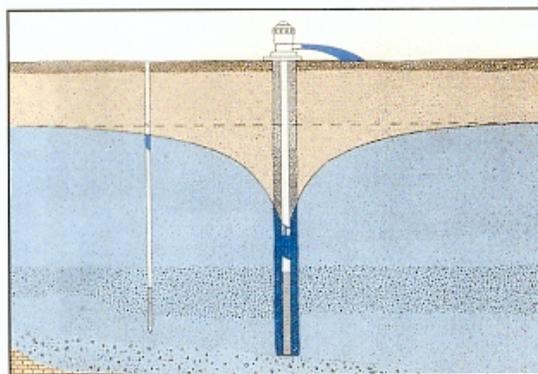




GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA
COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

“POZOS PROFUNDOS”



**PROGRAMA DE DESARROLLO DE SISTEMAS DE RIEGO EN EL SECANO
INTERIOR Y COSTERO. COMPONENTE NACIONAL: CAPACITACIÓN
Y DIFUSIÓN DE TECNOLOGÍAS DE RIEGO.**

SANTIAGO, AGOSTO DE 2000

Esta cartilla fue producida en mayo del 2001, en el marco del Programa de Riego en el Secano Interior y Costero, de las Regiones V, VI, VII, VIII y Metropolitana, financiado por la Comisión Nacional de Riego y ejecutado por el INIA-La Platina.

Autor

Oscar Reckmann
Ingeniero Agrónomo M.Sc.

Editor

Temístocles Maldonado Rojas
Consultor, Especialista en Riego

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. ACUÍFEROS.....	4
3. ESTRATIGRAFÍA.....	5
4. GEOMORFOLOGIA	6
4.1 Depósitos fluviales	6
4.2 Depósitos gravitacionales.....	6
5. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ACUÍFEROS	6
5.1 Permeabilidad.....	7
5.2 Espesor del acuífero	8
5.3 Transmisividad	8
5.4 Coeficiente de almacenamiento.....	9
6. ESTUDIOS PRELIMINARES.....	10
7. PROSPECCIÓN	11
7.1 Métodos geofísicos superficiales.....	11
8. CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	14
8.1 Pozo profundo	14
8.2 Pozos noria	14
8.3 Punteras	14
8.4 Vertientes.....	14
9. NORIAS	15
9.1 Construcción y habilitación de norias.....	15
9.2 Rendimiento de las norias.....	16
10. CONSTRUCCIÓN DE POZOS PROFUNDOS.....	17
10.1 Pérdidas de carga hidráulica	17
10.2 Perforación	19
10.3 Profundidad del pozo.....	21
10.4 Diámetro del pozo	22
10.5 Tubería de entubación definitiva	23
10.6 Habilitación	24
10.7 Limpieza y desarrollo del pozo	32
11. PRUEBAS DE BOMBEO.....	32
11.1 Prueba de caudal variable.....	32
11.2 Prueba de caudal constante.....	34
12. EJEMPLO DE DISEÑO DE POZO PROFUNDO.....	41
13. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	44

POZOS DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

1. INTRODUCCIÓN

Las singulares características de la geografía de nuestro país determinan que bajo el suelo de un sinnúmero de cuencas existan interesantes reservas de aguas subterráneas. En la actualidad este tipo de reservorios es cada día más explotado, ya sea a través de la inversión privada, o a través de políticas que incentivan la construcción de numerosas obras con fines de captación.

El agua es un recurso cada vez más escaso, por tanto es imperativo no descuidarlo, especialmente las reservas de aguas subterráneas. Su explotación se enfrenta hoy al desafío de hacerlo, por una parte económicamente rentable y por otra, la más importante, cuidando y conservando el recurso. Pues su extracción conlleva asociado un consumo energético, que será cada vez mayor en la medida que los niveles de agua de la explotación aumenten en profundidad.

La mejor forma de enfrentar la utilización de las aguas subterráneas de una manera racional es conocer el comportamiento de éstas en la naturaleza, y por otra parte, instruirse en las tecnologías de exploración y explotación del recurso.

El presente documento pretende entregar información a profesionales y técnicos respecto a estos temas, que les permita enfrentar el inicio de la prospección y explotación de aguas subterráneas con criterios técnicos, favoreciendo la toma de decisiones respecto de proyectos planteados.

2. ACUÍFEROS

El suelo que se encuentra en la zona radicular es utilizado como un depósito para almacenar agua entre riegos, la que queda disponible para uso de las plantas. Análogamente, un acuífero es un almacén geológico a mayor profundidad, en el que se deposita el agua que puede ser bombeada posteriormente. En el primer caso el agua forma parte de un suelo que no está saturado, mientras que en el segundo, los acuíferos se encuentran saturados o muy cerca de saturación (**ver figura 1**).

Si no existe una capa impermeable entre el acuífero y la superficie del suelo, el acuífero se llama **no confinado, libre o freático**; la superficie libre del agua o nivel freático, en este tipo de acuíferos está en equilibrio con la presión atmosférica. Un acuífero entre estratos de suelo de baja permeabilidad o totalmente impermeable, se conoce como acuífero **confinado, artesiano o brotante**, y comúnmente la presión del agua entre ambos estratos es superior a la presión atmosférica. Otro tipo de acuífero, con características similares a los acuíferos libres, es el **acuífero colgado**: depósito que se encuentra sobre un estrato impermeable o semipermeable cercano a la superficie, siendo su reserva de agua de una menor magnitud.

El material presente en un acuífero puede estar compuesto de diversos depósitos como arenas, gravas, limos y arcillas; o también por formaciones geológicas tales como roca fracturada y/o fisuras provocadas por fallas, o material calcáreo (caliza) con grietas producto de disolución.

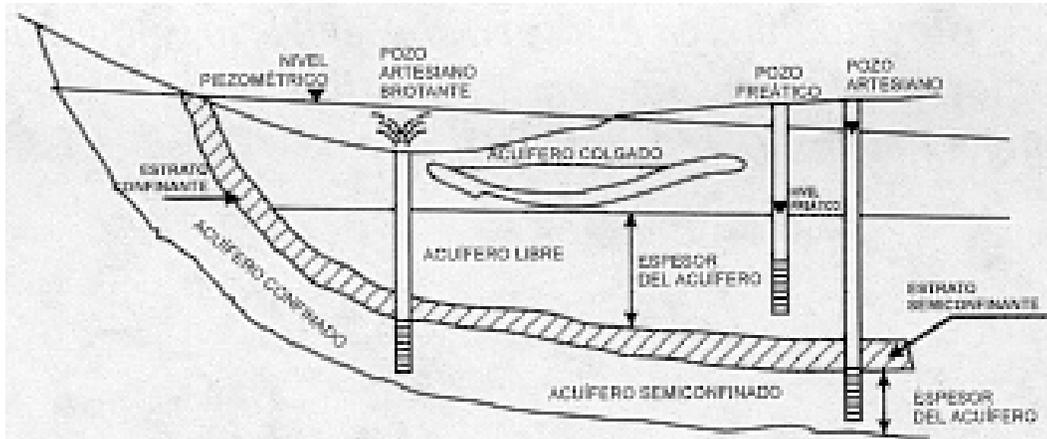


Figura 1. Distintos tipos de acuíferos.

3. ESTRATIGRAFÍA

Los materiales en profundidad forman “estratos”, que corresponden a cuerpos de material que se depositan siguiendo la forma del relieve que cubren. A medida que un nuevo proceso depositacional cubre al anterior, los estratos van formando capas horizontales.

Lo que hay bajo una secuencia de depósitos no consolidados constituye lo que se conoce como “sustrato rocoso” o “roca madre”, generalmente mucho más antigua que los depósitos que la cubren (**ver figura 2**).

