fue ajustado, de manera automática, un modelo lineal de la forma representada en la Ecuación 2.16 es ajustado, sin embargo, un modelo diferente puede ser seleccionado usando las Opciones del Análisis.

Los Coeficientes, que muestra los coeficientes estimados, errores estándares, t-estadísticas y P values. Los estimadores de los coeficientes del modelo pueden ser usados para escribir

la ecuación ajustada. La t-estadística prueba la hipótesis nula de que el correspondiente parámetro del modelo es igual a 0, versus la hipótesis alternativa de que no es igual a 0. P-values menores que 0.05, si se opera con un 5% de nivel de significancia, indican que el coeficiente del modelo es significativamente diferente de 0.

El Análisis de Varianza, que es la descomposición de la variabilidad de la variable dependiente Y dentro de un modelo de suma de cuadrados y de suma de cuadrados del error o residuos. Es de particular interés en éste análisis la Prueba F y su P-value asociado para probar la significancia estadística del modelo ajustado. Un P-Value menor a 0.05, si se opera con un nivel de significancia de 5%, indica que la relación estadística de la forma especificada existe entre Y y X.

El Coeficiente de Correlación, que mide el grado de asociación lineal entre Y y X en un rango que va de -1 (perfecta correlación lineal negativa) a +1 (perfecta correlación lineal positiva).

El R – Squared, que representa el porcentaje de la variabilidad en Y que ha sido explicado por el modelo de regresión ajustado en un rango que va de 0 a 100%.

El R – Squared Ajustada, que muestra el estadístico R cuadrado, ajustado por el número de coeficientes en el modelo. Este valor es usado frecuentemente para comparar modelos con diferente número de coeficientes.

El Error Estándar del Estimador, que muestra la desviación estándar estimada de los residuos (las desviaciones alrededor del modelo). Éste modelo es usado para crear límites en las predicciones para nuevas observaciones.

El Error Absoluto Medio, que muestra el valor absoluto promedio de los residuos.

El Estadístico Durbin – Watson, que es una medida de la correlación serial en los residuos. Si los residuos varían aleatoriamente, éste valor puede ser cercano a 2. Un pequeño P-Value indica una tendencia no aleatoria en los residuos. Para unos datos que corren sobre el tiempo, un pequeño P-value podría indicar que alguna tendencia en el tiempo no ha sido tomada en cuenta. En el ejemplo, un pequeño P-value indica que en realidad el modelo lineal no ha tomado en cuenta toda la estructura de los datos, lo cual puede ser visto cuando los residuos son graficados.

El Rezago 1 en la Autocorrelación de los Residuos, que muestra la correlación estimada entre residuos consecutivos en una escala de -1 a 1. Valores lejanos de 0 indican que la estructura importante no ha sido medida o representada por el modelo.

En la ventana de las Opciones del Análisis se puede escoger el modelo matemático que más se ajuste al análisis realizado. Para determinar cuál modelo se ajusta a los datos, el resultado en la ventana Comparación de Modelos Alternativos puede ser útil, porque ajusta y muestra todos los modelos en orden decreciente de sus R – cuadradas. El que mayor valor de R – cuadrada presente es el modelo que más se ajusta al sistema.

La Gráfica del Modelo Ajustado muestra el modelo o modelos ajustados, junto con los límites de confianza y límites de predicción si son requeridos. La gráfica incluye la línea del mejor ajuste o ecuación de predicción, que es la ecuación que debería ser usada para predecir valores de la variable dependiente Y dados los valores de la variable independiente X. Los Intervalos de Confianza para la respuesta media de X, que se refiere a las bandas internas de la gráfica mostrada arriba. Los intervalos internos describen que tan adecuadamente ha sido estimada la ubicación de la línea dada la muestra de datos disponible. Conforme el tamaño de la muestra n incrementa, esas bandas se ajustarán mejor. Es posible notar que la amplitud de las bandas varía como una función de X y la línea estimada se acerca más al valor promedio de  $\bar{x}$ . Los Límites de predicción para nuevas observaciones que son las bandas externas de la gráfica y describen que tan exacta sería una predicción de un nuevo valor. Sin importar el tamaño de la muestra, las observaciones nuevas variarán alrededor de la línea verdadera con una desviación estándar igual a  $\sigma$ . La inclusión de los límites de confianza y los límites de predicción con sus respectivos niveles de confianza está determinada por la tabla ANOVA.

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x \quad \text{Ecuación 2.16}$$

La ventana Comparación de Modelos Alternos muestra los valores de R- cuadrada obtenidos cuando ajustamos cada uno de los 27 modelos matemáticos disponibles. Los modelos están ordenados en orden decreciente de la R-cuadrada. Cuando se selecciona un modelo alternativo, deben considerarse primero los modelos que se encuentran en la parte superior de la lista. Sin embargo, debido a que el estadístico R-cuadrada fue calculado después de transformar X y/o Y, el modelo con el más alto R-cuadrado puede no ser el

mejor modelo. Siempre es recomendable graficar el modelo ajustado para ver si hace un buen trabajo para los datos.

Una vez que el modelo ha sido ajustado, es útil estudiar los residuos para determinar si existe alguna observación atípica que debería ser removida de los datos. La ventana de los Residuos Atípicos muestra todas las observaciones que tienen residuos estudentizados de 2.0 o mayores en valor absoluto. Los residuos estudentizados mayores a 3 en valor absoluto corresponden a puntos mayores a tres desviaciones estándar del modelo ajustado, el cual es un evento extremadamente raro para una distribución normal. Los puntos pueden ser removidos del ajuste mientras se examina la Gráfica del Modelo Ajustado al darle clic en un punto y presionando el botón Excluir/Incluir en la barra de herramientas. Los puntos excluidos están marcados con una X.

Al ajustar un modelo de regresión, no todas las observaciones tienen la misma influencia sobre el parámetro estimado en el modelo ajustado. En una regresión simple, los puntos localizados en niveles muy bajos o muy altos de X tienen una influencia más grande que aquellos localizados más cerca de la media de X. La ventana de Puntos Influyentes muestra cualquier observación que tiene una elevada influencia sobre el modelo ajustado.

La ventana de Valores Predichos crea predicciones usando el modelo ajustado de mínimos cuadrados. La tabla incluye el valor de X (variable independiente con el cual se va a hacer la predicción), las Predicciones Y (valor de predicción de la variable dependiente usando el modelo ajustado), los Límites de Predicción, que predicen los límites para nuevas observaciones al nivel seleccionado de confianza (corresponde a las bandas externas sobre la gráfica del modelo ajustado) y los Límites de Confianza, que son los límites de confianza para el valor de la media de Y al nivel seleccionado de confianza (corresponde a las bandas internas sobre la gráfica del modelo ajustado).

La Tabla de ANOVA calcula la Suma de cuadrados por la Ecuación 2.17, el Error de la suma de cuadrados por la Ecuación 2.18 el Error cuadrado medio por la Ecuación 2.19, el Radio por la Ecuación 2.20, la Bondad de Ajuste por la Ecuación 2.21, el Error Puro por la Ecuación 2.22, el Radio F para Bondad de Ajuste por la Ecuación 2.23, donde c es el número de valores únicos de X.

$$SSR = \hat{\beta}_1^2 S_{xx} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2 \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$MSE = \frac{SSE}{n - 2} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

$$F = \frac{SSR}{MSE} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$SSLOF = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{y}_j - \hat{y}_{ij})^2 \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$$SSPE = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$F = \frac{SSLOF / (c - 2)}{SSPE / (n - c)} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Los Errores Estándar son calculados por las Ecuaciones 2.24 y 2.25.

$$s(\hat{\beta}_0) = \sqrt{MSE \left[ \frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{S_{xx}} \right]} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

$$s(\hat{\beta}_1) = \sqrt{\frac{MSE}{S_{xx}}} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

El Coeficiente de Correlación se calcula por la Ecuación 2.26.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

R – Cuadrada se calcula por la Ecuación 2.27 y la R – Cuadrada Ajustada por la Ecuación 2.28.

$$R^2 = \frac{SSR}{SSR + SSE} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

$$R_{adj}^2 = 100 \left[ 1 - \left( \frac{n - 1}{n - 2} \right) * \frac{SSE}{SSR + SSE} \right] \quad \text{Ecuación 2.28}$$

El Estándar de Estimación se calcula por la Ecuación 2.29.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{MSE} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

El Estadístico Durbin-Watson se calcula por la Ecuación 2.30. Si  $n > 500$  se emplea entonces la Ecuación 2.31 y es comparado con una distribución normal estándar. Para  $100 < n \leq 500$ ,  $D/4$  es comparado con una distribución beta con parámetros como muestra la

Ecuación 2.32. Para tamaños de muestra más pequeños,  $D/4$  es comparado con una distribución beta con parámetros basados en una traza de matrices relacionadas a la matriz  $X$ .

$$D = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

$$D^* = \frac{|D - 2|}{\sqrt{4/n}} \quad \text{Ecuación 2.31}$$

$$\alpha = \beta = \frac{n - 1}{2} \quad \text{Ecuación 2.32}$$

El Rezago 1 Autocorrelación Residual se calcula mediante la Ecuación 2.33.

$$r_1 = \frac{\sum_{i=2}^n e_i * e_{i-1}}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

## 2.6. Diseño del sistema de dosificación

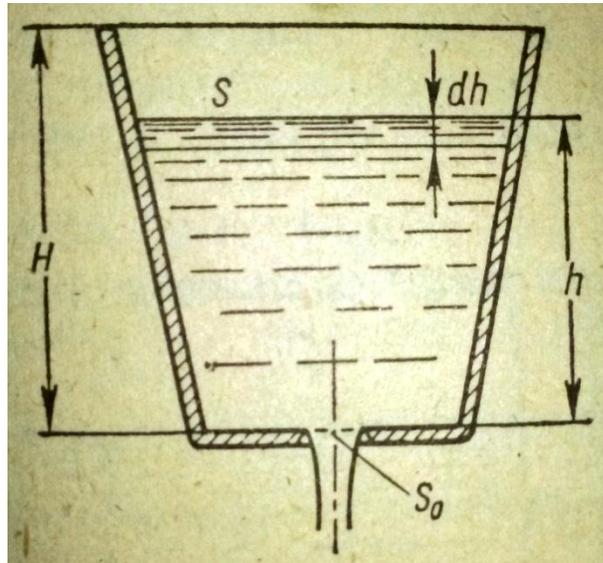
Teniendo la concentración de cloro óptima para garantizar que en el agua residual exista una concentración de 2 g de cloro activo por  $m^3$  de agua (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2013), se diseñó el sistema de dosificación que incluye el tanque de retención y el tanque de almacenamiento de cloro.

El tanque de retención fue diseñado de forma tal que la dosificación solo fuera necesaria llevarla a cabo un par de veces al día. El tiempo de contacto en este caso pasaría a ser igual al tiempo de retención dentro del tanque. El flujo de agua residual a tratar es conocido, se calcularon los volúmenes de ambos tanques y las características constructivas que deben cumplir.

### 2.6.1. Diseño del tanque de dosificación

Como sistema de dosificación se propuso el diseño de dos tanques de retención trabajando en batch, ambos de  $8 m^3$  de volumen; de esta forma se simplificaría la dosificación, ya que se llevaría a cabo una vez al día por cada tanque y como sistema de mezclado se empleará aire. Para que el sistema pueda cumplir su objetivo sin problemas, es necesario que el primer tanque vacíe su contenido a la bahía antes de que el segundo se llene, además de dar tiempo suficiente después de llenado para la desinfección. Para lograrlo, es necesario calcular el diámetro para la tubería de descarga, de forma tal que el primer tanque vacíe su contenido antes de que el segundo se llene, para ello se empleó el (Nekrasov, 1980).

Al vaciar un recipiente de forma cualquiera a través de una boquilla, con coeficiente de gasto  $\mu$ , el escurrimiento se verifica con una altura de carga variable que disminuye gradualmente. Si la altura de carga y la velocidad de escurrimiento cambian paulatinamente, como muestra la Figura 2.2, el movimiento en cada momento dado se puede considerar como estacionario y para los cálculos es posible emplear la ecuación de Bernoulli.



