

 REPUBLICA CUBANA	Proyectos de Construcción POZOS DE RECARGA Especificaciones de proyectos y métodos de cálculo	 53-181 1986

Construction Designs,
Recharge Wells. Design
Specifications and
Calculation Methods

Проекты строительства. Резервуары пополняе.
Спецификаци проекты и метода расчета

Esta norma establece las especificaciones de proyectos de los pozos de recarga para aguas limpias provenientes de las precipitaciones atmosféricas, de los drenajes superficiales o de canales o embalses especialmente contruidos para este fin.

1. Generalidades

1.1 La presente norma se aplicará a:

- Condiciones de flujo permanente o quasi permanente
- Acuíferos isótropos u homogéneamente anisótropos
- Acuíferos homogéneos o quasi permanente
- Acuíferos isótropos u homogéneamente anisótropos
- Acuíferos homogéneos o macroscópicamente homogéneos
- Pozos completamente penetrantes e incompletos
- Pozos aislados, que no interfieren entre sí, durante la recarga

Aguas no contaminadas, poco azolvadas.

1.2 Los casos no contemplados en la presente norma son:

- Cálculo de pozos de recarga en régimen impermanente
- Interferencia de pozos durante la recarga, en régimen permanente y en régimen impermanente
- Pozos de drenaje para evacuación de residuales deberán ser objeto de normas específicas

2. Términos y definiciones

2.1 Acuíferos. Estrato o formación geológica que permite la circulación y almacenamiento, o una de las dos funciones, de cantidades significativas de agua en sus poros, grietas u oquedades, y que el hombre pueda extraer para cubrir sus necesidades.

Aprobada
Diciembre 1988

ESTA NORMA ES OBLIGATORIA

Vigente a partir de
Noviembre 1989

2.2 Acuífero no confinado. Aquel en el que el nivel de agua actúa como la superficie superior de la zona de aereación.

Término permisible: Acuífero libre

2.3 Acuífero confinado. Aquel en el que el agua de los mismos está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, ocupando la totalidad de los poros u oquedades de la formación geológica que los contiene, acción provocada por un estrato impermeable suprayacente.

Término permisible: Acuífero con presión

2.4 Porosidad eficaz. Volumen de agua contenido en los poros de la roca, que puede ser liberada por la acción de la gravedad.

2.5 Coefficiente de almacenamiento. Volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado, cuando se produce un descenso unitario del nivel piezométrico o de carga hidráulica.

2.6 Transmisividad. Caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado, bajo la acción de un gradiente unidad a una temperatura fija determinada.

2.7 Conductividad hidráulica Darciana. Caudal que pasa por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente, también unitario, a una temperatura fija o determinada, siempre y cuando se cumplan las condiciones de circulación de Darcy, o de régimen lineal de flujo.

2.8 Conductividad hidráulica turbulenta. Caudal que se presenta cuando las condiciones de circulación no obedecen a la ley de Darcy, y el régimen de flujo es turbulento puro.

2.9 Conductividad hidráulica no lineal. Caudal que se presenta cuando las condiciones de circulación no obedecen a la ley de Darcy, y el régimen de flujo es no lineal.

2.10 Medio homogéneo. Aquel que tiene propiedades constantes en cualquier lugar del mismo.

2.11 Medio heterogéneo. Aquel cuyas propiedades varían de un lugar a otro del mismo.

2.12 Medio macroscópicamente homogéneo. Aquel medio heterogéneo en que sus propiedades, promediadas en un cierto volumen de material alrededor de cada punto considerado, no varían de un lugar a otro.

Nota. Un medio facturado puede ser prácticamente homogéneo frente a un ensayo de bombeo de larga duración ($R \approx 50$ a $1\ 000$ m) y heterogéneo frente a un ensayo corto ($R < 50$ m)

- 2.13 Medio hidráulico isótropo. Aquel en que sus propiedades, en especial la permeabilidad, no dependen de la orientación, o sea, que es igual en cualquier dirección que se considere.
- 2.14 Medio hidráulico anisótropo. Aquel en que sus propiedades varían con la orientación.
- 2.15 Régimen permanente. Aquel que no produce cambios en el almacenamiento del acuífero, siendo éste menor transmisor de la recarga natural, o sea, cuando el cono de influencia se extiende de forma tal que la cantidad de agua producida a consecuencia del descenso de nivel iguale a la extraída por el pozo.