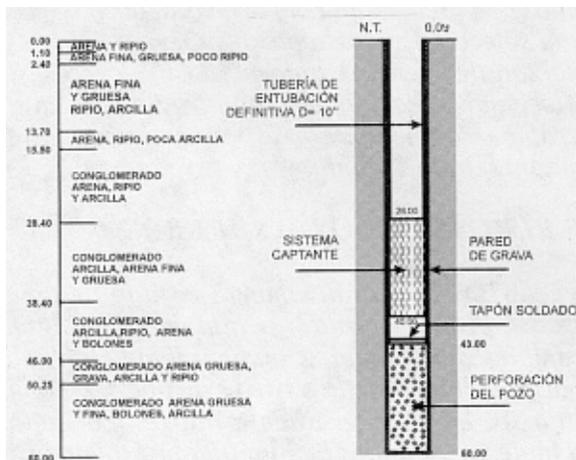


Figura 2. Estratigrafía y tipografía de pozos PRODECOOP PAG 103

4. GEOMORFOLOGIA

En todos los procesos formadores de depósitos existe asociado el fenómeno de transporte. El cual, dependiendo con la energía que ocurra, producirá distintos tipos de depósitos; es decir, hay cambios en la forma y tamaño de los granos que son transportados: esfericidad y redondeamiento son características determinantes del material como reservorio de agua. Se llama selección al grado de homogeneidad de los granos, en un depósito con buena selección los granos tienen tamaños similares.

4.1 Depósitos fluviales

Este tipo de depósito es muy común en el país, incluso en zonas de secano. En este caso, el agua que escurre por los ríos o esteros arrastra sedimentos que se depositan cuando disminuye la energía de transporte del río, formando **depósitos fluviales**. Las llanuras de inundación de los ríos forman **depósitos aluviales**; y los cambios en el nivel de base del río (glaciaciones), forman las **terrazas fluviales**, que corresponden a depósitos de la llanura aluvial que quedan sobre el nivel del río (**ver figura 3**).

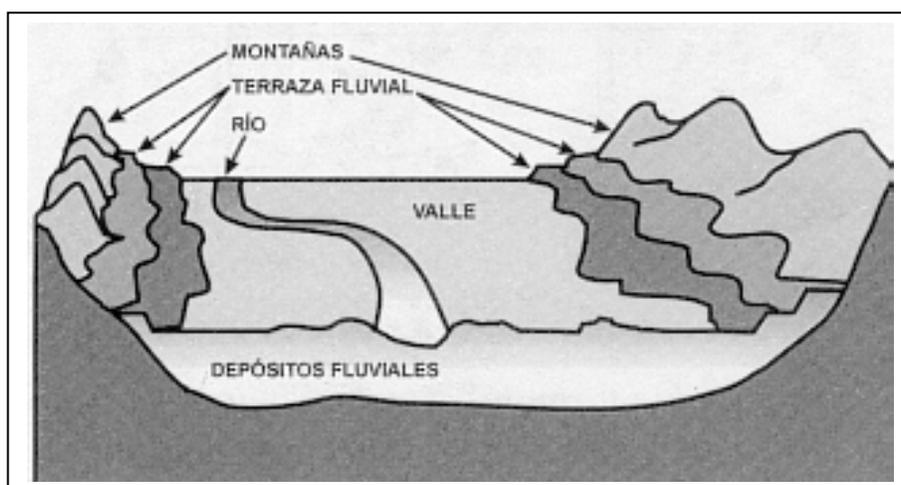


Figura 3. Típica formación de un valle fluvial y sus terrazas

Los depósitos fluviales presentan una gradación de materiales depositados en sentido vertical, esto es: una base delgada con fragmentos gruesos con mala selección, mezclados con arcilla; una parte media, de mayor espesor, de gravas y arenas con buena selección; y en la parte superior limos y arcillas.

4.2 Depósitos gravitacionales.

En las laderas de los cerros se encuentran los depósitos coluviales, con fragmentos angulosos, con poco arrastre. En general los fragmentos corresponden a rocas alteradas por lo que suelen tener abundante arcilla y limo.

5. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ACUÍFEROS

Con el fin de caracterizar cuantitativamente el flujo de agua a través de los estratos existentes en la zona saturada, se han definido algunos parámetros:

5.1 Permeabilidad

También denominada Conductividad Hidráulica (K). Se define como el volumen de agua que circula a través de una sección unitaria de suelo, en un tiempo unitario, bajo un gradiente hidráulico también unitario. La permeabilidad se mide en unidades de longitud por tiempo (m/día, cm/h). Este parámetro es afectado directamente por la textura del suelo y por la densidad y viscosidad del agua subterránea. El tipo de partículas, su arreglo y en último término la porosidad que generan, influye directamente en el movimiento del agua en el suelo, es decir, en los valores de K.

En la **figura 4** se puede observar dos muestras de perfil de suelo: uno que contiene solamente arena gruesa (a), y otro que contiene arena fina (b). En ambos se indica la ruta que seguiría una partícula de agua junto con el flujo en sentido horizontal; claramente se observa en la figura que el camino recorrido por la masa de agua en la muestra de arena fina, es más largo que en la muestra de arena gruesa. De esta manera podemos concluir a priori que en la muestra de suelo de arena gruesa el valor de K es mayor, asociando esta diferencia con un promedio de diámetro de partícula mayor. Sin embargo, en la naturaleza los suelos contienen partículas de diversos tamaños, y existe una influencia de la distribución del tamaño de éstas sobre los valores de K.

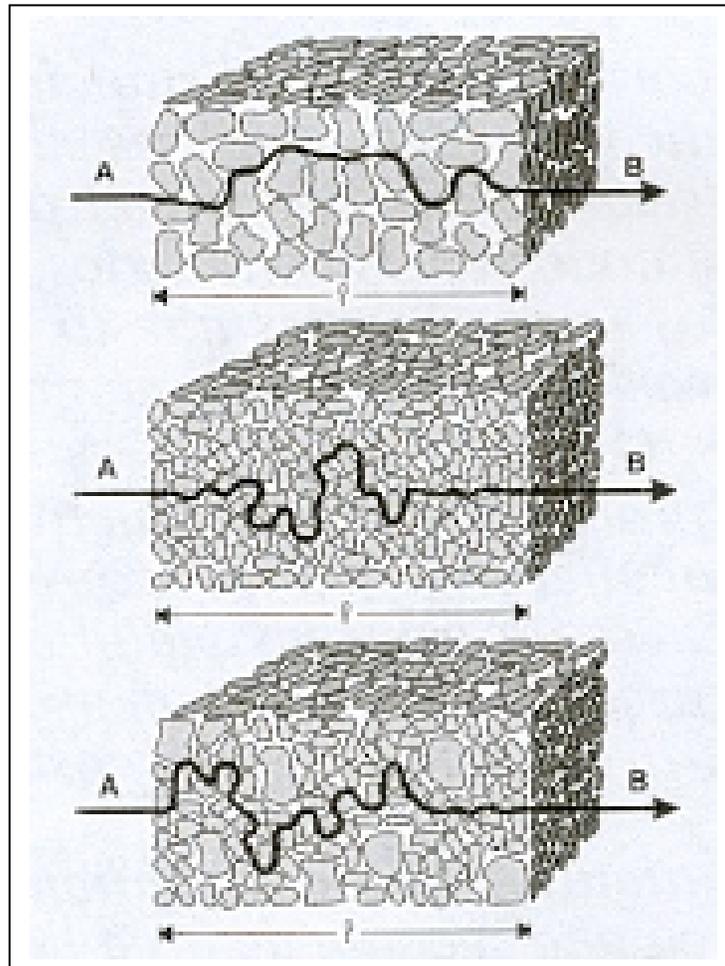


Figura 4. Flujo de agua en sentido horizontal en muestras de suelo

En la misma figura 4, se presenta una muestra de suelo (c) con una mezcla de partículas de arena gruesa y de arena fina, además se indica la ruta de una partícula de agua con el flujo en sentido horizontal. Se puede observar en la figura que el tamaño de los poros de la muestra está fuertemente influenciado por las partículas de arena fina y que, las partículas de mayor tamaño actúan como barreras al flujo normal del agua en sentido horizontal. Determinando así, que el agua se vea forzada a tomar rutas más largas para circular a través de las partículas de la muestra. Si comparamos con las figuras anteriores, claramente se establece en la muestra de arena fina, que el valor de K es mayor, a pesar que el promedio de tamaño de granos en la mezcla es mayor.