**Figura 2.2.** Esquema de vaciado de un recipiente. **Fuente.** (Nekrasov, 1980)

El coeficiente de gasto es la relación entre el gasto real y el teórico, es decir, el gasto que tendría lugar si no existiera la contracción del chorro y la resistencia. El gasto real es siempre menor que el teórico, por lo que el coeficiente de gasto tendrá siempre un valor menor que la unidad. Está condicionado por el crecimiento brusco de la velocidad y después de alcanzar un valor máximo ( $\mu_{\text{máx.}} = 0,69$  con  $Re = 350$ ), disminuye debido a la reducción considerable de la contracción. Para  $Re$  mayores se hace prácticamente constante entre 0,59 y 0,60.

Designando la altura variable del nivel del líquido en el recipiente a contar del fondo con  $h$ , el área de la sección del recipiente a este nivel con  $S$  y el área del orificio con  $S_0$  y tomando un período infinitesimal del tiempo  $dt$ , se puede emplear la Ecuación 2.34 para calcular el volumen.

$$Sdh = -Qdt \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Que puede ser escrita como muestra la Ecuación 2.35, donde  $dh$  es el descenso del nivel del líquido en el recipiente durante  $dt$ . El signo negativo se debe al hecho de que al incremento positivo  $dt$ , le corresponde el negativo  $dh$ .

$$Sdh = -\mu S_0 \sqrt{2gh} * dt \quad \text{Ecuación 2.35}$$

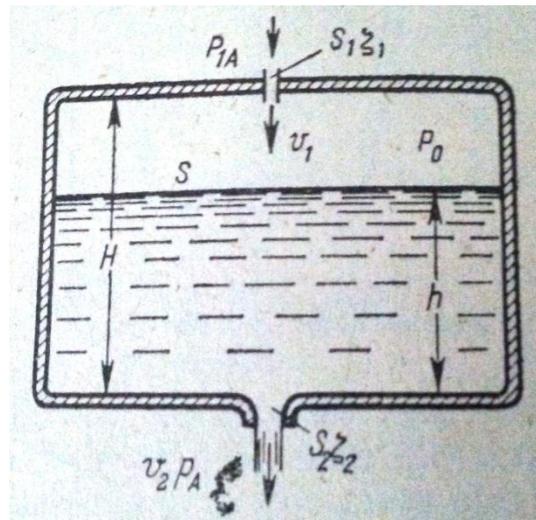
El tiempo de vaciado completo del recipiente de altura  $H$ , se puede calcular empleando la Ecuación 2.36.

$$t = -\frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_H^0 S \frac{dh}{\sqrt{h}} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

La integral puede calcularse si se conoce la ley de variación del área  $S$  en función de la altura  $h$ . Para un recipiente prismático, donde  $S$  es constante, el tiempo puede ser calculado mediante la Ecuación 2.37.

$$t = \frac{2S}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \sqrt{H} = \frac{2SH}{\mu S_0 \sqrt{2gH}} \quad \text{Ecuación 2.37}$$

El numerador de la Ecuación 2.38 es igual al doble del volumen del recipiente y el denominador representa el gasto en el aumento inicial del vaciado, o sea, con la altura  $H$ . Por lo tanto, el tiempo de vaciado completo del recipiente es dos veces mayor que el de escurrimiento del mismo volumen del líquido con altura constante, igual a la inicial. (Ver Figura 2.3)



**Figura 2.3.** Vaciado de un depósito de drenaje. **Fuente.** (Nekrasov, 1980)

El área de la boquilla  $S_0$  se calcula por medio de la ecuación 2.38 al ser de forma circular, donde  $D$  es el diámetro y el área superficial del tanque por la Ecuación 2.39 para un tanque prismático, donde  $l$  es el largo,  $a$  el ancho y  $h$  la altura.

$$S_0 = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.38}$$

$$S = l * a \quad \text{Ecuación 2.39}$$

## 2.7. Consideraciones Económicas

El sistema propuesto no genera beneficios, su instalación es necesaria para el cumplimiento de la NC 521:2007, la cual tiene un carácter obligatorio. El precio del sistema de tratamiento es la suma del precio de construcción y montaje de los tanques y las tuberías con sus válvulas y accesorios, más el precio del hipoclorito que consumiría.

### 2.7.1. Precio del hipoclorito

El costo del hipoclorito fue calculado conociendo la cantidad que consumiría la planta en un año y multiplicada por su precio en el mercado. La Ecuación 2.40 se empleó para el cálculo de la cantidad anual consumida y la 2.41 para el costo y la Tabla 2.2 muestra los precios del hipoclorito de sodio y calcio, los cuales fueron proporcionados por la Empresa Electroquímica de Zagua, que produce el hipoclorito de sodio e importa hipoclorito de calcio.

$$\text{Cantidad anual}_{\text{Hipoclorito}} = \text{Cantidad diaria}_{\text{Hipoclorito}} * 365 \text{ días} \quad \text{Ecuación 2.40}$$

$$\text{Costo}_{\text{Hipoclorito}} = \text{Cantidad anual}_{\text{Hipoclorito}} * \text{Precio}_{\text{Hipoclorito}} \quad \text{Ecuación 2.41}$$

**Tabla 2.2.** Precios del hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio. **Fuente.** Elaboración propia

	Precio (MN)	Precio (CUC)
<b>Hipoclorito de Sodio</b>	0,183475 por cada 2 L	0,7961 por cada 2 L
<b>Hipoclorito de Calcio</b>	272,9139 por 1 t	2476,1731 por 1 t

### 2.7.2. Costo de la construcción

El costo de la construcción y montaje del sistema fue calculado como una sumatoria total de los valores actuales de costos de los materiales, tuberías, accesorios y mano de obra que requiere el sistema. Los datos de estos valores fueron proporcionados por la propia empresa mediante el Software PRECONS, que contienen los precios de materiales, equipos y accesorios del Ministerio de Construcción (MINCONS). La Tabla 2.3 muestra los precios

delos accesorios y la tubería, la Tabla 2.4 los precios de los materiales de construcción y la Tabla 2.5 el salario de la mano de obra.

**Tabla 2.3.** Precio de la tubería y accesorios. **Fuente.** Elaboración propia

Accesorio	Precio (MN)	Precio (CUC)
Tubería Galvanizada $\frac{3}{4}$ in	1,54 x cada 3 m	5,14 x cada 3 m
Válvula de bola $\frac{3}{4}$ in	0,33	2,90
Nudo galvanizado $\frac{3}{4}$ in	—	0,47
Tee galvanizada $\frac{3}{4}$ in	0,70	—
Codo de 90° galvanizado $\frac{3}{4}$ in	0,30	0,84

**Tabla 2.4.** Precio de los materiales de construcción. **Fuente.** Elaboración propia

Material	Unidad	Precio (MN)	Precio (CUC)
Arena	m <sup>3</sup>	14,37	7,08
Cemento Gris P-350	Bolsa	1,49	4,82
Bloque Hormigón 15x20x40	Unidad	2,80	00,70
Piedra Hormigón grado A	m <sup>3</sup>	22,94	—
Cabilla	1 x cada 2 m	8,77	—

**Tabla 2.5.** Tarifas horarias de la mano de obra. **Fuente.** Elaboración propia

Mano de obra constructiva	Tarifa Horaria
Carpintero	3,64
Albañil	3,74
Ayudante	3,22

Los costos de instalación no pudieron ser estimados debido a que es un servicio que debe ser contratado a otra empresa, cuyas tarifas no fueron accesibles

# CAPÍTULO III

### CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los principales resultados de la investigación de acuerdo a la metodología planteada en el capítulo anterior. Se analizan los datos obtenidos de la determinación de la dosificación óptima y su procesamiento mediante el software Statgraphics Centurion XV. Se diseña el sistema de dosificación de cloro, sus componentes y los flujos de entrada y salida del sistema. Finalmente se hace una evaluación económica de los gastos de la construcción del sistema.

#### 3.1. Tamaño de la muestra

El tamaño de muestra fue determinado empleando la Ecuación 2.3, donde  $a$  son las concentraciones de cloro a los cuales se realizaron los experimentos, o sea, 4, 6, 8, 10 y 12 mg/L, cinco en total. Al no tener como estimar los valores de  $D$  y  $\sigma$ , se tomó un valor de  $D/\sigma$  igual a 3 según lo explicado en el Taller de Diseño de Experimentos (Pérez C. , 2017). Por lo tanto, para una hipótesis nula con una probabilidad de al menos 0,95:

$$a - 1 = 4$$

$$N - a = a(n - 1) = 4(n - 1)$$

$$\Phi^2 = \frac{n}{2a} \left( \frac{D}{\sigma} \right)^2$$

$$\Phi^2 = \frac{9n}{2 * 5} = 0,9n$$

Los valores de  $\beta$  se buscaron en la gráfica del Anexo 1, teniendo en cuenta los grados de libertad. Los resultados están representados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Cálculo del número de muestras. **Fuente.** Elaboración propia

<b>n</b>	<b><math>\Phi^2</math></b>	<b><math>\Phi</math></b>	<b><math>a(n - 1)</math></b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>1 - \beta</math></b>
3	2,7	1,6432	10	0,38	0,62
4	3,6	1,8974	15	0,17	0,83
5	4,5	2,1213	20	0,08	0,92
6	5,4	2,3238	25	0,015	0,985

A través de la Tabla 3.1 se puede observar que para una hipótesis nula con una probabilidad de al menos 0,95, es necesario un valor de  $n$  igual a 6 o superior, ya que con  $n$  igual a 5 aún no se alcanza un resultado de  $1 - \beta$  igual a 0,95. Por lo tanto, para 5 concentraciones

distintas, teniendo en cuenta que es necesario realizar 6 análisis por cada concentración para un 95 % de confianza, la cantidad de experimentos totales a llevar a cabo son 30 experimentos ( $a \cdot n, 5 \cdot 6$ ), o sea, el tamaño de muestra es 30.

### 3.2. Dosificación de cloro

Se realizaron los análisis empleando hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio debido a que son los dos compuestos clorados que se comercializan en nuestro país. El hipoclorito de sodio es producido y comercializado por la Empresa Electroquímica de Zagua, por lo cual se puede adquirir dentro del territorio nacional. El hipoclorito de calcio se importa en nuestro país para diversos procesos y la propia Empresa Termoeléctrica lo importa y emplea, por lo que adquirirlo no supondría un problema. El proceso de desinfección puede llevarse a cabo con ambos hipocloritos dado que los porcentajes de cloro activo de ambas sustancias son suficientes para alcanzar el valor de cloro residual que se necesita para la desinfección.

Para el cálculo la dosificación de cloro fue necesario emplear la Ecuación 2.6 b, donde el volumen de la muestra a preparar es de 500 ml (0,5 L), según la Técnica del Método Yodimétrico y el porcentaje de cloro activo para el hipoclorito de sodio es de 12 % y para el hipoclorito de calcio de 65 %. Entonces, para una dosificación de cloro de 4, 6, 8, 10 y 12  $\text{g/m}^3$ , equivalentes a 4, 6, 8, 10 y 12  $\text{mg/L}$ , a las cuales se realizaron los experimentos, las cantidades de hipoclorito necesarias a emplear para alcanzar esas concentraciones se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Dosificaciones a emplear en el análisis de ambos hipocloritos. **Fuente.** Elaboración propia

Dosificación (g/L)	Hipoclorito de sodio (g)	Hipoclorito de calcio (g)
$4 \cdot 10^{-3}$	0,0167	0,0031
$6 \cdot 10^{-3}$	0,0250	0,0046
$8 \cdot 10^{-3}$	0,0333	0,0062
$10 \cdot 10^{-3}$	0,0417	0,0077
$12 \cdot 10^{-3}$	0,0500	0,0092

Los análisis fueron realizados en la semana del 23 al 27 de abril del 2018 y se calculó el cloro residual empleando la ecuación especificada en la Técnica del Método Yodimétrico.

Los resultados de los análisis se muestran en la Tabla 3.3 para el hipoclorito de sodio y Tabla 3.4 para el hipoclorito de calcio.

Como la NC 521:2007 establece un rango de pH para el vertimiento de los residuales sanitarios a la bahía fueron realizadas pruebas antes y después de la dosificación con los productos clorados para determinar el comportamiento de este parámetro. El pH-metro utilizado para realizar estos análisis se puede observar en la Figura 3.1. No se evidenció grandes cambios del pH debido a la cloración, permaneciendo aproximadamente constante lo que está en concordancia con las bajas dosis necesarias para la desinfección.