Nota. Si el descenso continúa, pero con una velocidad tan pequeña que pueda considerarse el nivel como estabilizado, se dice que se ha alcanzado un régimen quasi estacionario (acuífero de extensión infinita)

Término permisible: Régimen estacionario

- 2.16 Régimen impermanente. Aquel en que el caudal que se extrae procede de almacenamiento del acuífero, no alcanzándose equilibrio en el descenso del nivel, el cual aumenta constantemente.

Término permisible: Régimen no estacionario

- 2.17 Radio de influencia del pozo. Distancia a partir de la cual se consideran nulos los descensos producidos por el bombeo del pozo.
- 2.18 Pozo totalmente penetrante. Aquel cuya zona filtrante abarca la totalidad del espesor del acuífero.
- 2.19 Pozo incompleto. Aquel cuya zona filtrante abarca una parte del espesor del acuífero.
- 2.20 Pozo parcialmente penetrante. Pozo incompleto en el que su zona filtrante se inicia en el techo o en la base del acuífero.
- 2.21 Recarga artificial. Conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mayor explotación del acuífero por aumento de sus recursos, creación de reservas, combatir la intrusión marina y la contaminación, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua.
- 2.22 Pozo de recarga. Aquel que se construye para recibir agua desde la superficie e introducirlas a las formaciones acuíferas subterráneas.

Nota. Mediante estos pozos se puede recargar todas las capas permeables que se estima necesario.

3. Sistemas empleados para realizar la recarga artificial.

3.1 Los sistemas de recarga artificial se agrupan en tres tipos.

3.1.1 Sistemas de recarga en superficies

- Zanjas, trincheras; balsas
- Acondicionamiento de causes de ríos o canales de drenaje mediante pequeños diques, ensanchamiento, escarificaciones y otros
- Fosas de recarga que alcancen formaciones permeables
- Presas para retener avenidas en zonas permeables de grandes piscinas.

3.1.2 Sistema de recarga en profundidad

- Pozos verticales
- Pozos de drenes radiales
- Galerías de infiltración

3.1.3 Sistemas mixtos

- Presas con pozos de recarga en su vaso
- Zanjas y balsas con pozos de recarga verticales o drenes radiales

4. Consideraciones generales del proyecto

Para la elaboración de los proyectos de pozos de recarga se tendrán en cuenta los siguientes aspectos.

- 4.1 Criterios económicos que justifiquen la necesidad de realizar la recarga.
- 4.2 Fundamentación de la posibilidad de utilizar con éxito la recarga artificial.
- 4.3 Investigaciones hidrológicas para evaluar la disponibilidad de agua para la recarga, y definición de las fuentes de abasto.
- 4.4 Investigaciones hidrogeológicas necesarias para definir
 - El tipo y composición litológica del acuífero, la porosidad y capacidad de almacenamiento del nivel no saturado
 - Los recursos y reservas hídricas del acuífero, sus parámetros hidrológicos fundamentales.

- El rendimiento de los pozos de recarga en función de los parámetros hidrológicos, distribución especial de caudales específicos determinados por ensayos de bombeo
- El tipo de flujo existentes en el acuífero, en condiciones naturales y en las inmediaciones de los pozos con el objeto de adoptar el método de cálculo más apropiado
- La posibilidad de colmatación del acuífero en las inmediaciones del pozo y el efecto del aire arrastrado por el agua de recarga, en el rendimiento del pozo.
- Si pueden o no, ocurrir asentamientos del terreno en las proximidades de los pozos de recarga (acuíferos libres)
- La existencia o no de barreras que impidan el movimiento horizontal del agua en el acuífero.
- La existencia o no de formas cársticas de absorción que puedan transformarse por ascensos en el nivel de las aguas subterráneas en emisoras con la subsiguiente inundación de terrenos
- Las oscilaciones del nivel del agua en el acuífero con relación a las variaciones climáticas, y a las extracciones ocasionadas por la acción del hombre.
- Las variaciones en la composición fisicoquímica y de calidad de las aguas subterráneas, en condiciones naturales
- Determinar la composición fisicoquímica y biológica de las aguas seleccionadas para ser utilizadas como fuente para la recarga, su compatibilidad con la subterránea, los problemas que pueden ocasionar la posible incompatibilidad. La calidad del agua para la recarga se fijará según:
 - 1) El uso que vaya a darse al agua resultante de la mezcla
 - 2) Las posibilidades de tratamiento previa
 - 3) Las posibilidades de colmatación del acuífero con materias procedentes del exterior
 - 4) El ataque destructivo que pueda ocasionar un agua agresiva a la formación acuífera o a la estructura del pozo y a ambos.
- Proyecto del pozo vertical, según las condiciones locales, y que comprenderá la elección de:
 - 1) La profundidad óptima del mismo