En la **tabla 1** se presentan distintos valores de conductividad hidráulica según el tipo de material. Como referencia, valores de K mayores a 800 m/día se consideran acuíferos buenos.

Tabla 1. Valores de Conductividad Hidráulica K en distintos materiales

Tipo de material	K, m/día	Tipo de material	K, m/día
Grava gruesa	150	Dolomita	0,001
Grava media	270	Arena de duna	20
Grava fina	450	Loes	0,08
Arena gruesa	45	Turba	5,7
Arena media	12	Esquisto	0,2
Arena fina	2,5	Pizarra	0,00008
Limo	0,08	Toba	0,2
Arcilla	0,0002	Basalto	0,01
Arenisca fina	0,2	Arena y mezcla de gravas	5-100
Arenisca media	3,1	Arcilla, arena y mezcla de gravas	0.001-0,1

5.2 Espesor del acuífero

Corresponde a la distancia que existe entre el estrato impermeable y el nivel freático en acuíferos libres, siendo variable - en función de los cambios del nivel freático - de pocos metros a decenas de metros de magnitud. En acuíferos confinados y semiconfinados, corresponde a la distancia que existe entre los estratos impermeables que lo encierran, en este caso el valor es constante y puede variar en órdenes de magnitud de unos pocos metros, a cientos o miles de metros. (**ver figura 1**).

5.3 Transmisividad

Es el producto de la conductividad hidráulica promedio (K), y el espesor de un acuífero (H). Se expresa en la ecuación siguiente:

$$T = K \times H$$

ecuación 1

En consecuencia, la transmisividad corresponde al caudal que circula por una sección de área unitaria, bajo un gradiente hidráulico unitario y en un espesor de acuífero unitario. Las dimensiones en este caso son de longitud² /tiempo (m²/día).

5.4 Coeficiente de almacenamiento

Volumen de agua entregado por el acuífero, en una sección de área horizontal de éste, por cada metro de descenso en el nivel piezométrico. En acuíferos confinados el valor de S se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$S = \frac{\Delta V}{Ax\Delta h} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde:

- S : Almacenamiento, adimensional
- ΔV : Volumen de agua aportado, m³
- A : Area horizontal del acuífero, m²
- Δh : Cambios en la altura piezométrica, m

El coeficiente de almacenamiento en acuíferos confinados se encuentra normalmente en rangos de $10^{-6} \leq S \leq 10^{-4}$. El mismo parámetro, pero esta vez en acuíferos no confinados o libres, está controlado por la altura piezométrica, que en este caso está determinada por el nivel que alcance la napa freática; es decir, al analizar la ecuación 1, la disminución de un metro de la altura piezométrica (Δh) en el acuífero libre, corresponde a la disminución de 1 m de la napa freática.

El coeficiente de almacenamiento en acuíferos no confinados se conoce, comúnmente, como rendimiento específico y sus valores se encuentran normalmente en rangos de $0.2 \leq S \leq 0.3$.

Tabla 2. Rendimiento específico S en distintos materiales

Tipo de material	S	Tipo de material	S
Grava gruesa	0,23	Arenisca fina	0,21
Grava media	0,24	Arenisca media	0,27
Grava fina	0,25	Arena de duna	0,38
Arena gruesa	0,27	Loes	0,18
Arena media	0,28	Turba	0,44
Arena fina	0,23	Esquisto	0,26
Limo	0,08	Toba	0,21
Arcilla	0,03		

Ejemplo 1. Un volumen de agua equivalente a $40 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ es bombeado desde un acuífero libre a través de pozos ubicados uniformemente en un área equivalente a 10000 has. El rendimiento específico del acuífero obtenido en una prueba de bombeo arrojó un valor de 0.2. Determine la reducción media del nivel de agua en el acuífero, asumiendo que está uniformemente distribuido.

Despejando Δh de la ecuación 2 tenemos:

$$\Delta h = \Delta V / A S$$

$$\Delta h = \frac{40 \times 10^6 m^3}{10000 \times 10000 \times 0,2 m^2}$$

$$\Delta h = 2.0 m$$

6. ESTUDIOS PRELIMINARES

Antes de tomar la decisión de construir alguna obra para la captación de aguas subterráneas es recomendable realizar estudios preliminares, con el fin de tener estimaciones de los recursos existentes.

Debe realizarse un recuento de todas las captaciones subterráneas existentes en la zona abarcada por las napas subterráneas que se trata de aprovechar, dentro del radio de influencia del pozo. En este proceso de recuento debe recopilarse información relacionada con ubicación geográfica, tipos y características de la obra, niveles estáticos de la napa y sus fluctuaciones, condiciones de explotación, capacidades máximas, estratigrafía y todo antecedente que se estime de interés. Mucha de esta información es posible encontrarla en las oficinas del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de la región, específicamente en la Dirección General de Aguas (DGA), institución que además dispone de los derechos de agua subterránea concedidos

Será necesario recopilar antecedentes de las captaciones subterráneas existentes, así como conocer el régimen pluviométrico del sector. Este último se puede obtener a través de la información existente en el Instituto de Meteorología de Chile, algunas otras fuentes de estudios más específicos de la zona (Santibañez, CIREN) o a través de información de estaciones pluviométricas locales.

Además, es recomendable realizar un estudio hidrogeológico de la zona donde se construirá el pozo, en el que se haga especial mención de las características de interés de los acuíferos existentes, tales como naturaleza de los rellenos, alimentaciones o recargas disponibles, extensión y dimensiones de los acuíferos, características de permeabilidad y almacenamiento de los mismos (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico, etc.). Antecedentes de hidrogeología se encuentran en la DGA como también en el Servicio Nacional de Geología y Minería (organismo que confecciona "Cartas hidrogeológicas" de zonas de nuestro país). Para zonas de secano de la VI y VII región actualmente existen las cartas de Rancagua y Talca respectivamente. Otra repartición que cuenta con antecedentes hidrogeológicos, es el Instituto de Recursos Hidráulicos (CIREN CORFO), donde se encuentran catastros de pozos confeccionados aproximadamente hasta el año 1970. El CIREN también cuenta con estudios para la determinación de zonas hidrogeológicas homogéneas (ZHH) en la mayoría de las regiones de nuestro país, cuya principal finalidad es definir y delimitar áreas geográficas en las cuales es posible la explotación de aguas subterráneas. Además, en cada ZHH se define un

pozo tipo representativo, con sus atributos de profundidad, nivel estático, caudal posible de extraer y nivel dinámico.

También es recomendable la observación y estudio de cartas que reflejen la fisiografía y topografía del área en análisis. Mediante este material es posible establecer claramente las hoyas hidrográficas de influencia en las cuencas, subcuencas y microcuencas; posibles recargas naturales y dirección del flujo de aguas subterráneas. Con este fin también es útil la cartografía desarrollada por el Instituto Geográfico Militar a escalas 1:25000 y 1:50000 con curvas de nivel cada 20 m, además de fotografías aéreas. Estas últimas también se obtienen en las dependencias del servicio aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea en Cerrillos, Región Metropolitana, donde existen fotografías en diversas escalas y que cubren virtualmente todo el país.

Si los antecedentes existentes no son suficientes, se deberá investigar, programar y ejecutar las actividades adicionales que sean necesarias, como investigaciones geológicas detalladas, pruebas de agotamiento e infiltración en pozos existentes y prospecciones de diferente índole, entre otras.

7. PROSPECCIÓN

Para la hidrología subterránea las características de los materiales geológicos relacionados con algunas propiedades específicas de los mismos, permiten identificar materiales o masas homogéneas que, correlacionadas con las características hidrodinámicas, aportan un buen conocimiento de la geología subterránea. Información imprescindible para la obtención de la geometría de los acuíferos y en general de las estructuras geológicas subterráneas.

En el estudio o prospección de aguas subterráneas encontramos por una parte, los métodos denominados superficiales que no requieren de pozos o perforaciones para su implementación, y por otra, aquellos que se aplican en perforaciones ya existentes o realizadas con dicho fin, conocidos como registros geofísicos, siendo en general estos últimos más costosos.