**Tabla 3.3.** Resultados de los Análisis para el Hipoclorito de Sodio. **Fuente.** Elaboración propia

<b>Cloro residual</b>					
<b>Número de la muestra</b>	<b>Para: 4 mg/L</b>	<b>Para: 6 mg/L</b>	<b>Para: 8 mg/L</b>	<b>Para: 10 mg/L</b>	<b>Para: 12 mg/L</b>
1	0,9217	1,6307	2,1979	2,6942	2,9778
2	1,0635	1,7725	2,2688	2,5524	2,9069
3	0,9926	1,6307	2,1270	2,5524	3,0487
4	0,9926	1,7016	2,1270	2,6233	2,9778
5	0,9217	1,5598	2,0561	2,4815	3,1196
6	1,0635	1,7016	2,1979	2,6233	3,0487

**Tabla 3.4.** Resultados de los Análisis para el Hipoclorito de Calcio. **Fuente.** Elaboración propia

<b>Cloro residual</b>					
<b>Número de la muestra</b>	<b>Para: 4 mg/L</b>	<b>Para: 6 mg/L</b>	<b>Para: 8 mg/L</b>	<b>Para: 10 mg/L</b>	<b>Para: 12 mg/L</b>
1	1,0635	1,5598	2,0561	2,5524	3,0487
2	0,9217	1,7016	2,1270	2,6942	2,9778
3	0,9217	1,6307	2,1979	2,6233	3,1196
4	0,9926	1,5598	2,1270	2,5524	2,9778
5	1,0635	1,7016	2,1979	2,4815	3,1196
6	0,9926	1,6307	2,0561	2,6233	3,0487



**Figura 3.1.** Equipamiento utilizado para la medición del pH. **Fuente.** Elaboración propia

Los resultados de los análisis para ambos hipocloritos rondan valores similares en cada una de las concentraciones a las cuales se llevó a cabo el experimento, resultado que era de esperarse ya que, a efectos del análisis, la técnica y lo medido (cloro residual), lo que diferencia ambos hipocloritos es solo el porcentaje de cloro activo con el que se producen y son comercializados, 12 % para el hipoclorito de sodio y 65 % para el hipoclorito de calcio. Cabe señalar que experimentos con concentraciones superiores al 12 % no podrían realizarse con el hipoclorito de sodio ya que su porcentaje de cloro activo sería menor. Con ambos hipocloritos, el valor de cloro residual deseado (2 mg/L) se alcanza en dosificaciones dentro del rango recomendado a usar en la bibliografía (entre 5 y 30 mg/L), por lo que se puede afirmar la confiabilidad de los análisis realizados.

Según se puede observar en las tablas, a simple vista y sin realizar un análisis estadístico aún para la determinación de la dosis óptima de 2 mg/L, esta debe encontrarse entre una dosificación de 6 y 8 mg/L de hipoclorito en ambos casos.

### **3.2.1. Determinación teórica del número final de colonias**

Las colonias que quedarían luego de la desinfección fueron calculadas de manera teórica, empleando la Ecuación 2.7, al no contar con los equipos, instrumentos y la técnica necesaria para determinarlos experimentalmente. El valor de  $N_0$  es de 16000 colonias/mL como se puede apreciar en la Tabla 2.1: Características del agua sanitaria a tratar,  $C_R$  es de 2 mg/L (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2013),  $b$  es igual a 3 y se tomó un valor de  $n$  igual a 3 ya que con este garantiza un valor más alto de tiempo de retención o contacto. Se fijó primeramente el tiempo de retención a 30 min, como indican las bibliografías, obteniéndose:

$$N = 16000 * \left[ \frac{2 * 30}{3} \right]^{-3} = 2$$

Las colonias que quedarían después de un tiempo igual a 30 min serían 2 colonias/mL, para garantizar una desinfección total, se fijó el tiempo de retención entonces a 90 min, ya que aumentarlo no afectaría la secuencia del proceso y procuraría una desinfección casi total. Para un tiempo t de 90 min:

$$N = 16000 * \left[ \frac{2 * 90}{3} \right]^{-3} = 0,074 \text{ colonias/mL}$$

Con un tiempo de 90 minutos y un cloro residual de 2 mg/L se garantiza una desinfección casi total de los coliformes fecales sin afectar el resto de los parámetros de vertimiento de aguas residuales a la bahía según la (Oficina Nacional de Normalización, 2007).

### **3.3. Procesamiento Estadístico**

Para el procesamiento estadístico se llevó a cabo un análisis de ANOVA y de Regresión simple, empleando el Software Statgraphics Centurion XV. Se introdujeron en el software dos columnas de datos, la primera con los valores de las dosificaciones y la segunda con los resultados de la determinación del cloro residual según la Técnica del Método Yodimétrico, como se muestra en los Anexos 2 y 3 para el hipoclorito de sodio y de calcio respectivamente.

Las variables del análisis son la dosificación y el cloro residual, de las cuales la dependiente es el cloro residual. Los modelos estadísticos empleados fueron el análisis de datos, para evaluar si la distribución normal ajusta los datos adecuadamente y para ayudar a determinar si una muestra de n observaciones numéricas contiene valores atípicos; el análisis de correlación, para medir la intensidad de la asociación entre dos variables y el gráfico del modelo ajustado, donde se puede ver representado gráficamente el modelo que más se ajusta a nuestro caso mediante la ecuación que lo define.

#### **3.3.1. Análisis ANOVA simple**

El procedimiento de ANOVA simple ejecuta un análisis de varianza de un factor para el cloro residual, construyendo varias pruebas y gráficas para comparar los valores medios de cloro residual para los 5 diferentes niveles de dosificación en un total de 30 observaciones. Las Tablas 3.5 y 3.6 muestran diferentes estadísticos de cloro residual para el hipoclorito de

sodio y el hipoclorito de calcio respectivamente, en cada uno de los 5 niveles de Dosificación.

**Tabla 3.5.** Resumen Estadístico para Cloro residual para el Hipoclorito de sodio. **Fuente.** Elaboración propia

Dosificación	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
4	6	0,9926	0,0634149	0,1418	0,0	-0,9375
6	6	1,66615	0,0743605	0,2127	0,0	-0,123967
8	6	2,16245	0,0743605	0,2127	0,0	-0,123967
10	6	2,58785	0,0743605	0,2127	0,0	-0,123967
12	6	3,01325	0,0743605	0,2127	0,0	-0,123967
<b>Total</b>	30	2,08446	0,720784	2,1979	-0,584402	-1,28501

**Tabla 3.6.** Resumen Estadístico para Cloro residual para el Hipoclorito de calcio. **Fuente.** Elaboración propia

Dosificación	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Rango	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
4	6	0,9926	0,0634149	0,1418	0,0	-0,9375
6	6	1,6307	0,0634149	0,1418	0,0	-0,9375
8	6	2,127	0,0634149	0,1418	0,0	-0,9375
10	6	2,58785	0,0743605	0,2127	0,0	-0,123967
12	6	3,0487	0,0634149	0,1418	0,0	-0,9375
<b>Total</b>	30	2,07737	0,733549	2,1979	-0,394427	-1,33662

De particular interés en ambas tablas son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, que se emplean para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. En este caso, ninguna de las variables presentó valores de sesgo estandarizado y curtosis estandarizada fuera del rango de -2 a +2, por lo tanto, se puede afirmar que los valores provienen de una distribución normal.

La tabla ANOVA (Tablas 3.7 para hipoclorito de sodio y 3.8 para hipoclorito de calcio), descompone la varianza de cloro residual en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a

714,23 para hipoclorito de sodio y 896,16 para hipoclorito de calcio, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05 en ambos casos, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Cloro residual entre un nivel de Dosificación y otro, con un nivel del 95,0% de confianza (Ver Anexos 4 y 5).

**Tabla 3.7.** Tabla ANOVA para Cloro residual por Dosificación para el Hipoclorito de sodio. **Fuente.** Elaboración propia

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Entre grupos</b>	14,9357	4	3,73391	714,23	0,0000
<b>Intra grupos</b>	0,130697	25	0,00522788		
<b>Total (Corr.)</b>	15,0664	29			

**Tabla 3.8.** Tabla ANOVA para Cloro residual por Dosificación para el Hipoclorito de calcio. **Fuente.** Elaboración propia

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Entre grupos</b>	15,4966	4	3,87416	896,16	0,0000
<b>Intra grupos</b>	0,108076	25	0,00432306		
<b>Total (Corr.)</b>	15,6047	29			

### 3.3.2. Análisis de Regresión simple para el Hipoclorito de sodio

El análisis de Regresión simple permite hallar un modelo matemático mediante un método gráfico que permita predecir el comportamiento de la variable dependiente, en este caso el cloro residual, con respecto a la variable independiente, la dosificación, si se produce un cambio en esta última.

Para saber si la predicción es fiable, o sea, si el ajuste es bueno, el análisis calcula el coeficiente de correlación lineal  $r$ . Si este está próximo a 1, el ajuste es fiable, ya que el grado de asociación lineal entre las variables es alto y si está próximo a 0, los resultados no se pueden considerar fiables, puesto que el grado de asociación lineal entre las variables es bajo.

El análisis realiza el procedimiento por defecto para un ajuste de modelo lineal entre las variables cloro residual y dosificación; no obstante, el análisis además muestra los resultados de ajustar varios modelos a los datos mediante la tabla de la Comparación de

Modelos Alternos que puede verse en el Anexo 6. El modelo lineal, aunque presenta un valor de correlación alto, no es el modelo que más se ajusta a los datos y, por consiguiente, no es el modelo que presenta la correlación más alta. De todos los modelos ajustados, el que presenta un mayor valor en la Correlación y R-cuadrada es el modelo de Raíz Cuadrada de X. En la ventana de Opciones del Análisis se seleccionó este modelo en vez del lineal, quedando representada la ecuación del modelo ajustado como muestra la Ecuación 3.1.

$$Y = a + b * \text{sqrt}(X) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Las Tablas 3.9 y 3.10 muestran el resumen del análisis para el modelo ajustado.

**Tabla 3.9.** Coeficientes para el Hipoclorito de sodio. **Fuente.** Elaboración propia

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
<b>Parámetro</b>	Estimado	Error	T	Valor-P
<b>Intercepto</b>	-1,71234	0,0718381	-23,8361	0,0000
<b>Pendiente</b>	1,36533	0,0253986	53,7562	0,0000

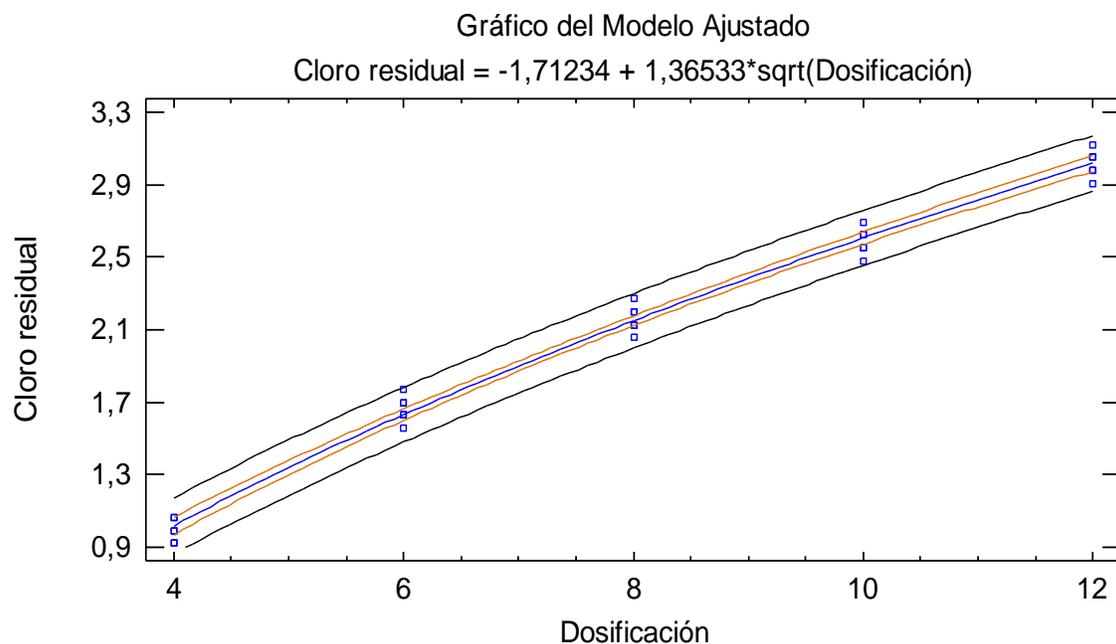
**Tabla 3.10.** Análisis de Varianza para el Hipoclorito de sodio. **Fuente.** Elaboración propia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Modelo</b>	14,9218	1	14,9218	2889,73	0,0000
<b>Residuo</b>	0,144584	28	0,00516372		
<b>Total (Corr.)</b>	15,0664	29			

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Cloro residual y Dosificación con un nivel de confianza del 95,0 %. El Coeficiente de Correlación es de 0,99519 y como está próximo a 1, indica una relación relativamente fuerte entre las variables. El valor de R-cuadrada es de 99,0404 % y el de R-cuadrado (ajustado para g.l.) de 99,0061 %, esto indica que el 99,0404 % de la variación total de los valores del cloro residual pueden ser explicados mediante la recta de regresión ajustada, o sea, que las predicciones realizadas con la recta serán fiables en un 99,0404 %. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,071859 y el error absoluto medio (MAE) es de 0,0584351, es el valor promedio de los residuos. En este caso, no hay residuos estudentizados mayores que 2.