- 2) El método de perforación utilizable
 - 3) El o los diámetros de la perforación
 - 4) El o los diámetros de la camisa y tipo del enca-
misado (liso, ranurado o ambos)
 - 5) El tipo de ranurado (rejilla) y por ciento del
mismo, así como la distribución de la rejilla en
profundidad
 - 6) El relleno de grava (si se requiriera), su proyec-
to y la técnica para la colocación del mismo.
 - 7) El desarrollo del pozo (por bombeo, hielo seco,
u otro procedimiento)
 - 8) El aforo del pozo (ensayo de bombeo) para determi-
nar los parámetros hidrogeológicos
 - 9) La determinación de la calidad del agua y sus po-
sibles cambios durante el aforo.
 - 10) El ensayo de recarga en el pozo (no obligatorio,
muy recomendable) sólo exigible para proyectos
importantes, la comprobación del caudal específico
y de la posibilidad de regurgitaciones violentas
originadas por la introducción de aire dentro del
acuífero, proyecto de perforaciones adicionales,
entubadas, muy próximas al pozo, para la expulsión
de este aire.
- Proyecto de las obras estructurales externas, atendien-
do al tipo de fuente de abasto y a su facilidad o no
de captación.

Estas obras se agrupan en:

- 1) Obras externas elementales. Cuando las aguas son
limpias y no se prevé la presencia de contaminan-
tes peligrosos. Entre estas obras se incluirán:
 - Camisa exterior ranurada de diámetro grande
 - Rejilla contra objetos de tamaños apreciables
 - Cajas sedimentadoras y filtros elementales de
grava gruesa o rajón.
- 2) Obras externas complejas. Cuando las aguas presen-
tan contenidos considerables de azolves pero sin
contaminantes peligrosos. Entre estas obras se
incluirán:
 - Además de las mencionadas anteriormente, los
filtros de grava y arena, dimensionados según el
agua utilizada y las estructuras hidrométricas
para evaluar los volúmenes recargados.

5. Pozos de recarga para utilizar en las formaciones cársicas

5.1 De acuerdo a los siguientes criterios se agruparán en dos grupos.

5.1.1 Grupo 1. Para evacuar aguas provenientes de la escorrentía superficial y conducidos mediante ríos, arroyos, canales para los embalses, lagunas, en sus cotas más altas, situándose en sus orillas.

Al grupo 1 pertenecen los prototipos A-1 y A-2 (véanse Anexos A y B respectivamente).

5.1.2 Grupo 2. Para evacuar aguas provenientes de las precipitaciones y que pueden inundar áreas de forma permanente o temporal, para mantener niveles fijos en lagunas y embalses, drenaje vertical de excedentes y otros.

Al grupo 2 le pertenecen los prototipos B-1 y B-2 (véanse Anexos C y D respectivamente).

5.1.3 Los prototipos representados en los Anexos A, B, C y D no constituyen proyectos típicos de pozos de recarga, sino prototipos que se seguirán en el proyecto de pozos de recarga adaptándolos a cada situación particular. En todos los casos se realizarán estudios especiales para la adecuación de éstos a las condiciones específicas del lugar.

5.1.4 En los Anexos se describen de forma detallada cada pozo y su proyecto propuesto, así como sus limitaciones de aplicación con excepción de la perforación y el encamisado que serán tratados de forma separada.

6. Procedimiento para contrarrestar los efectos ocasionados por la introducción de aire en el acuífero

6.1 Manteniendo el encamisado del pozo por debajo del nivel freático (acuífero libre) y dentro del acuífero (en los confinados)

6.2 Se perfora un pozo o cala auxiliar (o más, de ser necesarios) en dirección agua abajo del principal, de 100 mm de diámetro, totalmente encamisado (camisa plástica o metálica) hasta aproximadamente la profundidad de la del pozo.

Se fijará mediante una base el terreno, para evitar su destrucción. Esta cala se ubicará dentro del área del radio turbulento determinado siguiendo las direcciones más carsificadas de la formación. De no conocerse el radio turbulento se situará la cala lo más cercana al pozo, que técnica y prácticamente resulte posible.

6.3 La proyección y construcción de tubería conductora del agua desde el exterior hasta por debajo del nivel de las aguas en el pozo no resulta práctico para el caso de grandes caudales ($Q_R > 50 \text{ l/s}$), por lo cual se utilizará

esta solución solamente en situaciones muy especiales, donde se ponga en peligro con certeza la estabilidad del pozo.