7.1 Métodos geofísicos superficiales

A pesar de que existe una serie de este tipo de métodos prospectivos con el fin de ubicar aguas subterráneas para su explotación, dos son los de mayor importancia:

Método sísmico: este método se basa en la velocidad de transmisión de las ondas elásticas en los diferentes tipos de materiales del subsuelo como respuestas a la inducción de vibraciones artificiales por sistemas mecánicos. Las vibraciones se detectan por medio de sismógrafos en varias direcciones y distancias desde la fuente de energía, y se gravan en papel fotográfico o cintas magnéticas para su posterior interpretación.

La velocidad de propagación de la onda longitudinal, única de interés con el fin de la explotación de aguas subterráneas, depende del grado de compactación y del estado de consolidación del material o formación geológica.

La limitación principal de este método, es que no se puede obtener información de capas que se encuentran bajo estratos de material denso (basaltos, calizas compactas), donde la velocidad de propagación es mayor en la superficie que en la profundidad.

Método eléctrico: su característica principal es que permite determinar la resistividad o conductividad eléctrica de las formaciones geológicas expuestas. Las principales propiedades físicas de las rocas o formaciones que intervienen en las medidas eléctricas de este método son: *resistividad (ρ)*, *constante dieléctrica (ϵ)*, *permeabilidad magnética (μ)* y *propiedades electroquímicas*.

Sin duda, la propiedad de mayor importancia desde el punto de vista de la prospección es la resistividad, que se define como: la resistencia que opone un cubo de ancho unitario al paso de una corriente eléctrica de 1 ampere, que circula en sentido perpendicular a sus dos caras, entre las cuales existe una diferencia de potencial (voltaje) de 1 volt, siendo la unidad de medida de la resistividad el ohm-metro (**ver figura 5**).

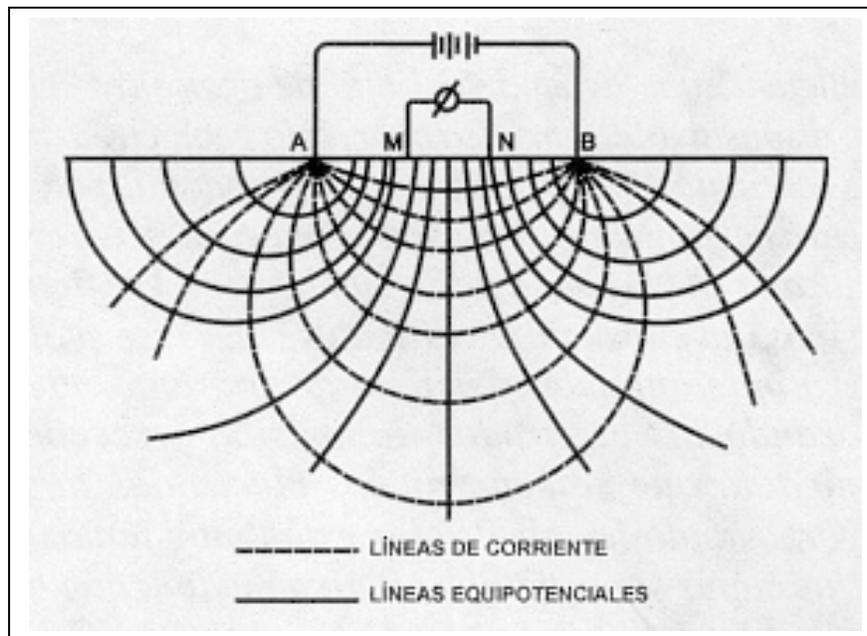


Figura 5. Método eléctrico de resistividades, generación del campo eléctrico

Los factores de mayor influencia en el valor de la resistividad de las rocas son la constitución mineralógica, el grado de saturación y calidad del agua que la satura, la porosidad, la edad geológica y el grado de compactación. Otros factores que también influyen son la temperatura, presión y humedad.

Tabla 3. Resistividad eléctrica según tipo de material

Tipo de medio	Ohms-metro	Tipo de medio	Ohms-metro
Granito saturado	20-100	Caliza y arenisca	50-3000
Caliza saturada	50-20	Pizarra	50-300
Agua salina	1-10	Rocas metamórficas	100-10000
Agua potable	50-300	Grava	100-10000
Agua de mar	< 0,2	Arena	130-1000
Agua destilada	> 500	Limo	30-500
Arcilla	10-100		

La resistividad como concepto se rige por la ley de Ohm, que establece que la caída de potencial (Δv), es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica (I) que circula por un conductor, multiplicado por una constante de proporcionalidad (R), denominada resistencia. Matemáticamente lo anterior se expresa como:

$$\Delta v = R \times I \quad \text{ecuación 3}$$

Esta relación se aplica a medios homogéneos. Por otra parte, la resistividad aparente (R_a), es la resistividad que se obtiene aplicando los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo, y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_a = K_{ex} \frac{\Delta v}{I} \quad \text{ecuación 4}$$

Donde K_e es un coeficiente que depende del tipo de dispositivo electródico que se utilice. Se denomina dispositivo electródico al arreglo geométrico que existe entre un par de electrodos de corriente A y B, y otro par de electrodos de potencial M y N en los métodos existentes para determinar resistividad de materiales. Un arreglo geométrico muy común es el utilizado en el método de Schlumberger (**ver figura 5**).

Los sondeos eléctricos del subsuelo o verticales (SEV), se realizan a través de una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el dispositivo y separando los electrodos de emisión y recepción de manera creciente. En la medida que se separan los electrodos la profundidad de evaluación es mayor, cuando los electrodos están muy juntos, las mediciones corresponderán a las capas superficiales. Pero a medida que estos se separan, las mediciones efectuadas medirán resistividades en las capas que se encuentran a mayor profundidad. La profundidad de las mediciones en general es del orden de 1/5 a 1/3 de la separación entre los electrodos A y B, aunque esta relación varía de acuerdo con las características de los materiales atravesados.

Con la información de las resistividades obtenidas se confeccionan perfiles de suelos representativos de la geometría y características de las formaciones atravesadas por los sondeos. Es muy importante realizar una calibración previa del equipo, la cual se efectúa en pozos existentes o en afloramientos específicos conocidos.

8. CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En la actualidad el mayor número de captaciones de aguas subterráneas se realiza mediante pozos profundos. Sin embargo, bajo condiciones de secano en nuestro país existe otro tipo de captaciones de menor envergadura, pero no menos importantes, como norias (pozo somero), vertientes, drenes y punteras (**ver figura 6**).

8.1 Pozo profundo

Corresponde a una estructura hidráulica que permite alumbrar y extraer aguas que escurren por los acuíferos subterráneos, ubicados a una mayor profundidad que en el caso de las norias. El agua se extrae de los pozos mediante bombeo u otro sistema de elevación. En el punto 10 del presente documento se entregan detalles más específicos sobre esta técnica de captación.

8.2 Pozos noria

Estas obras se construyen generalmente excavadas a mano; por lo tanto el diámetro interior no puede ser inferior a 1,2 m, debido a que la excavación se dificulta al llegar al acuífero, donde se deben emplear equipos de bombeo para su agotamiento. Los caudales obtenidos en estas condiciones son en general inferiores a los que se obtienen en los pozos profundos perforados.

8.3 Punteras

Corresponden a tubería metálica o de PVC de diámetros de entre 30 y 50 mm, que se hincan en el terreno y que se interconectan en la superficie en acople con un equipo de bombeo. Este tipo de obra corresponde a un sistema de perforación mediante el cual se inyecta agua a alta presión, la que es forzada hacia abajo por una cañería vertical que tiene en un extremo la salida del agua, este extremo tiene la forma de un cincel. El agua retorna a la superficie por la parte exterior de la cañería y la pared del pozo. Este método de perforación es efectivo solamente en sedimentos sueltos de grano fino, y con profundidades entre 6 y 15 m.

8.4 Vertientes

Son obras de captación naturales, donde normalmente aflora el agua al cortar a la superficie piezométrica (napa freática), la superficie del terreno; aunque también pueden ocurrir en zonas donde existen rocas fracturadas. En general y debido a que son descargas naturales de los acuíferos, su productividad persiste durante todo el año o puede variar hasta agotarse, y su rendimiento será un índice de la calidad del acuífero que las alimenta.