La Ecuación 3.2 muestra la ecuación del modelo matemático ajustado, Raíz Cuadrada de X y la Figura 3.1 muestra la gráfica de este modelo.

$$\text{Cloro residual} = -1,71234 + 1,36533 * \text{sqrt}(\text{Dosificación}) \quad \text{Ecuación 3.2}$$



**Figura 3.1.** Gráfico del modelo ajustado para el Hipoclorito de sodio. **Fuente.** Elaboración propia

Sustituyendo el valor del cloro residual a 2 mg/L en la Ecuación 3.2, se puede despejar y calcular el valor de la dosificación óptima para el modelo matemático que permite obtener un valor más preciso, dando un resultado de 7,3930 mg/L para una dosificación óptima de cloro. Empleando la Ecuación 2.4 a se calculó la cantidad de hipoclorito de sodio necesaria para la desinfección del flujo diario de aguas residuales, siendo necesarios 0,8872 kg/día de hipoclorito de sodio.

### 3.3.3. Análisis de Regresión simple para el Hipoclorito de calcio

El análisis de Regresión simple para el hipoclorito calcio sigue el mismo procedimiento que para el hipoclorito de sodio y se muestra nuevamente una mayor correlación con el modelo raíz cuadrada de x. En las Tablas 3.11 y 3.12 se muestra el resumen del análisis. La tabla de la Comparación de Modelos Alternos para el hipoclorito de calcio puede verse en el Anexo 7.

**Tabla 3.11.** Coeficientes para el Hipoclorito de calcio. **Fuente.** Elaboración propia

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-1,79089	0,0643459	-27,8322	0,0000
Pendiente	1,39103	0,0227497	61,145	0,0000

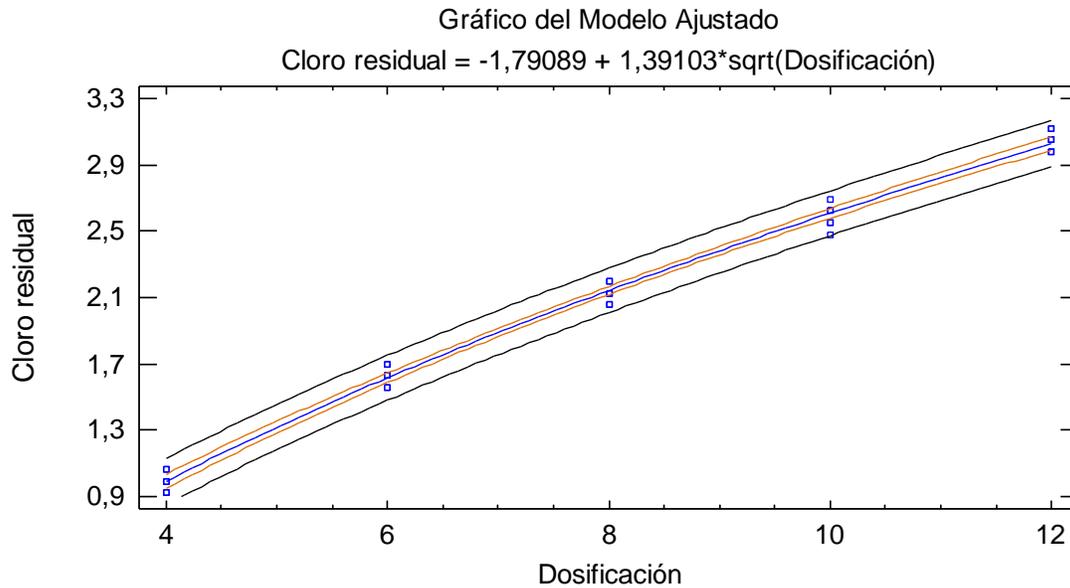
**Tabla 3.12.** Análisis de Varianza para el Hipoclorito de calcio. **Fuente.** Elaboración propia

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	15,4887	1	15,4887	3738,71	0,0000
Residuo	0,115998	28	0,0041428		
Total (Corr.)	15,6047	29			

Nuevamente, el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, marcando una relación estadísticamente significativa entre Cloro residual y Dosificación con un nivel de confianza del 95,0 %. El Coeficiente de Correlación es de 0,996276 y como está próximo a 1, indica una relación relativamente fuerte entre las variables. El valor de R-cuadrada es de 99,2566 % y el de R-cuadrado (ajustado para g.l.) de 99,2301 %, ambos mayores que el valor del modelo lineal, indicando una mayor correlación en este modelo que la del anterior. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0643646 y el error absoluto medio (MAE) es de 0,0531741, ambos menores que los del modelo lineal. La Ecuación 3.3 muestra la ecuación del modelo matemático ajustado, Raíz Cuadrada de X y la Figura 3.2 muestra la gráfica de este modelo.

$$\text{Cloro residual} = -1,79089 + 1,39103 * \text{sqrt}(\text{Dosificación}) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Sustituyendo nuevamente el valor del cloro residual a 2 mg/L, ahora en la Ecuación 3.3 se puede despejar y calcular el valor de la dosificación óptima para el hipoclorito de calcio, dando un resultado de 7,4269 mg/L. Empleando la Ecuación 2.4 a se calculó nuevamente la cantidad de hipoclorito de calcio necesaria para la desinfección del flujo diario de aguas residuales, siendo necesarios 0,1645 kg/día de hipoclorito de calcio.



**Figura 3.2.** Gráfico del modelo ajustado para el Hipoclorito de calcio. **Fuente.** Elaboración propia

Mediante el procesamiento estadístico fue posible la determinación de las dosis de cloro óptimas para ambos hipocloritos y las cantidades necesarias a consumir diariamente. La cantidad de hipoclorito de sodio necesaria en el proceso es mayor que la de calcio al tener este un menor porcentaje de cloro activo; aunque las dosis óptimas si son cercanas ya que ambos compuestos son capaces de realizar el mismo proceso diferenciados solo por las cantidades a emplear.

En la tabla 3.13 se puede observar que para un efluente a la salida del tanque séptico se necesita una dosificación de 40 – 60 mL para un efluente estándar de 200 ppm/100 mL. En el caso del objeto de estudio de esta investigación, la cantidad de coliformes fecales presentes en el agua a tratar es de 16000 colonias/mL, en el orden de  $10^4$ ; similar más a los procesos de efluente de un filtro percolador, un efluente nitrificado y de un efluente de un filtro nitrificado, que está en el orden de  $10^4 - 10^6$  ppm/100 mL, para una dosificación en general que va de 5 – 16 mg/L. Esto está dado por la calidad del agua a tratar, expuesto en la Tabla 2.1 obtenida de (Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), 2018), que sale del tanque séptico con el que hoy cuenta la entidad. Es debido precisamente a ello que las dosificaciones de cloro necesarias para tratar el agua sanitaria de la empresa son relativamente bajas a las cantidades que se requieren normalmente a la salida de un tanque séptico.

**Tabla 3.13.** Dosis típicas de cloro, basadas en el uso de compuestos clorados, requeridas para lograr efluentes con estándares distintos de coliformes fecales en distintas aguas residuales, basados en un tiempo de contacto de 30 min. **Fuente.** (Metalcalf & Eddy, Inc., 2003)

Tipo de agua residual	Coliformes iniciales, ppm/100 mL	Dosis de cloro, mg/L			
		Efluente estándar, ppm/100 mL			
		1000	200	23	≤ 2,2
Agua residual cruda	$10^7 - 10^9$	15 - 40	—	—	—
Efluente primario	$10^7 - 10^9$	10 - 30	20 - 40	—	—
Efluente de un filtro por goteo	$10^5 - 10^6$	3 - 10	5 - 20	10 - 40	—
Efluente de laguna de activación	$10^5 - 10^6$	2 - 10	5 - 15	10 - 30	—
Efluente de un filtro percolador	$10^4 - 10^6$	4 - 8	5 - 15	6 - 20	8 - 30
Efluente nitrificado	$10^4 - 10^6$	4 - 12	6 - 16	8 - 18	8 - 20
Efluente de un filtro nitrificado	$10^4 - 10^6$	4 - 10	6 - 12	8 - 14	8 - 16
Efluente de microfiltración	$10^1 - 10^3$	1 - 3	2 - 4	2 - 6	4 - 10
Ósmosis inversa	~ 0	0	0	0	0 - 2
Efluente de tanque séptico	$10^7 - 10^5$	20 - 40	40 - 60	—	—
Efluente de un filtro intermitente de arena	$10^2 - 10^4$	1 - 5	2 - 8	5 - 10	8 - 18

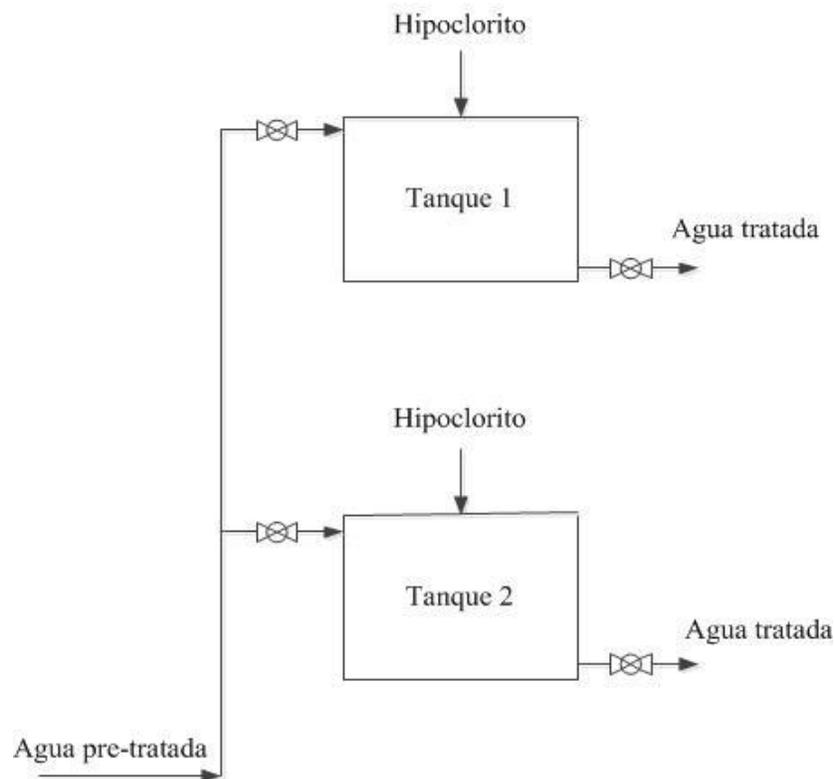
### 3.4. Diseño del sistema de dosificación

La empresa cuenta con un tanque séptico que le realiza un primer tratamiento al agua residual, descargándola luego directamente a la bahía. Para tratar los coliformes fecales se propuso un sistema de dosificación que consiste en dos tanques de retención de 8 m<sup>3</sup> de volumen trabajando en batch. Se conectaría una tubería a la que actualmente se tiene como tubería de descarga y se conduciría el agua a residual a desinfectar hacia ambos tanques. A la entrada de ambos tanques se colocaría una válvula de control en la tubería de tal forma que mientras uno de los tanques se está llenando, la válvula del segundo permanezca cerrada. El agua caería a los tanques por gravedad evitando el uso de bombas trasegar el fluido.