7. Descolmatación de los pozos

- 7.1 El método más utilizado para restablecer la capacidad de infiltración es el bombeo intenso intermitente del pozo o caudal superior al de recarga. Si el pozo es de doble propósito (recarga y bombeo alternados), la descolmatación se producirá de forma sistemática, o al menos se incrementará sensiblemente el tiempo de ocurrencia de la colmatación.
- 7.2 El uso de hielo seco (aún sin experimentar en zonas cársticas) o nieve carbónica, puede resultar económico y eficiente.
- 7.3 Procediendo al bombeo se efectuará una limpieza del pozo con equipos de perforación. Si se estimase necesario el técnico encargado del mantenimiento del mismo.

En el proyecto del pozo se preverá el mantenimiento periódico del mismo, y se proyectará para soportar el peso de una máquina de perforación y la instalación de los equipos de bombeo necesarios.

8. Especificaciones de proyecto

Se proyectará la salida con relativa facilidad de un pozo durante el bombeo, pues la entrada al acuífero se dificulta por la incorporación de aire durante la recarga lo que, junto con la entrada de partículas en suspensión colaboran en la disminución de su rendimiento (caudal específico). Para evitar esto (o al menos reducir económicamente sus efectos) es necesario:

- 8.1 Proyectar el filtro exterior de forma tal que reduzca la entrada de azolves, sedimentos y otros, sin incrementar considerablemente el tamaño de las obras y por lo tanto, el costo de los trabajos.
- 8.1.1 La proyección de los filtros externos de las obras de captación se realizará partiendo de que las aguas a utilizar en la recarga son limpias o ligeramente azolvadas.

Para determinar el diámetro D_f del filtro externo se aplicará.

$$D_f = \text{Antilog } (Z)$$

siendo:

$$Z = \frac{R_{ms}^2 + 44,0 \lg d_m - 35,2 \lg R_i - 47,8}{29,8}$$

basado en R_{ms}^3

donde:

R_{ms}^3 reducción porcentual en peso de materia (%) en suspensión por el filtro,

d_m tamaño medio de los granos que conforman el material del filtro, (m)

R_i Ritmo de la infiltración (m/d)

donde:

$$L^3$$

Igualmente para un filtro diseñado o construido se determinará R_{ms}^3 por:

$$R_{ms}^3 \approx 29,8 \lg D_f - 44,0 \lg d_m - 35,2 \lg R_i + 47,8$$

donde:

D_f diámetro o anchura del filtro exterior de un pozo de recarga, tomándose según el prototipo del mismo (mm)

La reducción resultará efectiva para filtros de espesor considerables, donde predominen granos finos y con un ritmo de recarga bajo.

- 8.1.2 En los prototipos de pozos de recarga (véanse Anexos A, B, C y D), los filtros están compuestos principal y únicamente de grava y rajón (y a veces gravilla). Para la selección del tamaño de los materiales para los filtros se utilizarán los criterios siguientes:

$$\frac{D_{15} \% \text{ rajón}}{D_{15} \% \text{ grava}} > 5 > \frac{D_{15} \% \text{ rajón}}{D_{85} \% \text{ grava}}$$

donde:

$D_{15} \%$ abertura por la que pasa el 15% del material dado

Siendo:

- Para rejillas con orificios circulares

$$D_{85} \% \geq 1,5 D_{ac}$$

- Para rejillas con juntas abiertas o ranuras

$$D_{15} \% \geq 1,2 D_{ac}$$

donde:

D_{ac} anchura de la junta o ranura (mm)

- 8.1.3 Las aberturas hechas en la camisa del pozo, en contacto con el filtro externo, podrán ser: circulares, alargadas, horizontal o verticalmente, en persianas, y otros, o hechas mediante entrecruzamiento de cabillas.

9. Requisitos sanitarios

Para la proyección de un pozo de recarga, su ubicación aguas abajo de uno de bombeo o su ubicación aguas arriba de uno de bombeo, se establecen los siguientes requisitos sanitarios.

- 9.1 Distancia mínima de proyecto de un pozo de recarga a uno de bombeo, situado aguas abajo de este último.