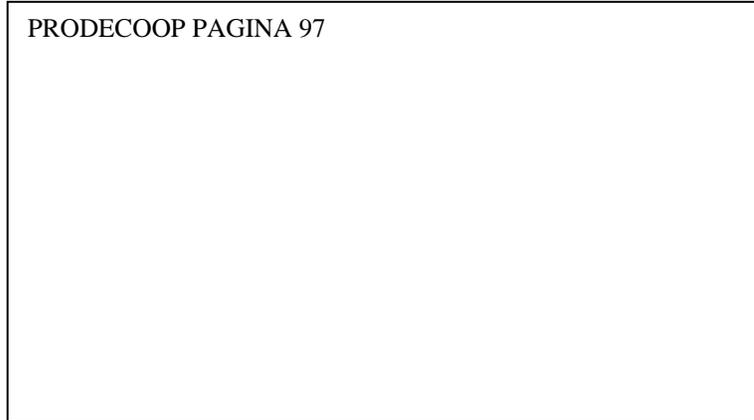


Figura 6. Diversas formas de captación de aguas subterráneas

9. NORIAS

Este tipo de pozos, tal como lo señala el documento de PRODECOP, INIA- Intihuasi (1998), son perforaciones de poca profundidad, no más allá de 20 m, y con diámetros de 1 a 3 metros. Su objetivo es captar y extraer aquellas aguas que escurren en forma subterránea por acuíferos cercanos a la superficie del suelo. Normalmente estos acuíferos son el tipo freático, es decir, no están sometidos a presión interna y para extraer el agua es necesario bombearla.

9.1 Construcción y habilitación de norias

Según el referido documento, es recomendable construir las norias a orillas de quebradas principales o de esteros, emplazándolas en lugares protegidos de crecidas. En la construcción y habilitación de norias se parte de la base que la simple excavación de un pozo, sin revestimiento interno, no es una alternativa adecuada, por los riesgos de derrumbes y mala calidad del agua.

En la **figura 7** se muestran 4 alternativas de construcción de norias: **a)** construcción con revestimiento de piedra, sin utilizar material agregante; en los casos **b y c** se ha incorporado el uso de concreto en las paredes externas e internas, incluyéndose la construcción de tapa en la boca del pozo; la alternativa **d** muestra el uso de tubos de concreto tipo alcantarillado (perforado), de 1 m de diámetro y 0,5 m de altura, los cuales se van instalando a medida que el pozo se va profundizando. El diámetro del pozo debe ser unos 50 cm mayor que el diámetro exterior de los tubos, para localizar en ese espacio grava seleccionada que cumple la función de filtro.

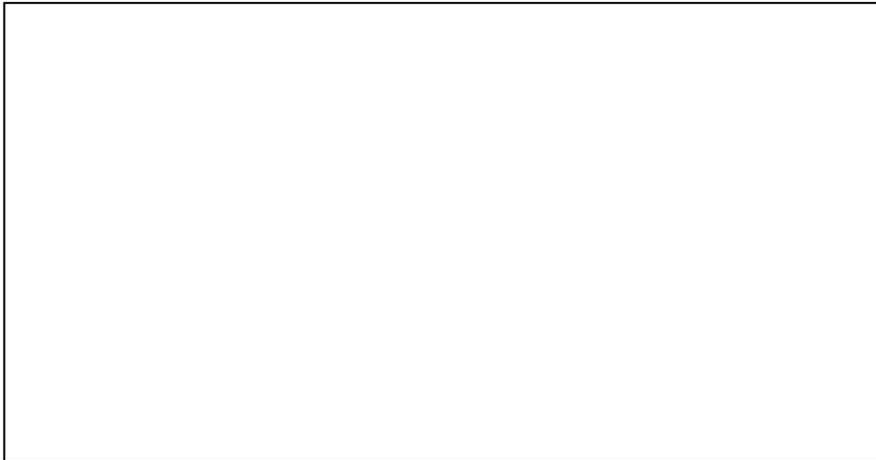


Figura 7. ¿ ¿

9.2 Rendimiento de las norias

El rendimiento o cantidad de agua que puede entregar una noria depende de su profundidad, diámetro y de las características del acuífero enterceptado. Sin embargo, dada la poca profundidad, su rendimiento es bajo, de 2 a 3 l / s.

Para conocer el rendimiento de una determinada noria se recurre a la ejecución de pruebas de bombeo, las cuales permiten definir el caudal máximo que se puede extraer sin que la noria se agote. La publicación Manual de Riego de PRODECOP (1998), sugiere el siguiente procedimiento:

Etapa 1. Bombear toda el agua de la noria, con un caudal constante, hasta agotarla. El objetivo de esta etapa es producir el vaciado y limpieza de los poros drenantes. Extraída toda el agua, dejar que se recupere el nivel estático.

Etapa 2. Consiste en la ejecución de pruebas de bombeo utilizando 3 caudales diferentes y crecientes, evaluando en cada caso, el abatimiento del nivel de agua en el interior de la noria. El bombeo de cada caudal debe hacerse durante 1 hora, totalizando 3 horas. Para evaluar el abatimiento debe medirse las profundidades del nivel freático inicialmente cada 1 min y luego cada 2 ó 3 min. Terminada esta prueba, dejar que la noria se recupere, registrando los niveles de ascenso del agua al interior de ella, con frecuencia de 2 min.

Etapa 3. Seleccionar el caudal máximo que no provoque un abatimiento rápido y que no deje a la noria sin agua en poco tiempo. Realizar la prueba por 3 o más horas, registrando los niveles de abatimiento y recuperación. El caudal seleccionado corresponderá al caudal que entrega la noria, permitiendo no agotarla en un tiempo prolongado.

10. CONSTRUCCIÓN DE POZOS PROFUNDOS

El diseño y construcción de pozos profundos, y en general de cualquier captación, debe perseguir los siguientes objetivos:

- El mayor caudal con un mínimo abatimiento, en concordancia con las características del acuífero.
- El agua extraída debe carecer de partículas sólidas en suspensión o arenas
- La mayor vida útil para el pozo
- Costo de construcción y operación económicamente factible.

10.1 Pérdidas de carga hidráulica

Para comprender con mayor claridad los objetivos anteriormente indicados es necesario conocer algunos aspectos de hidráulica de pozos, por lo que a continuación se hará una breve descripción de aspectos relacionados con las pérdidas de carga y el abatimiento en el pozo. En la **figura 8** se puede apreciar que las pérdidas hidráulicas que ocurren en la obra de captación se distribuyen en dos componentes. Uno en que las pérdidas de carga ocurren en el acuífero o en el material saturado y que dependen exclusivamente de las características de este (Confinado, semiconfinado o libre), como por ejemplo de su conductividad hidráulica (K). Este tipo de pérdidas no es posible evitarlas, ya que responden a una condición natural y de muy compleja y costosa intervención.

El segundo componente de las pérdidas hidráulicas en la obra de captación, corresponde a las pérdidas de carga ocurridas en el pozo, es decir, la pérdida de energía que sufre el flujo de agua al atravesar las paredes de la perforación, el filtro de gravas (cuando este existe) y la tubería a través de la rejilla y ranurado. En este caso este tipo de pérdida se puede minimizar permitiendo finalmente una alta eficiencia hidráulica del pozo.