Es necesario que el primer tanque se vacíe antes de que el segundo se llene de tal forma que el proceso sea continuo, para ello fue calculado el diámetro que sería necesario de tubería

de descarga y así el tanque vaciaría su contenido antes de que el otro se llene. El hipoclorito se dosificaría manualmente a través de una tapa en la parte superior de cada tanque. Se dejaría reposar el agua luego de dosificado el hipoclorito por un tiempo de contacto de 90 minutos para una desinfección casi total según el modelo.

A la salida de ambos tanques se colocaría otra válvula de control en la tubería de descarga. Mientras se está dosificando y descargando el primer tanque, el segundo se va llenando, el tiempo necesario para realizar las operaciones de dosificación, reposo y vaciado en el primer tanque es menor que el tiempo en que demora llenar el segundo, de tal forma que se pueda trabajar continuamente sin interrupciones. Todo el sistema se encontraría ubicado dentro de una piscina, ya que los tanques serán construidos a una altura inferior a la tubería que sale del tanque séptico para que se pueda funcionar el proceso mediante el principio de la gravedad, cayendo y saliendo de ambos tanques el agua pre-tratada y el agua tratada por rebose. La Figura 3.3 muestra el sistema propuesto para la desinfección.

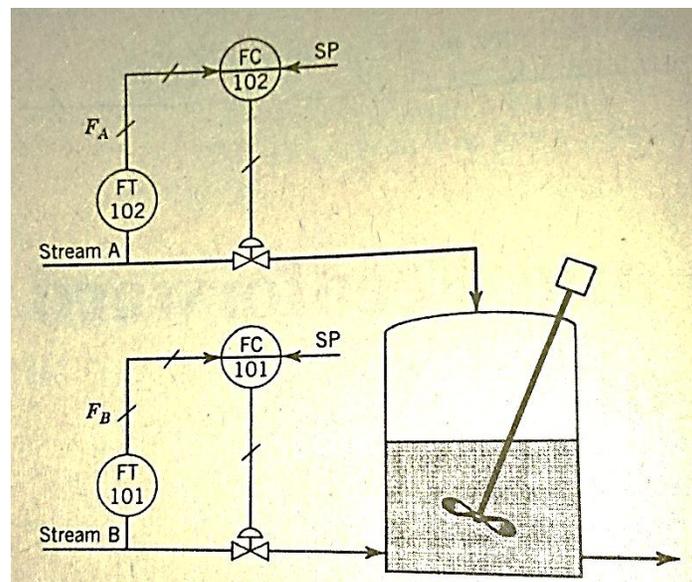


**Figura 3.3.** Propuesta de Sistema de Dosificación. **Fuente.** Elaboración propia

El sistema podría construirse incluyendo bombas para impulsar el agua y un sistema de control automático que regulara cuando se abren y cierran las válvulas de control y dosificara el hipoclorito necesario según el flujo a la entrada. Para ello sería necesario que

la tubería a la salida del tanque séptico callera a una cisterna de la cual se bombearía el agua hacia ambos tanques. Esto permitiría que los tanques fueran construidos al nivel del suelo y no dentro de una piscina bajo el nivel de la tubería. A pesar de que se ahorraría la construcción de la piscina, un equipo como una bomba requiere una inversión mayor para su compra y montaje que lo que representaría construir la piscina, además es un equipo que consume energía eléctrica para su funcionamiento y necesita mantenimiento regular.

En caso del sistema con control automático, su instalación conllevaría colocar un sensor de flujo en la tubería a la entrada a los tanques y un sensor de nivel en ambos tanques, de esa forma sabría la cantidad de hipoclorito que debe dosificarse teniendo en cuenta el flujo a la entrada y cuando abrir y cerrar las válvulas de control a la entrada y salida a los tanques. El sistema de control automático necesario en este caso quedaría representado como muestra la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Sistema de control automático. **Fuente.** (Smith & Corripio, 2012)

Un sistema con estas características evitaría que un operador dosificara manualmente el hipoclorito, pero teniendo en cuenta que el volumen a tratar diariamente es relativamente bajo y cada tanque solo sería necesario dosificarlo una vez al día, uno por cada turno de trabajo, el sistema no estaría ahorrando mucho trabajo, pero sí ganando en complejidad y costo. Además de que un sistema de control automático es muy costoso, requiere cuidado y

mantenimiento regular y sumado al hecho de que el flujo a tratar es bajo, lo que hace que las cantidades a dosificar de hipoclorito también sean bajas, se necesitaría un sistema de control muy preciso que permita dosificar cantidades pequeñas de cloro, lo que lo volvería aún más costoso y sensible y se requeriría capacitar a los trabajadores para su mantenimiento y cuidado. El sistema que se propuso evita el uso de equipos que generarían una inversión mayor para la empresa y complicarían el funcionamiento del sistema, ganando en simplicidad y que cumpliría su propósito sin complicaciones.

### 3.4.1. Diseño de los tanques de retención

Fueron diseñados dos tanques iguales de  $8 \text{ m}^3$  cada uno, trabajando de forma tal que primero se llena uno y mientras este se dosifica y se le da el tiempo de retención necesario, el otro se está llenando. Para que el sistema funcione de forma continua es necesario que el primer tanque se vacíe antes de que el segundo se llene y para lograrlo se fijó el tiempo de descarga a 8 h. Al ser el flujo de  $14,4 \text{ m}^3/\text{día}$ , cada tanque se llenaría una vez por día y el tiempo de llenado sería poco más de 12 h al ser el volumen de cada tanque poco más de la mitad del volumen total a procesar por día. La altura fue fijada a 1m, el largo 4 m y el ancho 2 m, manteniendo así el volumen de  $8 \text{ m}^3$  para un tanque prismático. Las consideraciones del tamaño y dimensiones del tanque ya cuentan con el valor de sobrediseño que se requiere tener por seguridad.

Se tiene el tiempo de vaciado ( $8 \text{ h} = 28\,800 \text{ s}$ ), el volumen del tanque ( $8 \text{ m}^3$ ) y el área superficial para ambos tipos de tanque ( $8 \text{ m}^2$ ) y se tomó un valor de  $\mu$  igual a 0,59 considerando que el Re en este caso es mayor de 350 y el caso más crítico entre 0,59 y 0,60. Se necesita conocer el diámetro de la tubería de descarga, que se calcula sustituyendo las Ecuaciones 2.38 y 2.39 en la 2.37 y despejándolo.

Sustituyendo las Ecuaciones 2.38 y 2.39 por  $S_0$  y  $S$  respectivamente en la Ecuación 2.37:

$$t = \frac{2SH}{\mu S_0 \sqrt{2gH}} = \frac{2(l * a)H}{\mu \frac{\pi D_0^2}{4} \sqrt{2gH}}$$

Despejando y calculando  $D_0$ :

$$D_0 = \sqrt{\frac{8SH}{t * \pi * \mu \sqrt{2gH}}} = 0,01645 \text{ m} = 16,45 \text{ mm}$$

El diámetro necesario para que el tanque se vacíe en un tiempo de 8 h es de 0,01645 m. En (Rosabal & Garcell, 2010) se buscó en la Tabla 10 del Apéndice (Ver Anexo 6) el diámetro interno que corresponde al diámetro calculado, el más cercano en la tabla por exceso es 20,93 mm y le corresponde un diámetro nominal de ¾ in. La tubería propuesta para el sistema, tanto a la entrada, como a la descarga es de ¾ in y se necesitarían en total 12 m de tubería para todo el sistema.

Empleando nuevamente la Ecuación 2.37 se recalculó el tiempo de vaciado de ambos tanques para la tubería de descarga seleccionada con diámetro de 20,93mm.

$$t = \frac{2SH}{\mu \frac{\pi D_0^2}{4} \sqrt{2gH}} = 17803,7 \text{ s} = 4,95 \text{ h} \approx 5 \text{ h}$$

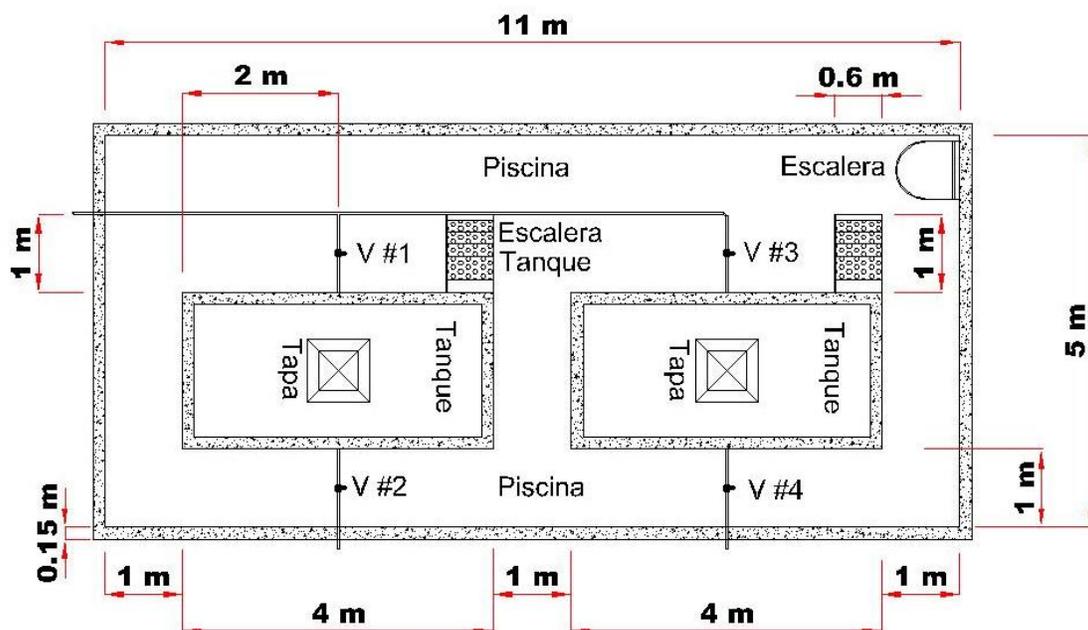
Con el diámetro de tubería calculado se asegura un tiempo de descarga de 5 h, mucho menor que el tiempo de llenado de los tanques, posibilitando así que la operación sea continua.

El sistema contaría finalmente de 4 válvulas de bola ¾ in, 3 codos de 90° galvanizado ¾ in, una Tee galvanizada ¾ in, 12 m de tubería galvanizada ¾ in, un nudo galvanizado ¾ in, dos tanques con un volumen de 8 m<sup>3</sup> de 1 m de altura, 2 m de ancho, 4 m de largo y 0,15 m de espesor y estarían contruidos dentro de una piscina de 11 m de largo, 5 m de ancho y 3 m de profundidad. La profundidad de la piscina y los tanques permitirá que el agua caída por reboso tanto a la entrada como a la salida.

Se escogió para el sistema válvulas tipo bola, ya que son de simple instalación y mantenimiento, bajo costo, para operarlas solo se requiere abrir y cerrar la llave, trabajan en condiciones de temperatura y presión ambiente, como es el caso de este sistema, pueden ser empleadas para fluidos corrosivos, que, aunque no es el caso ya que las cantidades añadidas de hipoclorito son muy bajas para afectar el pH, ayudan a su conservación en el medio que está cerca del mar y este es un factor que acelera la corrosión.

Se escogieron la tubería y los accesorios de acero galvanizado ya que era necesaria una tubería metálica para la instalación de las válvulas, por lo que no se podía usar una tubería de PVC y la terminación galvanizada protege a la tubería contra la corrosión, además son de bajo costo y fácil instalación. Fueron definidas las medidas de largo, ancho y altura de los tanques teniendo en cuenta que la altura fuera mínima para que los tanques quedaran por debajo de la tubería de entrada y por encima del nivel del mar, el largo y el ancho se

ajustaron luego de fijada la altura a 1 m para que el volumen cumpliera con los  $8 \text{ m}^3$ , como se tiene más espacio de largo que de ancho, el largo del tanque es de 4 m y el ancho de 2 m. El espesor se fijó luego de seleccionar el material del cual se construirían los tanques. Se propone el uso de concreto reforzado ya que el fluido a tratar no es corrosivo y su construcción y limpieza son simples, además de resistir la corrosión por la cercanía al mar mejor que un tanque metálico. Se propone además que se aplique una pintura anticorrosiva al tanque luego de su construcción. El espesor entonces es de 0,15 m producto al espesor del tipo de bloques que se empleará en su construcción. Las dimensiones de la piscina fueron fijadas luego de establecer las dimensiones del resto del sistema, de forma tal que el espacio disponible para la construcción de los tanques y la instalación de las tuberías y accesorios fuera el suficiente y que además, el operador pudiese transitar sin problemas por el sistema para la dosificación, la limpieza del lugar y el mantenimiento de todo el sistema. En la selección de los materiales de construcción, las válvulas, tubería y accesorios fuimos asistidos por Orestes Regla, el Jefe de Mantenimiento y Construcción de la empresa, el cual nos ayudó con la selección del material que mejor se ajustara al proceso, teniendo en cuenta su costo, instalación, mantenimiento y las condiciones en las que es adecuado su uso. El sistema en su totalidad se muestra en la Figura 3.5 desde una vista lateral, realizado empleando el software Autocad.