- 9.1.1 Caso A. Cuando el pozo de recarga reciba el mismo caudal de agua que la que se bombea en el pozo de abasto.

$$Q_R \leq \sum Q_B$$

donde:

Q_R caudal de agua recargada que recircula en un pozo del que se bombea, (m³)

Q_B caudal de extracción del pozo, (m³)

- Para acuífero confinado

$$d_{\min} \geq \frac{\alpha_o Q_R}{K_D m I_n} = \frac{\alpha_o Q_R}{m q_n} \quad (\alpha_o = 1,20 \text{ a } 1,30)$$

donde:

α_o factor de seguridad para el cálculo del d_{\min} , y que varía de 1,2 a 1,3 en dependencia de la precisión en la determinación de T y de I_n

Siendo

d_{\min} distancia mínima a la que puede ubicarse un pozo de recarga o uno de bombeo indistintamente aguas arriba o aguas abajo el uno del otro, según el caso (m)

- T coeficiente de transmisividad, (m^2/d)
 I_n gradiente hidráulico del flujo natural ($L-l^{-1}$)
 m Espesor del acuífero confinado, (m)
 q_n flujo del agua subterránea por unidad de sección del acuífero, normal al primero (velocidad de Darcy) (m/d) Es igual a $K_D \cdot I_n$
 - Para acuífero libre

$$d_{\min} \geq \frac{\alpha_o Q_R}{\pi K_D I_n} = \frac{\alpha_o Q_R}{\eta H_o q_n} \quad (\alpha_o = 1,20 \text{ a } 1,30)$$

donde:

H_o espesor saturado inicial en el pozo (m)

Nota. Ambos casos para condiciones de flujo lineal en el pozo y en el acuífero.

- 9.1.1.1 Cuando se vayan a analizar situaciones existentes en los que se requiera ubicar un pozo de recarga en un punto fijo aguas abajo de uno de bombeo, se utilizará la curva de la Fig. 1 y con la que se determinará el por ciento de agua de recarga que puede recircular. Se calculará primero:

$$\alpha = \frac{2 Q_R}{\pi d_o T I_n} = \frac{2 Q_B}{\pi d_o T I_n} = \frac{q_B}{\pi m d_o q_n}$$

se buscará en la gráfica la relación $\frac{Q_R}{Q_B}$ y como

Q_B es conocida se obtiene

Q_R , cuando $Q_B = Q_R$. Pasa $Q_R < Q_B$, este valor resultará inferior al calculado

Siendo

- Q_R caudal probable de recarga (m^3/d)
 d_o separación entre el pozo de recarga y el bombeo (m)
 q_B caudal específico real para el caudal de proyecto según un ensayo de 24 horas de duración (m^2/d)
 m espesor del acuífero confinado (m)

- 9.1.1.2 Cuando el pozo de recarga no esté saturado directamente aguas abajo del bombeo, en la dirección del flujo subterráneo, se utilizará el ábaco que aparecen en la Fig. 2 para determinar el d_{min} .

Se definirá primero el ángulo β . Siendo $\alpha = \frac{1}{2} d_0$.

El punto A indicará el ángulo que da la recirculación mínima y B el máximo. Así:

- Para $\beta = 0^\circ$, el pozo de recarga estará situado directamente aguas abajo del bombeo
- Para $\beta = 180^\circ$, circulará toda el agua recargada.

Nota. Los valores negativos de $\frac{Q_R}{Q_B}$ indicará que no hay recirculación

- 9.1.2 Caso "B". Cuando el pozo de recarga reciba un caudal superior al que se extrae del bombeo (o del grupo de pozos, de ser varios)

$$Q_R > \sum Q_B$$

- Para acuíferos confinados (véase Fig. 3)
- a) Considerándose que la transmisividad es igual en el área de los pozos de bombeo y de recarga. Ej. Acuífero con flujo natural.

Régimen permanente

$$d_{min} \approx \alpha_0 (d_B + d_R)$$

donde:

d_B distancia del pozo de bombeo al límite de su influencia aguas abajo (m)

d_R distancia del pozo de recarga al límite de su influencia, aguas abajo (m)

Siendo

$$d_B = \frac{Q_B}{2 \pi T I_n} \quad (\text{Pozo de bombeo trabajando solo})$$

$$d_R = \frac{Q_R}{2 \pi T I_n} \quad (\text{Pozo de recarga trabajando solo})$$

$\alpha_o = 1,20$ (con suficiente información hidrogeológica)

$\alpha_o = 1,30$ (con deficiente información hidrogeológica).

- Para acuíferos libres o no confinados (véase Fig.4)

a) Considerando conductividad hidráulica constante para ambos pozos

$$d_{\min} \approx \alpha_o (d_B + d_R) \text{ con } \alpha_o = 1,20 \text{ a } 1,30$$

$$d_B \approx \frac{Q_B}{K_D (h_a + h_n) (l_a)} \quad y$$

$$d_R \approx \frac{Q_R}{K_D (h_a + h_b) (l_a)}$$

donde:

K_D conductividad hidráulica Darciana

h_a carga hidráulica en el pozo de bombeos, aguas abajo del mismo (nivel freático inclinado), (m)

h_b carga hidráulica en el pozo de bombeo, aguas arriba del mismo (nivel freático inclinado), (m)

b) Considerando conductividades hidráulicas diferentes para ambos pozos

$$d_{\min} \approx \alpha_o (d_B + d_R) \text{ con } \alpha_o = 1,20 \text{ a } 1,30$$

Siendo

$$d_B \approx \frac{Q_B}{\pi K_B (h_a + h_b) (l_a)}$$

$$d_R \approx \frac{Q_R}{K_D (h_a + h_b) (l_a)}$$

9.2 Distancia mínima de un pozo de recarga a uno de bombeo, situado aguas arriba de este último.

- Se aplicará a aguas de escorrentía superficial o embalsados que no arrastran elementos no biodegradables, tóxicos, patógenos y otros.

- Se limitará sobre posibles contaminaciones biológicas ligeras, que el medio subterráneo deberá depurar
- Se consideran aguas compatibles físico y químicamente con las del acuífero
- Para todos los casos se considera el d_{\min} coincidente con la dirección del flujo subterráneo.

9.2.1 Caso "A". Acuífero libre, flujo laminar y régimen permanente (véase Fig. 5)

$$d_{\min} \geq 1,2 \quad d_{tD} \quad \text{y} \quad d_{tD} \approx v_a \quad t_D$$

Siendo $t_D = 75$ a 100 días

donde:

t_D tiempo de retardo de la llegada del agua, tomada considerando la duración de vida de algunos microorganismos, (d).

d_{tD} distancia medida desde el pozo de bombeo, en dirección aguas arriba del mismo en el sentido del flujo y que se considera a partir del tiempo de vida en el agua de ciertas bacterias. (m).

v_a velocidad del flujo de agua hacia el pozo, determinada por trazadores o mediante cálculos, (m/d)

9.2.1.1 Para acuíferos de rocas carsificadas de canales pequeños, y para las rocas de fisuras pequeñas, $t_d \leq 75$ días (cuando pueden ser comparables con los medios porosos)

9.2.1.2 Para acuíferos de rocas muy carsificadas y grandes canales de distribución, $t_D \approx 150$ días

9.2.1.3 v_a se podrá determinar directamente mediante trazadores o indirectamente, siguiendo los procedimientos que se establecen a continuación

a) Si $d_{tD} < R$

Se comprueba que para el t_D dado, el flujo natural recorre en ese tiempo

$$d_n = K_D \quad I_n \quad t_D$$

Siendo $d_n = d_{tD}$

Para calcular V_a se aplica la fórmula

$$V_a = \frac{KD}{\mu} \cdot \frac{(H_o^2 - H_p^2)}{(H + H_p)} \cdot \frac{1_n r_p}{1_n R_p}$$

$$i_f = \frac{H - H_p}{r}$$

donde:

H_p espesor saturado en el pozo, durante el bombeo, en un acuífero libre, (m)

H espesor saturado en el acuífero a una distancia r del pozo de bombeo, (m)

H_o espesor saturado inicial en el acuífero, (m)

r_p radio del pozo, (m)

r distancia desde el pozo de bombeo a un punto influenciado por este último, dentro del acuífero, (m)

i_i gradiente hidráulico a cualquier distancia a partir del pozo bombeado, y dentro del radio de influencia, (m)

μ coeficiente de almacenamiento (adimensional)

R se calculará por:

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{K_D H_D}{\mu}} = 1,5 \sqrt{at}$$

ya que se conocen K_D y μ

donde:

a difusividad del acuífero, que es igual

$$a: \frac{T}{\mu} \text{ (m}^2/\text{d)}$$

t tiempo que se considera para el estudio, (d)

9.2.1.3.1 El radio de influencia podrá ser determinado también utilizando el estado final del periodo de recuperación de niveles.

$$R = 1,59 \sqrt{\frac{a (t_2' - t_1')}{\lg S_1' - \lg S_2'}}$$

para acuíferos confinados y libres o no confinados.

Para acuíferos no confinados, el coeficiente de difusividad a se calculará por

$$a = a_B = \frac{KH_0}{n_e} \quad y$$

para el confinado, por:

$$a = \frac{K \cdot m}{n_e} = \frac{K}{\gamma_a \beta}$$

donde:

a_B difusividad hidráulica en acuíferos libres (parámetro de BOUSSINESQ), (m^2/d)

K permeabilidad geométrica, intrínseca o física, (m^2)

H_0 espesor saturado inicial en el pozo, en acuífero libre, (m)

n_e porosidad efectiva o eficaz (adimensional)

$$\text{Siendo } n_e = \gamma_a m \beta = \gamma_{am} (n \beta_a + \beta_r)$$

donde:

n porosidad del estrato acuífero (adimensional)