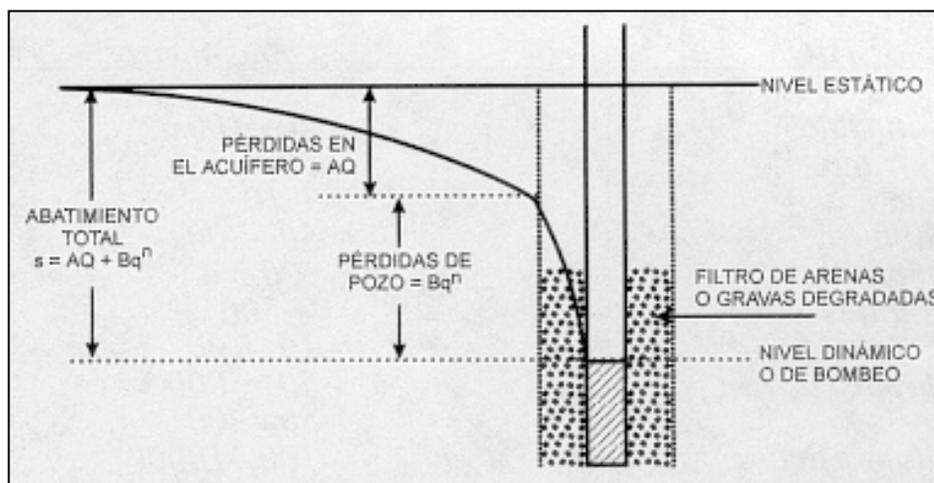


Figura 8. Esquema general de las pérdidas hidráulicas en un pozo.

Existen tres situaciones típicas en la construcción de pozos y que se deben relacionar con las pérdidas hidráulicas asociadas (**ver figura 9**). Asumiendo que se realiza el pozo en un acuífero confinado para las tres situaciones:

- En el primer caso se construye en una zona de material consolidado, donde por lo tanto, no existen riesgos de entrada de sedimentos o arenas al interior de éste, no utilizándose filtro de grava ni rejillas. El diámetro del pozo en este caso es similar al de la tubería definitiva.
- Una segunda situación es aquella en que el pozo se construye en una formación no consolidada, donde se hace necesario diseñar una rejilla con el fin de evitar el ingreso de arenas a su interior. También en esta situación el diámetro del pozo es similar al de la tubería. Como se observa en la **figura 9-b**, asumiendo el mismo caudal de extracción ocurre una pérdida de carga adicional producto del flujo de agua a través de la rejilla, generando una altura de succión (desde el borde del pozo hasta el nivel dinámico), mayor que la situación anterior (**figura 9-a**).
- La tercera situación (**figura 9-c**), es donde se hace imprescindible incluir en el diseño del pozo un filtro de gravas para evitar el ingreso de arenas. Este filtro se ubica en la zona de captación del acuífero, entre la tubería y las paredes del pozo. Las pérdidas hidráulicas en el pozo en este caso son menores al pasar el flujo a través del filtro de gravas, producto de una mayor permeabilidad de este material. Consecuencia de estas menores pérdidas de carga la altura de succión se reduce comparativamente con el caso anterior (**figura 9-b**).

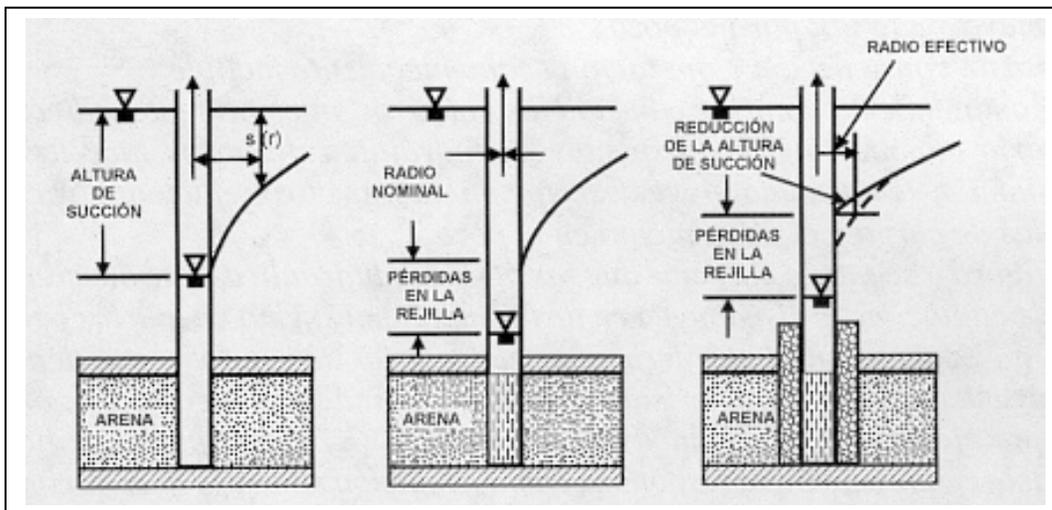


Figura 9. Esquema de tres perforaciones tipo en un acuífero confinado: a) pozo con tubería solamente. b) pozo con tubería ranurada y rejilla. c) pozo con tubería ranurada, rejilla y filtro de grava.

Como se ha discutido anteriormente, la calidad y diseño tanto de la rejilla como del filtro de gravas, influye sobre las pérdidas de carga, y éstas son determinantes en definir la altura de succión. Como la altura de succión define los requerimientos energéticos ($Potencia=HP$) del equipo de bombeo, a menor altura de succión, menores son los requerimientos de

potencia de la bomba, por lo tanto son menores los costos de operación. El tema del diseño y construcción de la rejilla y los filtros se discutirá más adelante

La construcción de pozos profundos tiene esencialmente tres etapas fundamentales: Perforación, Habilitación y Pruebas de Bombeo.

10.2 Perforación

Esta etapa se inicia posterior al reconocimiento del terreno y definición del punto de perforación, niveles estáticos y dinámicos posibles, y diámetro de la tubería de perforación. Consiste en perforar los estratos que componen el subsuelo, hasta la profundidad definida por el diseño, dejando un espacio interior, que permita la posterior colocación de la cañería de entubación definitiva. Esta debe estar ranurada en aquellos tramos que enfrentan a los acuíferos proveedores de un buen caudal de agua. A medida que se realiza la perforación, se va determinando la estratigrafía del subsuelo, tal como se indica en la **figura 2**, información fundamental para la habilitación del pozo.

A lo largo del tiempo se han empleado distintos métodos de perforación en Chile, que esencialmente corresponden al uso de sondas de percusión y sondas de rotación (directa y reversa o inversa). En los últimos años se ha implementado en el país el uso de sondas tipo Barber, que combinan el método de perforación de rotación, con parte del método de percusión (empleo de tubería de perforación).

Perforación a percusión: este sistema utiliza una herramienta con un trépano en su extremo que, teniendo un peso variable en función de las necesidades operativas, es accionada desde la máquina de perforación por medio de un cable de acero que desarrolla un movimiento recíproco, ascendente descendente, y que golpea el terreno que perfora. Esta pesada herramienta va fracturando y derrumbando material que es mezclado con agua desde la superficie, formando un barro o lodo de perforación. Periódicamente el trépano se saca y el pozo es “cuchareado” mediante una pieza de cañería especialmente construida, que es bajada hasta el fondo del pozo, limpiándolo de la mezcla de agua y material triturado (**ver figura 10**).

Este tipo de sondas de percusión o cable son las únicas que permiten medir la aparición del agua subterránea según el avance de la perforación. Asimismo son las únicas que pueden determinar los ascensos y/o descensos del nivel de agua dentro del sondaje, esto permite reconocer las presiones a que pueden estar sometidas las aguas subterráneas en los acuíferos, especialmente aquellos confinados. Las sondas de percusión permiten construir pozos de diámetros muy grandes, incluso superiores a 30 pulgadas.



Figura 10. Sistema de perforación a percusión

El tiempo de perforación en este tipo de método es efectivamente bastante mayor que el de sonda de rotación o de rotopercusión; sin embargo, el tiempo que emplea en la habilitación es sustancialmente similar con respecto a los otros métodos.

Estos equipos son de menor inversión inicial, y a pesar de ser lenta su operación es económica, versátil y no requiere de operadores de gran experiencia.

Perforación a rotación: en este caso la perforación se realiza haciendo girar una herramienta que también lleva un trépano, colocado en el final de la tubería de perforación y que rota en el fondo del pozo triturando el terreno. Durante la operación se introduce agua a presión a través de la cañería de perforación y hacia fuera por perforaciones en el trépano, retornando a la superficie por el espacio entre la cañería de perforación y las paredes del pozo, llevando los materiales triturados o liberados por el trépano hacia la superficie (**ver figura 11**). Las sondas de rotación disponibles en Chile tienen limitaciones de diámetro en torno a las 18 - 20 pulgadas.