**Figura 3.5.** Diagrama del Sistema de Dosificación. **Fuente.** Elaboración propia

### 3.5. Consideraciones Económicas

La Termoeléctrica vertería el agua tratada después de la desinfección directamente a la bahía, la planta en sí no genera beneficios económicos y el agua tratada no será reutilizada de manera directa en el proceso. Es necesaria su construcción debido a que no cumplen con lo establecido en la norma NC 521:2017 y esta tiene un carácter obligatorio. Al no cumplirla la empresa sería multada y de continuar su incumplimiento, el valor de las multas aumentaría.

#### 3.5.1. Costo del hipoclorito

La cantidad diaria de hipoclorito de sodio a consumir es de 0,8872 kg/día (0,8872 L/día) y de hipoclorito de calcio de 0,1645 (0,0001645 t/día) kg/día. Empleando las Ecuaciones 2.40 y 2.41 se calcularon las cantidades anuales de ambos hipocloritos y sus costos. Los resultados se muestran en la Tabla 3.13, donde además están incluidos los precios de ambos hipocloritos.

**Tabla 3.13.** Costo del hipoclorito para un consumo anual. **Fuente.** Elaboración propia

	Hipoclorito de Sodio	Hipoclorito de Calcio
<b>Cantidad consumida anualmente</b>	323,828 L	0,06 t
<b>Costo anual (MN)</b>	29,7072	16,3748
<b>Costo anual (CUC)</b>	12,9	148,6756
<b>Costo anual Total (UM)</b>	42,6072	165,0504

El hipoclorito de sodio a pesar de ser menos costoso que el hipoclorito de calcio, es mucho más inestable y no se recomienda su almacenamiento para períodos superiores a los 30 días, además de ser corrosivo. Su uso implicaría un almacenamiento bajo condiciones de hermeticidad y temperaturas no muy altas, inferiores a 25 °C, para que el porcentaje de cloro activo de la sustancia no disminuya. La cantidad anual que consume el proceso de hipoclorito de calcio son bastante bajas y no se podría almacenar por tanto tiempo sin que perdiera sus propiedades, además el costo en transporte para adquirirlo de forma regular debido a que no se puede almacenar por más de 30 días, se añadiría al del costo del total para uso de la sustancia como desinfectante. Al ser las cantidades a consumir anualmente bastante bajas, los precios de ambas sustancias son también bajos, por lo que se recomienda

emplear hipoclorito de calcio en vez de hipoclorito de sodio, aunque su precio sea mayor, ya que con el hipoclorito de calcio no se tienen los problemas de almacenamiento que se tienen con el de sodio, puede almacenarse a temperatura ambiente, se comercializa en sacos y puede estar almacenado por períodos largos de tiempo. Además, la empresa lo importa para su uso en otros procesos, así que su adquisición no resultaría un problema.

### 3.5.2. Costo de la construcción del sistema

Con los valores de los precios de materiales, válvulas, tuberías y accesorios tomados del Software PRECONS, se calculó el costo total de la construcción del sistema y el costo de la tubería, válvulas y demás accesorios. La Tabla 3.18 muestra los precios de los accesorios y las tuberías, la Tabla 3.19 los precios de los materiales de construcción y la Tabla 3.20 el salario de la mano de obra.

**Tabla 3.18.** Costo de la tubería y accesorios. **Fuente.** Elaboración propia

Accesorio	Cantidad	Costo (MN)	Costo (CUC)	Costo Total (UM)
Tubería Galvanizada ¾ in	12 m	6,16	20,56	26,72
Válvula de bola ¾ in	4	1,32	11,6	12,92
Nudo galvanizado ¾ in	1	—	0,47	0,47
Tee galvanizada ¾ in	1	0,70	—	0,70
Codo de 90° galvanizado ¾ in	3	0,90	2,52	3,42
<b>Total</b>		<b>9,08</b>	<b>35,15</b>	<b>44,23</b>

**Tabla 3.19.** Costo de los materiales de construcción. **Fuente.** Elaboración propia

Material	Unidad	Cantidad	Costo (MN)	Costo (CUC)	Costo Total (UM)
Arena	m <sup>3</sup>	36	517,32	254,88	772,2
Cemento Gris P-350	Bolsa	102	151,98	491,64	643,62
Bloque Hormigón 15x20x40	Unidad	2000	5 600	1 400	7 000
Piedra Hormigón grado A	m <sup>3</sup>	6	137,64	—	137,64
Cabilla	m	570	4 998,9	—	4 998,9
<b>Total</b>			<b>11 405,84</b>	<b>2 146,52</b>	<b>13552,36</b>

**Tabla 3.20.** Tarifas horarias de la mano de obra. **Fuente.** Elaboración propia

<b>Mano de obra constructiva</b>	<b>Cantidad de trabajadores</b>	<b>Horas trabajadas cada uno</b>	<b>Salario (MN)</b>
Carpintero	1	8	29,12
Albañil	2	116	867,68
Ayudante	3	124	1 197,84
<b>Total</b>			<b>2 094,64</b>

\* Al costo total de la mano de obra se le suma un 0,2 % por el pago de la Seguridad Social y las vacaciones, dando un total de 2 513,568 MN.

El Costo Total de la construcción del sistema se calculó mediante la sumatoria de los costos totales de construcción más el salario, como muestra la Ecuación 3.4.

$$C.T_{Const.Sist.} = C.T_{construcción} + C.T_{mano obra} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$C.T_{Const.Sist.} = 15\,647 \text{ UM}$$

La construcción y montaje del sistema completo tiene un costo total de 15 647 UM, el hipoclorito de sodio tiene un costo anual total de 42,6072 UM y el de calcio de 165,0504 UM y el costo de las tuberías y accesorios es de 44,23 UM. El sistema en su totalidad no conlleva una inversión monetaria muy elevada y tanto la limpieza como el mantenimiento son sencillos y no es necesaria una capacitación para el operador que realice la dosificación, ya que solo consiste en añadirle el hipoclorito al agua.

El servicio para el montaje de las tuberías, válvulas y accesorios será contratado a la Empresa de Mantenimiento de Centrales Eléctricas (EMCE), que es la que está capacitada para realizar este servicio.

### **3.5.3. Planificación de las actividades para la construcción y montaje del sistema**

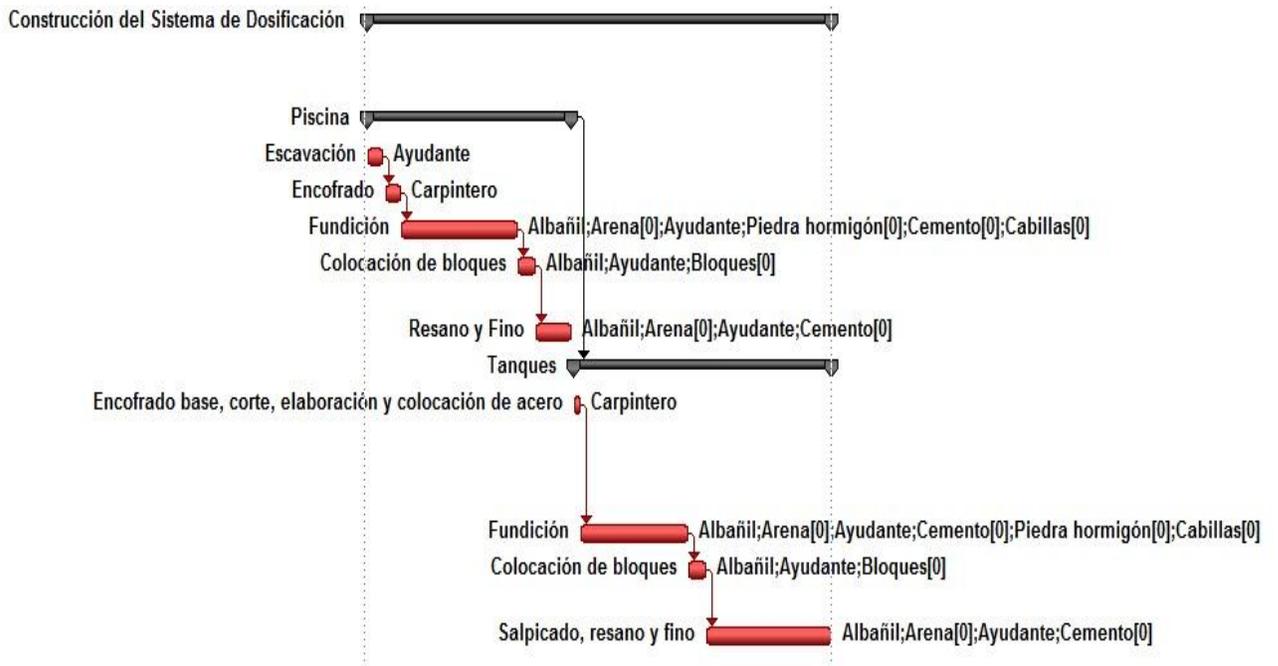
Con ayuda del Jefe de Mantenimiento y Construcción de la empresa se planificaron las actividades de construcción del sistema, incluyendo los tiempos que demoraría cada etapa de la construcción, los materiales que se requieren en cada una de las etapas y la mano de obra necesaria para llevarla a cabo. La planificación se realizó mediante el empleo del Microsoft Project, con el cual se puede elaborar un calendario a seguir para la construcción que contiene todo lo anterior y además se pueden incluir los costos, la ruta crítica a seguir y en caso de que se atrase alguna tarea, también se puede ver representado en la línea de tiempo. Las actividades y su duración en días están representadas en la Figura 3.5.

Modo de	Nombre de tarea	Duración
	<b>Construcción y Montaje del Sistema de Dosificación de</b>	<b>37 días</b>
	<b>Piscina</b>	<b>16 días</b>
	Escavación	2 días
	Encofrado	1 día
	Fundición	9 días
	Colocación de bloques	2 días
	Resano y Fino	2 días
	<b>Tanques</b>	<b>21 días</b>
	Encofrado base, corte, elaboración y colocación de acero	1 día
	Fundición	8 días
	Colocación de bloques	2 días
	Salpicado, resano y fino	10 días

**Figura 3.5.** Planificación de las actividades para la construcción y montaje del sistema.

**Fuente.** Elaboración propia

La construcción del sistema tomaría unos 37 días a los que se le añadiría el tiempo de montaje de las tuberías, válvulas y accesorios necesarios. La Figura 3.6 muestra el diagrama de Gantt, donde se ve representada la ruta crítica con el color rojo, cada actividad está señalada con su nombre e incluye los recursos necesarios para llevarla a cabo. Las flechas indican el orden de las actividades y las barras de color negro representan cada sección de construcción, o sea, las actividades para la construcción de la piscina y las actividades para la construcción de los tanques. Como se puede observar, la línea negra que representa la Construcción del sistema de dosificación incluye la construcción tanto de la piscina como de los tanques. Las fechas no están señaladas y para elaborar el calendario en el Microsoft Project se seleccionó una fecha de inicio arbitraria, ya que la empresa aún no ha decidido cuándo comenzar a construir el sistema. Una vez que se decida, se pueden ajustar las fechas en el software Microsoft Project.