γ_a densidad del agua, (kg/m^3)

m espesor del acuífero confinado, (m)

β coeficiente de almacenamiento elástico del acuífero (m^2/kg)

β_a coeficiente de compresibilidad del agua, (m^2/kg)

β_r coeficiente de compresibilidad de la roca, (m^2/kg)

m espesor del acuífero confinado, (m)

Se procederá como sigue (véase Fig. 6)

- Primer paso: se le asignará un valor a d' , el cual se le da a r . Con este valor y utilizando la gráfica en $\ln r$ con respecto a $(H - H_p)$ se determina H

Se sustituirá en la fórmula de V_a , obteniéndose su valor, y de este, d'_{td} que será:

$$d'_{td} = V_a \cdot t_d$$

donde:

d'_{td} distancia medida desde el pozo de bombeo, en dirección aguas arriba del mismo en sentido del flujo (m)

Nota. Se considera a partir del tiempo de vida en el agua de ciertas bacterias, como ejemplo; la Salmonella que se da unos 50 días, con un coeficiente de seguridad que varía de 1,5 a 3,0 según el caso.

V_a velocidad del flujo de agua hacia el pozo, determinada por trazadores o mediante cálculos (m/D)

Para calcular el i_1 que se necesita se plantean en papel semilogarítmico los r respecto a $(H - H_p)$, utilizando para ello la ecuación general de $H^2 - H_p^2$ para valores de $r = R, 0,5 R, 0,25 R, 0,10 R$. Esto resultará una línea que permitirá calcular cualquier valor i_1 , ya que $i_1 = (H - H_p) r$.

- Segundo paso: Como $d'_{td} \neq d'$, se le asignará un nuevo valor a d , intermedio entre d' y d'_{td} , obteniéndose el valor $d'_{td'}$.

Nota. Este valor $d'_{td'}$ estará más cercano a d' , que d'_{td} lo fue de d' .

- Tercer paso. Como $d'_{td'} \neq d'$, se le asignará un nuevo valor a d , o sea d'' .

Nota. Este valor de d'_{tD} estará más cercano a d'' , que d'_{tD} lo fue de d''

- Cuarto paso. Se continuará el procedimiento hasta lograr que $d^n_{tD} \approx d_n$ con un error menor del 3%
- Quinto paso. Se fijará este último valor como el d_{tD}

b) Si $d_{tD} > R$

$$\text{como } d_{tD} = V_n \cdot t'_D$$

donde:

V_n velocidad del flujo subterráneo natural (m/d)

t'_D (véase t_D en el apartado 9.2.1)

Si $d_{tD} > R$, entonces se considerará para el d_{tD} (real) una distancia extra, por ser $V_R > V_n$ (gradiente natural, $i_n < i_1$) así, $d_{tD} = R + d_n$

Para calcular d_n se procederá de la forma siguiente:

$$d_n = V_n t_n \text{ y } V_n = \frac{H_1 - H_2}{X} \frac{K_D}{\mu}$$

Siendo:

V_n constante

$$t_n = t_D - t_R$$

donde:

t_D (véase apartado 9.2.1)

t_R tiempo que demora una partícula en ir desde una distancia R del pozo de bombeo, hasta este último, (d)

H_1 y H_2 espesor saturado en la zona de flujo natural, en los puntos 1 y 2 respectivamente, (m)

X distancia entre los puntos 1 y 2, en la zona de flujo natural, (m)

K_D conductividad hidráulica Darciana (L^1)

μ coeficiente de almacenamiento (adimensional)

Como t_D es conocida, se calculará t_R por:

$$t_R \approx \frac{R}{V_R} = \frac{R^2}{(H_0 - H_p)} \frac{\mu}{K_D}$$

$$\therefore t_n = t_D - \frac{R^2}{(H_0 - H_p) K_D}$$

$$\therefore d_n = \frac{(H_1 - H_0)}{X} \frac{(K_D)}{\mu} \left[t_D - \frac{R^2}{(H_0 - H_p) K_D} \right]$$

Simplificando y ordenando

$$d_n = \frac{H_1 - H_0}{X (H_0 - H_p)} \left[(H_0 - H_p) \frac{K_D}{\mu} t_D - R^2 \right]$$

o sea:

$$d_n = \frac{H_1 - H_0}{(H_0 - H_p) X} \left[(H_0 - H_p) \frac{K_D}{\mu} t_D - R^2 \right]$$