Una de las limitaciones de este método es que no es posible obtener muestras limpias y completas. Estas se deben obtener del detritus que se extrae a través del fluido de perforación, por eso son muestras contaminadas con finos que se pierden diluidos en el fluido de perforación. Además, no es posible determinar la profundidad exacta a la que corresponde el material que llega a la superficie del terreno.

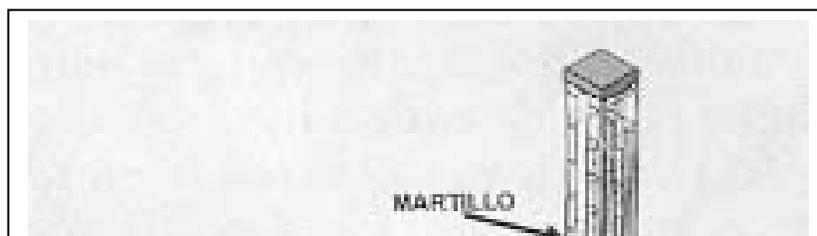


Figura 11. Sistema de perforación de rotación

Los equipos en este tipo de perforación representan una mayor inversión inicial y requieren mano de obra especializada, sin embargo, se logra con ellos mayor rapidez en los trabajos. Se utilizan especialmente cuando el subsuelo a perforar es de formaciones granulares no cementadas (no consolidadas), y de granos finos. Este tipo de equipos presenta restricciones de operación cuando el recurso hídrico es escaso, lo que encarece su funcionamiento; y cuando el subsuelo está constituido por materiales gruesos de tamaño de 6" o superiores.

Perforación a rotopercusión: en este sistema mixto de perforación de pozos también conocido como "Barber", se utiliza en forma simultánea el sistema de percusión (empleo de tubería de perforación) y el sistema de rotación, lográndose un rendimiento mayor que en ambos sistemas por separado.

El equipo está construido de tal forma que la perforación puede cambiarse del sistema de rotación al de percusión o viceversa, de acuerdo al tipo de material perforado. El equipo de rotopercusión tiene un compresor de gran capacidad y potencia, con el cual logra extraer el material suelto desde el interior del pozo. Para profundidades mayores a 15 m, se debe utilizar agua para lograr los mismos resultados. Estos equipos permiten perforar con grandes diámetros (12 a 23"), en suelos rocosos o con material pétreo grueso; en suelos arcillosos, no logran rendimientos similares a los que se obtienen en suelos granulares (**ver figura 12**).

10.3 Profundidad del pozo

Es un parámetro de diseño muy importante y generalmente es posible determinarlo con antecedentes de otros pozos en las cercanías del estudio o con estudios hidrogeológicos preliminares (CIREN, DGA, SERNAGEOMIN, etc.).

La profundidad será fijada inicialmente con base en los espesores, profundidades y rendimientos específicos de los acuíferos, tratando de cubrir la demanda o la necesidad para el uso que se pretende dar al agua. Es recomendable que si se trata de un acuífero que funciona como libre, la perforación llegue hasta el piso del mismo, para evitar efectos de penetración parcial. Por la misma razón, en acuíferos confinados se recomienda captar todo el espesor del acuífero, salvo que los espesores sean muy grandes o los caudales de extracción demandados sean pequeños para aceptar una solución de penetración parcial. Otra razón que fija la profundidad del pozo es la presencia de estratos que contengan agua de mala calidad.

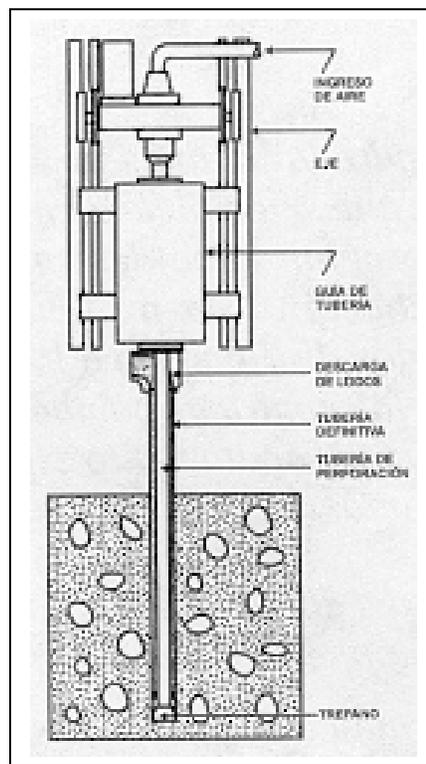


Figura 12. Sistema de perforación a rotopercusión

10.4 Diámetro del pozo

Para fijar el diámetro de la tubería influyen factores esencialmente hidráulicos. En general se distingue dos de estos factores en la tubería: uno que va desde la superficie hasta la profundidad donde irá instalada la bomba, y se denomina *cámara de bombeo*; y otro que se extiende hasta el *sistema de captación* (rejilla o tubo ranurado).

En la cámara de bombeo el diámetro recomendable para la tubería es el doble del de la bomba, aunque este valor será función de la longitud de la cámara de bombeo, ya que a mayor profundidad el riesgo de tener desviaciones en la perforación aumenta, por lo que a

mayor longitud es recomendable permitirse una mayor holgura. A continuación se presenta valores de diámetros recomendados en función de caudales extraídos.

Tabla 4. Diámetro de la bomba y tubería en función del caudal de extracción (perforación, desarrollo y costos de sondaje. Ex Dpto. Rec. Hidrául. CORFO)

Diámetro Máx. Bomba, pulg	Diámetro Mín. Tubería, pulg	Caudal, l/s
5	6	0-10
6	8	9-24
8	10	21-40
10	12	36-80
12	14	72-110
14	16	98-180

Una vez definido el diámetro para la entubación, se puede determinar el diámetro de la tubería de perforación que se empleará en la construcción del pozo. El diámetro inicial de perforación debe determinarse teniendo en cuenta el diámetro definitivo de entubación y la profundidad prevista para el pozo, considerando posibles cambios de diámetro a lo largo de ella.

Con relación a la longitud de la cámara de bombeo, ésta se calculará sumando a la profundidad del nivel estático el abatimiento esperado, que es a su vez función del caudal de extracción, más la sumergencia necesaria para un buen funcionamiento de la bomba.

El nivel estático se obtendrá del sondeo de los pozos aledaños al sitio donde se pretende realizar la perforación, el abatimiento debido al bombeo se obtendrá aplicando ecuaciones de hidráulica de pozos (Responsabilidad de la empresa de perforación), y la sumergencia de la bomba se puede obtener de los fabricantes, pero en general se pueden considerar de unos 5 a 8 metros, dependiendo del caudal de extracción.

10.5 Tubería de entubación definitiva

La tubería de entubación definitiva del pozo debe ser capaz de resistir la presión provocada por los empujes laterales del terreno y la presión hidrostática de los acuíferos existentes, esto por posibles diferencias de nivel de aguas entre el interior y el exterior del pozo. La conducción de construcción de estas tuberías está basada en criterios que condicionan su comportamiento estructural e hidráulico, de manera que cumplan con las características de sostenimiento de las paredes del pozo y de la conducción hidráulica que conecta al acuífero con la superficie, y permita una adecuada instalación del grupo de bombeo.

Las tuberías que se utilizan para habilitar los pozos son de acero tipo YODER, con extremos para soldar y se ajustan a las normas ASTM-53, ASTM-120 y API. En el caso de la tubería de PVC, los estándares exigidos para su uso en pozos profundos son superiores a los comúnmente utilizados en sistemas de riego. Se recomienda el PVC clase 11, 12 y 21 que tolera presiones entre 572 y 3000 Kpa. Estos estándares no se encuentran en el comercio local por lo que no se aconseja reemplazar el PVC que normalmente se utiliza en conducciones de riego por su uso en tuberías de pozos profundos por el riesgo de que colapse por las diferencias de presión que se producen en las formaciones acuíferas.

Las entubaciones definitivas deberán quedar verticales y alineadas. Ninguna tubería, en cuyo interior haya de colocarse un equipo de bombeo, deberá desviarse de la vertical más de 7,5 cm cada 30 m para los tubos de hasta 2” de diámetro nominal; más de 10 cm para diámetros entre 8” y 12”; ni más de 15 cm para diámetros mayores de 12”.