**Figura 3.6.** Diagrama de Gantt. **Fuente.** Elaboración propia

# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

1. La desinfección de las aguas residuales es una práctica necesaria para evitar alterar el equilibrio en los ecosistemas a las que son vertidas. Para realizar esta tarea se pueden emplear diferentes métodos físico-químicos constituyendo la cloración uno de los más antiguos, pero todavía preferido tanto por sus posibilidades, como por sus relativos bajos costos.
2. La dosificación óptima de hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio para la desinfección de los residuales sanitarios de la Termoeléctrica de Cienfuegos con un nivel de significancia estadística del 95% son 7,4269 mg/L y 7,3930 mg/L respectivamente. El empleo del hipoclorito de calcio para la desinfección tiene las ventajas de facilitar el almacenaje y la transportación debido a que es más estable y, por su mayor contenido de cloro, ocupa menos espacio que el hipoclorito de sodio.
3. El sistema tecnológico propuesto consiste en dos tanques de concreto reforzado de 16 m<sup>3</sup> de volumen total que operan de manera discontinua, con un sistema de tuberías de ¾ in de acero galvanizado cuyos accesorios principales son 4 válvulas de bola, 3 codos y 1 Tee. Aunque resulta negativo la carencia de automatización el sistema propuesto tiene la ventaja de reducir los costos de inversión y operación.
4. El costo total de la construcción de la propuesta tecnológica asciende a 15 647 UM mientras que el costo de operación por el consumo de productos clorados es 42,61 UM usando hipoclorito de sodio y 165,05 UM hipoclorito de calcio y el costo de las tuberías y accesorios tiene un total de 44,23 UM. El análisis de los indicadores tradicionales para el análisis de inversiones no tiene sentido para la propuesta tecnológica presentada dado que su implementación se fundamenta en una necesidad medioambiental.

# RECOMENDACIONES

## **RECOMENDACIONES**

1. Presentar la propuesta tecnológica desarrollada en esta investigación a la dirección de la Empresa Termoeléctrica Cienfuegos para que sea valorada para su ejecución.
2. Establecer un sistema de monitoreo para el control del cloro residual a la salida del sistema de desinfección para asegurar el correcto funcionamiento del mismo, lo que puede ser apoyado con los análisis microbiológicos que realiza el Centro Provincial de Higiene y Epidemiología (CPHE) durante las auditorías.
3. Evaluar la posibilidad de montaje de un sistema de dosificación automático que manejara el proceso y dosificara el cloro según el flujo a la entrada en el momento dado y que se encargara además de abrir y cerrar las válvulas de flujo de entrada y salida de ambos tanques.

# BIBLIOGRAFÍA

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Alianza por el agua. (2008). *Monográficos. Agua en Centroamérica. Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Sevilla, España: Secretariado Alianza por el Agua, Ecología y Desarrollo.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Barreiro, E., & Ghislieri, D. (2011). *Eliminación de microorganismos. Desinfección*. Buenos Aires, Argentina: Departamento de Tecnología y Servicios Industriales.
- Benito, Y., & Arrojo, S. (2006). Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitación hidrodinámica. *Tecnología del agua. Tratamiento de efluentes, Volumen 1*, 4 p.
- Bolaños, I. (2006). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Diseño espacial y estructural de una planta de tratamiento de aguas residuales para la Universidad Tecnológica de la Mixteca*. Universidad Tecnológica de la Mixteca, La Mixteca, México.
- Brundtland, G. (1987). *Our Common Future*. Madrid, España: World Commission on Environment and Development (WCED).
- Carpentier, J. (2014). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Tratamiento de aguas residuales con lodos activados*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Buenos Aires, Argentina.
- Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). (2018). *Evaluación de los residuales líquidos en la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos*. Cienfuegos: Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC).
- César, E., & Vázquez, A. B. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales*. Distrito Federal de México, México: Fundación ICA, A.C.
- Christman, K. A. (2002). *Cloro*. Arlington, Texas, EE.UU: Consejo de Química del cloro.

CINU. (2003). *Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. Lima, Perú: Centro de Información de Naciones Unidas.

Comisión Europea. (2003). *Guía del análisis costes - beneficios de los proyectos de inversión*. Bruselas, Bélgica: Fondos Estructurales, FEDER, Fondo de Cohesión & ISPA.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Distrito Federal de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013). *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*. Distrito Federal de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

de Leon, R. A. (2017). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Civil. *Evaluación Técnica y propuesta de mejora de los filtros percoladores de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Rafael Landívar*. Guatemala de la Asunción, Guatemala: Universidad Rafael Landívar.

Díaz Betancourt, R. (2006). *Tratamiento de aguas y aguas residuales*. La Habana, Cuba: Félix Varela.

Giraldo, G. I. (1995). Trabajo presentado como requisito parcial para optar a la categoría de Profesor Asistente. *Manual de Análisis de Agua*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Gómez, Á. J., & Payán, J. A. (2008). Tesis de pregrado para optar al título de Tecnólogo Químico. *Evaluación de las condiciones de dosificación de cloro en la Planta de Tratamiento del Acueducto Cestillal - El Diamante "ACUCESDI"*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

Grupp, A. (2010). Universidad Tecnológica de Pereira. *Diseño de un modelo de planta para el tratamiento de aguas residuales domésticas con tanques fibratank*. Universidad Simón. Caracas, Venezuela.

- INRH. (2012). *Política Nacional del Agua*. Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Junta de Castilla y León. Consejería de Sanidad. (2009). *Manual de tratamientos del agua de consumo humano*. Castilla y León, España: Junta de Castilla y León. Consejería de Sanidad.
- LeChevallier, M., & Au, K.-K. (2004). *Water Treatment and Pathogen Control. Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water*. London, United kingdom: World Health Organization & IWA Publishing.
- Lizarazo Becerra, J. M., & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Lobelles, G. O. (2016). Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. *Metodología con enfoque de Economía Ecológica para la Gestión Integral de aguas sulfurosas en una refinería de petróleo*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Marín, J. P., & Correa, J. C. (2010). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua angustifolia Kunth*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- Metalcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. New York, EE.UU: McGraw-Hill.
- Montgomery, D. C. (2012). *Desing and Analysis of Experiments*. Arizona, EE.UU: John Wiley & Sons, Inc.
- Muñoz, A. (2008). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México.
- Nekrasov, B. (1980). *Hidráulica*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación.

- Oakley, S. M. (2005). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. Universidad Estatal de California. California, EE.UU
- Oficina Nacional de Normalización. (2007). NC 521: "Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas - Especificaciones". La Habana, Cuba: Cuban National Bureau of Standards.
- Olivas, E., Flores, J. P., Serrano, M., Soto, E., Iglesias, J., Salazar, E., & Fortis, M. (2011). Indicadores fecales y patógenos en agua descargada al Río Bravo. *Terra Latinoamericana*, 10 p.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Pérez, C. (Noviembre de 2017). Taller de Diseño de Experimentos. Impartido en el Centro de Estudios en Energía y Medio Ambiente, Instituto de Ingeniería UABC: Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
- Pérez, J., & Espigares, M. (1995). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Desinfección del agua. Cloración*. Universidad de Granada. Granada, España.
- Perry, R. H. (2008). *Perry's Chemical Engineering Handbook*. New York, EE.UU: McGraw-Hill.
- Peters, M., & Timmerhaus, K. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. New York, EE.UU: McGraw-Hill.
- Pinzón, L., & Almeida, O. (2010). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Diseño, construcción y puesta en marcha de un modelo de tratamiento para las aguas residuales generadas en la producción de panela*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

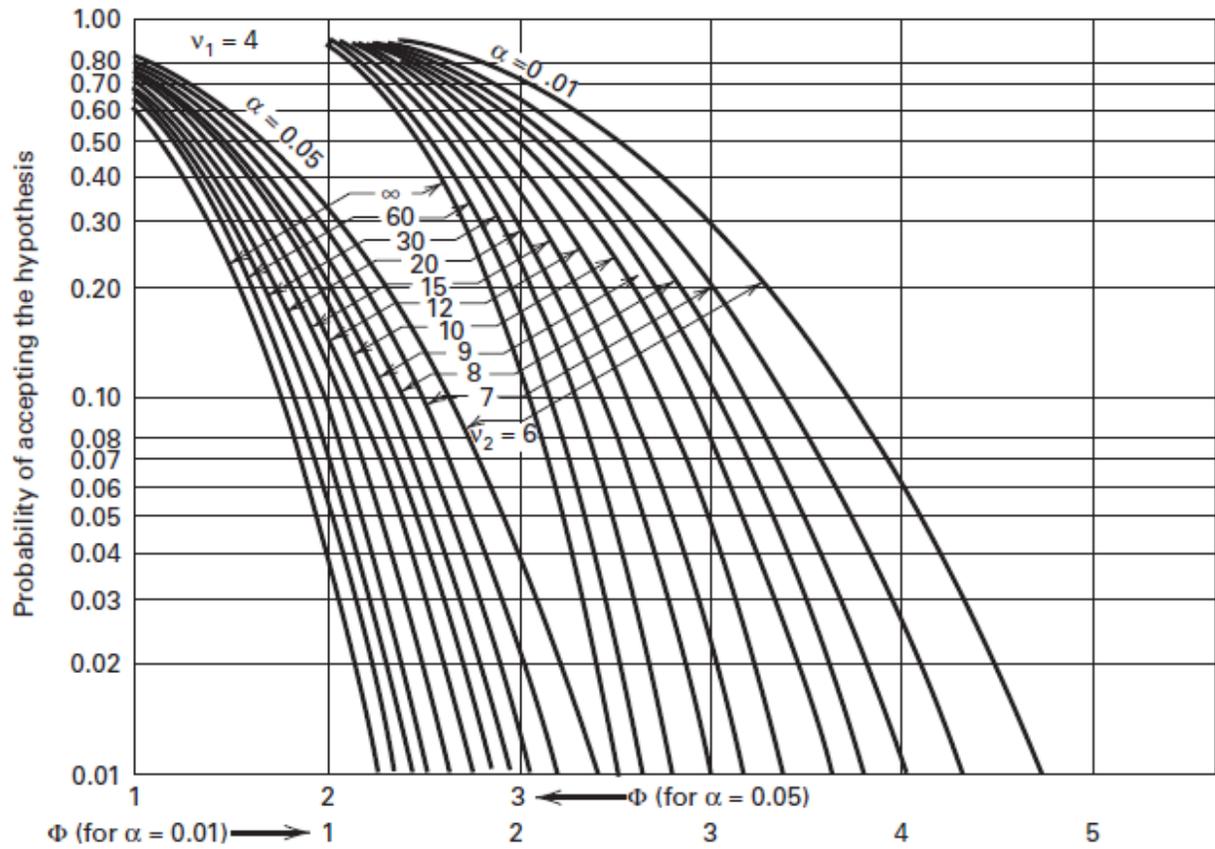
- Programa de Agua Potable y Alcantarillado (PROAGUA). (2017). *Manual para la cloración en sistemas de abastecimiento de agua potable en el ámbito rural*. Lima, Perú: Cooperación Alemana al Desarrollo – Agencia de la GIZ en el Perú.
- Quiroz, P. A. (2009). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- Ramalho, R. S. (2006). Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Químico. *Tratamiento de Aguas Residuales*. Laval University. Faculty of Science and Engineering. Quebec, Canadá.
- Reyes, M. G. (2016). *Uso del cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas: Desinfección y formación de subproductos*. Durango, México: CIIDIR-IPN Durango.
- Rosabal, J. M., & Garcell, L. (2010). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas* (Vol. Tomo I). La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela.
- Sainz, J. A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Madrid, España: Fundación EOI.
- Sandoval, A. M., & Carlos, G. (1991). Tesis de pregrado para optar al título de Tecnólogo Químico. *Adiestramiento para la prevención y control de las enfermedades gastrointestinales en el sector agua. Determinación de Coliformes Fecales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Distrito Federal de México, México.
- Sigler, A., & Bauder, J. (2012). Coliforme Total y la Bacteria E. coli. *Well Educated*, 2 p.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2012). *Principles and Practice of Automatic Process Control*. La Habana, Cuba: Félix Varela.
- UNESCO 2017. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales. El recurso desaprovechado*. Fontenoy: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura .

**ANEXOS**

# ANEXOS

## Anexo 1

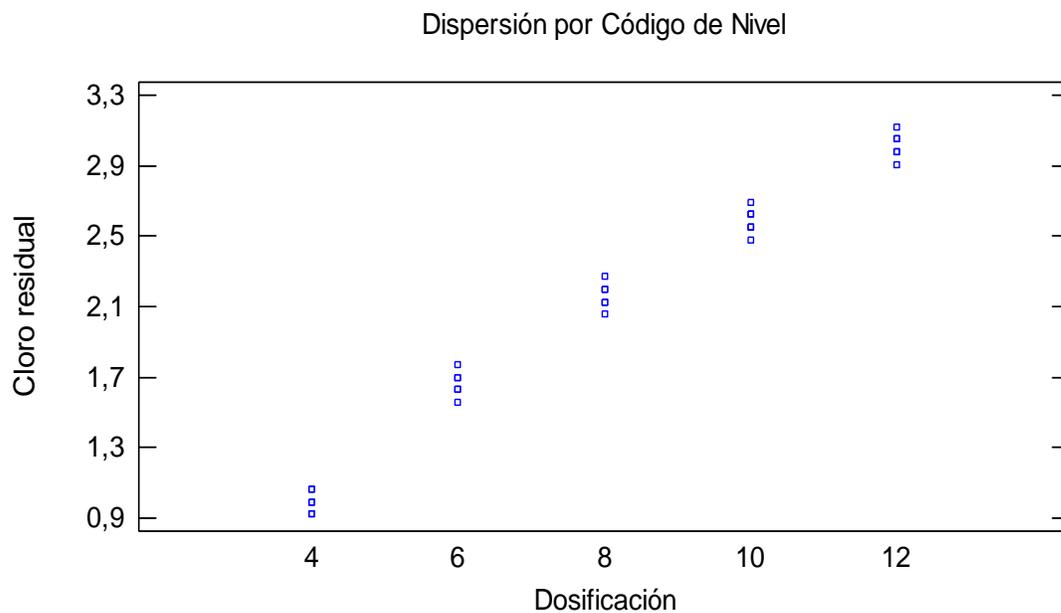
Curva de operación característica para el cálculo de  $\beta$ .



Fuente. (Montgomery, 2012)

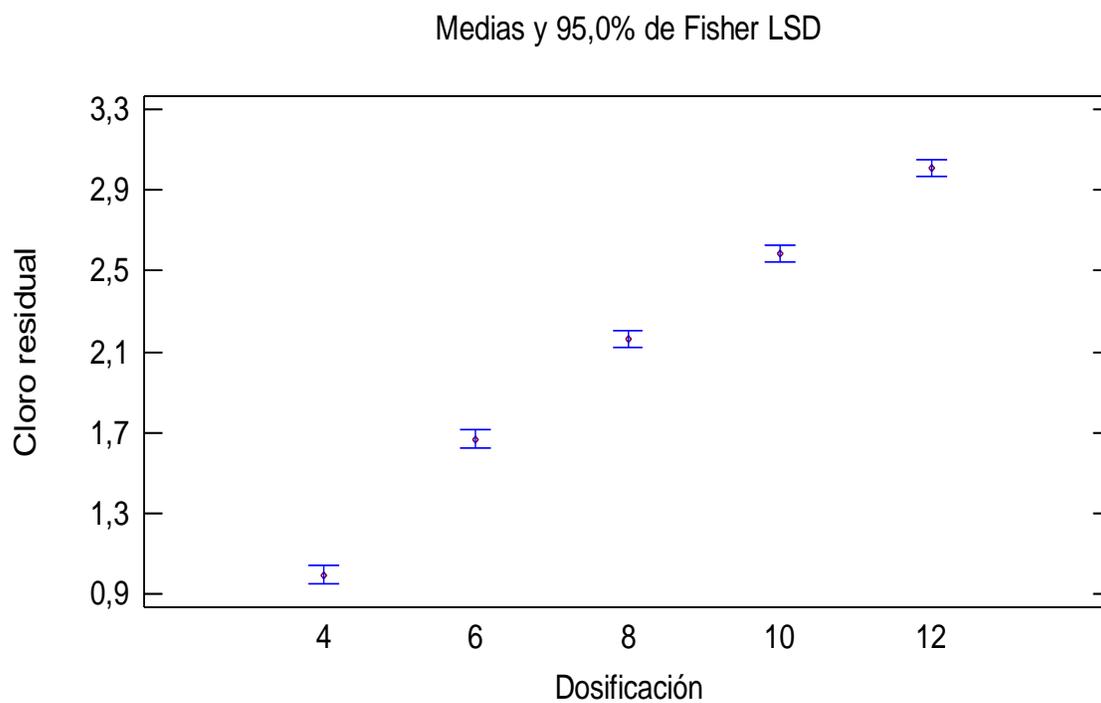
## Anexo 2

Gráfico de Dispersión para el Hipoclorito de sodio



**Fuente.** Elaboración propia

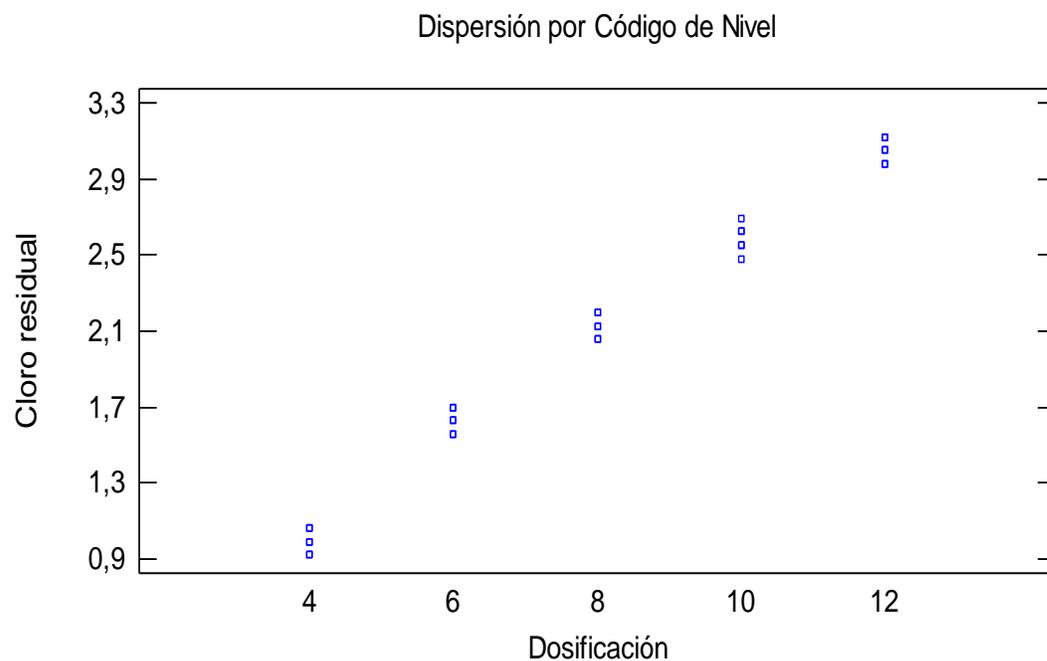
Gráfico de Medias y de Fisher LSD para el Hipoclorito de sodio



**Fuente.** Elaboración propia

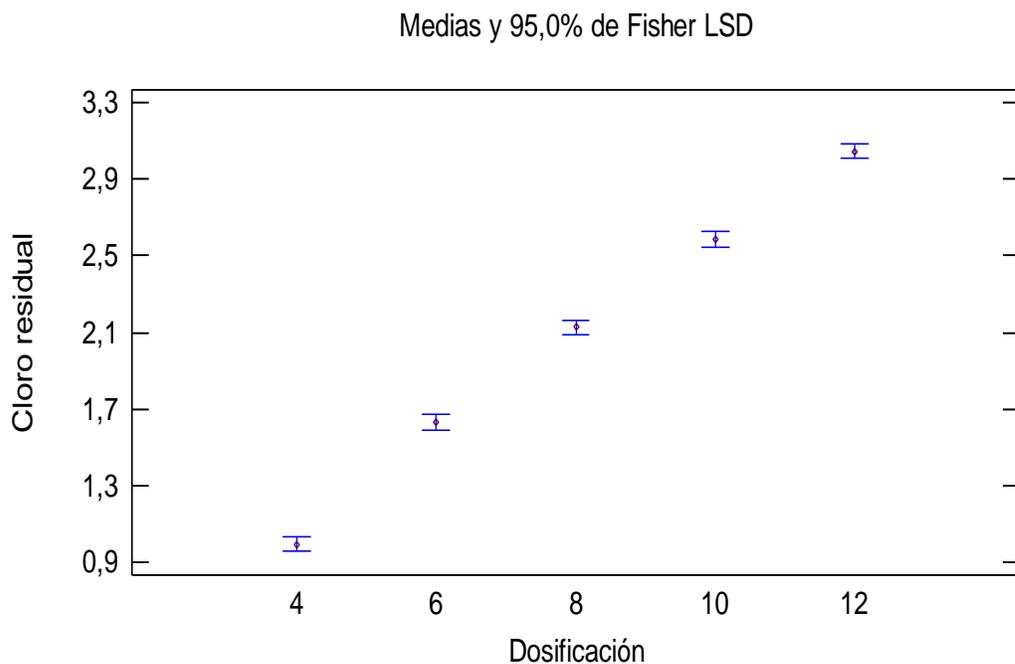
### Anexo 3

Gráfico de Dispersión para el Hipoclorito de calcio



**Fuente.** Elaboración propia

Gráfico de Medias y de Fisher LSD para el Hipoclorito de calcio



**Fuente.** Elaboración propia

#### Anexo 4

Tabla de datos del análisis de Regresión simple para el hipoclorito de sodio.

<b>Modelo</b>	<b>Correlación</b>	<b>R-Cuadrada</b>
Raíz Cuadrada de X	0,9952	99,04%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9951	99,03%
Curva S	-0,9938	98,77%
Logaritmo de X	0,9937	98,75%
Cuadrado de Y	0,9930	98,61%
Lineal	0,9904	98,09%
Cuadrado Doble	0,9903	98,07%
Raíz Cuadrada Doble	0,9900	98,01%
Multiplicativa	0,9892	97,86%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9868	97,39%
Doble Inverso	0,9865	97,31%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9857	97,17%
Raíz Cuadrada de Y	0,9788	95,81%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9775	95,56%
Inversa de X	-0,9727	94,62%
Cuadrado-Y Log-X	0,9720	94,49%
Cuadrado de X	0,9658	93,27%
Exponencial	0,9602	92,19%
Inversa-Y Log-X	-0,9581	91,80%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9430	88,92%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9281	86,14%
Log-Y Cuadrado-X	0,9135	83,45%
Inversa de Y	-0,9064	82,15%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8416	70,82%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

## Anexo 5

Tabla de datos del análisis de Regresión simple para el hipoclorito de calcio.

<b>Modelo</b>	<b>Correlación</b>	<b>R-Cuadrada</b>
Raíz Cuadrada de X	0,9963	99,26%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9962	99,23%
Cuadrado Doble	0,9941	98,82%
Lineal	0,9940	98,81%
Raíz Cuadrada Doble	0,9935	98,70%
Curva S	-0,9926	98,52%
Multiplicativa	0,9926	98,52%
Logaritmo de X	0,9922	98,45%
Cuadrado de Y	0,9920	98,40%
Doble Inverso	0,9892	97,85%
Raíz Cuadrada de Y	0,9847	96,97%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9832	96,66%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9830	96,63%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9821	96,44%
Cuadrado de X	0,9739	94,84%
Exponencial	0,9679	93,69%
Inversa de X	-0,9662	93,36%
Cuadrado-Y Log-X	0,9658	93,27%
Inversa-Y Log-X	-0,9645	93,03%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9530	90,82%
Log-Y Cuadrado-X	0,9250	85,56%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9171	84,11%
Inversa de Y	-0,9161	83,93%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,8539	72,92%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

## Anexo 6

Tabla de dimensiones de las tuberías de acero.

Tabla 10  
*DIMENSIONES DE LAS TUBERÍAS DE ACERO*

Diámetro nominal (DN), in	Diámetro externo (DE), in	mm	Característica o tipo <sup>a</sup>	Diámetro (DN), in	interno mm
1/8	0,405	10,29	s	0,269	6,83
			ef	0,215	5,461
1/4	0,540	13,72	s	0,364	9,25
			ef	0,302	7,67
3/8	0,675	17,15	s	0,493	12,52
			ef	0,423	10,74
1/2	0,840	21,34	s	0,622	15,80
			ef	0,546	13,87
3/4	1,05	26,67	s	0,824	20,93
			ef	0,742	18,85
1	1,32	33,53	s	1,049	26,64
			ef	0,957	24,31
1 1/4	1,66	42,16	s	1,380	35,05
			ef	1,278	32,46
1 1/2	1,90	48,26	s	1,610	40,90
			ef	1,500	38,1

**Fuente.** (Rosabal & Garcell, 2010)