10. Encamisado de pozos de recarga

10.1 Encamisado de acuíferos libres o no confinados

10.1.1 En acuíferos libres, y en medios muy fracturados y carsinados o en presencia de ambos, se introducirá una camisa por debajo del nivel freático para evitar la destrucción de la roca por efectos mecánicos, que ocasionan serios problemas al pozo de recarga (véase Fig. 7)

Si P_n es la profundidad del nivel freático (valor máximo registrado de ésta), se tendrá que para:

$$P_n \text{ entre } 5 \text{ y } 10 \text{ m, } d_c \approx 0,50 P_n \quad T_c \approx 1,50 P_n$$

$$P_n \text{ más } 11 \text{ hasta } 20 \text{ m, } d_c \approx 0,30 P_n \quad T_c \approx 1,30 P_n$$

$$P_n \text{ más } 21 \text{ hasta } 40 \text{ m, } d_c \approx 0,20 P_n \quad T_c \approx 1,20 P_n$$

$$P_n \text{ mayor que } 40 \text{ m, } d_c \approx 0,15 P_n \quad T_c \approx 1,15 P_n$$

- 10.1.2 Si el pozo de recarga se va a construir en una zona donde las variaciones cualitativas del agua subterránea no constituyen limitación importante, parte de T_c puede sustituirse por camisa ranurada, igual se procederá si se está seguro de la calidad del agua utilizada en la recarga, y el mantenimiento y desarrollo de la zona, requiere de la invariabilidad en la calidad del agua del acuífero.

10.2 Encamisado de pozos en acuífero confinados

- 10.2.1 El encamisado "liso" se introducirá por debajo del techo confinante, dentro del acuífero confinado (véase Fig. 8)

$P = 1,0$ a $2,0$ m, para $E_c \leq 5$ m para $m \geq 10$ m

$P = 2,0$ a $2,5$ m, para 5 m $E_c \leq 20$ m para $m \geq 10$ m

$P = 2,5$ a $3,0$ m, para $20 < E_c \leq 40$ m para $m \geq 10$ m

para $E_c > 40$ m, se tomarán valores de $p \geq 3$ m, a Criterio del proyectista

- 10.2.2 La introducción de camisa ranurada por debajo de estos niveles se hará de ser requerida por las condiciones geológicas del lugar donde fue perforado el pozo, de acuerdo con estas, y el criterio del especialista a cargo de las investigaciones.

COMPLEMENTO

Bibliografía consultada:

- Dr. Custodio Emilio, Dr. Llamas Ramón Manuel. Hidrología Subterránea. Tomo I y II. Edición Omega S.A. España 1976
- Dr. Profesor Gilbert Castany. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España, 1971
- INRH - 63 Modelo de filtro y alcantarillado de riego para pozos de recarga y bombeo en el canal tronco. Pinar del Río. Cuba 1963
- Ing. Arturo González Bález. Aprovechamiento de la capacidad almacenadora de los acuíferos la recarga artificial. Revista Voluntad Hidráulica No. 25 1973 y No. 29 1974. Cuba
- Ing. Dimitri Kostov y Colaboradores. Proyecto de recarga Zona No. 1 Victoria de Girón. Micons. Matanzas. Cuba 1979

- Dr. Diosdado Pérez Franco Criterios de Diseño de campo de pozos costeros abiertos MES. Revista Ingeniería Hidráulica No. 1 Cuba Junio 1980
- Dr. Diosdado Pérez Franco. Bases de una nueva metodología para la determinación de las características de los acuíferos en régimen permanente no lineal. Revista Ciencia y Técnica. Ingeniería Hidráulica No. 1 ISPJAE. Ciudad Habana. Cuba Agosto 1977
- G. Mathes, K.O. Munnchen Sonntag Problemas prácticos de modulación del agua subterránea para estudios de protección. Resúmenes de reunión del grupo asesor
- Dr. Diosdado Pérez-Franco. Flujo no lineal permanente e impermanente hacia un pozo en acuífero confinado. Revista Ciencia y Técnica. Ingeniería Hidráulica No. 2 ISPJAE Cuba. Febrero 1978
- Ing. Joaquín Gutiérrez, Ing. Arturo González Baez, Ing. Jorge Mario García. Protección de las aguas subterráneas en acuíferos cársicos contra la contaminación producida por afluentes de lagunas de estabilización. Coloquio Internacional sobre hidrología cársica de la región del Caribe CNC. P.H.I. Palacio de las Convenciones. La Habana, Cuba. Diciembre 1982
- Alexandrov Gheorghii, Abacus Press, Tunbridge Wells Kent. Resúmenes y síntesis de datos hidrogeológicos. Inglaterra 1978.



Tirada: 1 430 ejemplares