10.6 Habilitación

El proyecto de pozo también contempla el dimensionamiento de los componentes de la zona de captación y los procesos de limpieza de la obra.

Zona de captación: la zona de captación se define como el sector vivo y activo de la obra, y corresponde a aquel sector del revestimiento que enfrenta la zona filtrante por donde se produce el ingreso del agua. Este sistema permite el ingreso del agua limpia al pozo, exenta de sedimentos, y debe cumplir con exigencias de orden hidráulico, de manera que el pozo sea eficiente; es decir, que su *caudal específico* (l / s por metro de abatimiento) sea el mayor posible.

La zona de captación está conformada por dos partes: la rejilla o tubería ranurada y el filtro de gravas. Ambos elementos tienen por objeto permitir el acceso de agua libre de materiales finos en suspensión, impidiendo además derrumbes en la perforación. Los referidos elementos deben ser diseñados con el fin de generar el mínimo de pérdidas de carga hidráulica en el pozo.

Rejilla o tubería ranurada: las pérdidas de carga ocurridas en los filtros y rejilla están directamente relacionadas con el cuadrado de la velocidad del flujo de ingreso al pozo. Para un caudal conocido, la velocidad del flujo depende del área, la que se conoce como la superficie o área abierta de la rejilla; la misma que está dada por el número de aberturas o ranuras en la tubería y por la longitud y ancho de estas. A mayor área abierta de la rejilla, mayor velocidad de flujo, y en consecuencia menores pérdidas de carga, con el resto de los factores constantes.

Existe una variedad de alternativas (**ver figura 13**), tanto para tubería ranurada (orificios circulares, orificios rectangulares, ranuras verticales y ranuras horizontales), como para rejilla propiamente tal (rejilla de persianas o celosía y rejilla Johnson). En cualquier caso el fundamento hidráulico para una eficiente operación es el mismo, a mayor área abierta de la rejilla menor será la altura de succión. En la **figura 14** se comparan áreas abiertas de rejilla para tres tipos de filtros, y en ella se puede observar que la rejilla tipo Johnson posee 7 y 21 veces más área abierta que el ranurado horizontal y vertical respectivamente.

El tamaño de la rejilla está en función de la velocidad de entrada del flujo, espesor del acuífero, área abierta de la rejilla y caudal. El área abierta de la rejilla puede llegar a reducirse hasta en un 50% producto de la presencia de arenas, gravas, elementos químicos en solución y crecimientos bacteriales. La velocidad de entrada del flujo a través de la rejilla es un parámetro que se puede manejar para impedir el problema de reducción de su área. Los aumentos en velocidad y reducción de presión del agua que ingresa al pozo a través de la rejilla favorecen la formación de precipitados. Valores de velocidad de entrada del flujo recomendadas en función de la conductividad hidráulica del acuífero se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 5. Valores de velocidad de entrada recomendados en función de la conductividad hidráulica K

K, m/día	Velocidad de entrada, cm/s
< 20	1,0
20	1,5
40	2,0
80	3,0
120	4,0
160	4,5
200	5,0
240	5,5
> 240	6,0

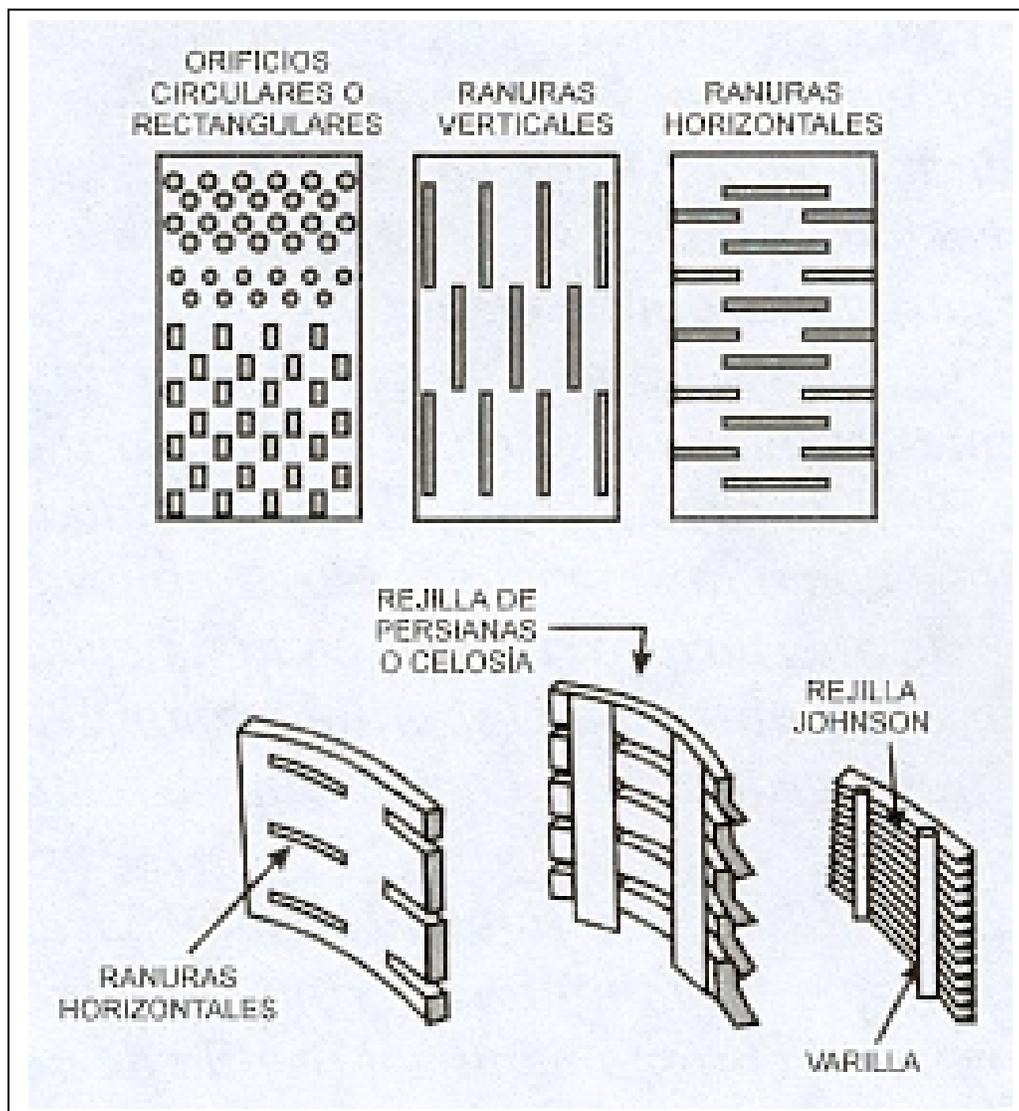


Figura 13. Tipos de perforación o ranurados de la tubería

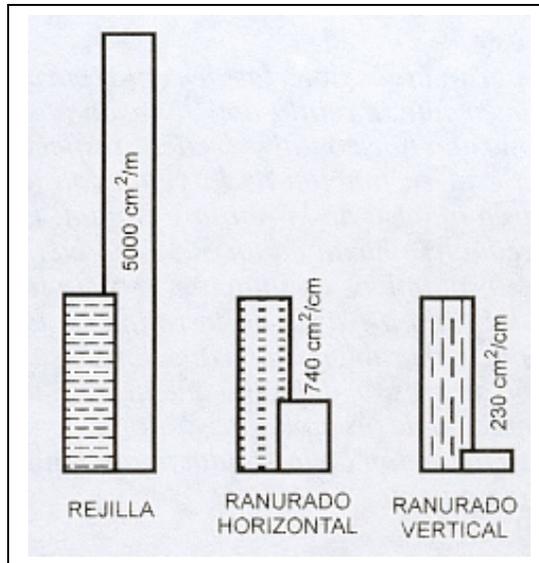


Figura 14. Diferencias de magnitud en área abierta de la rejilla para tres tipos de rejilla

Un valor comúnmente utilizado es el recomendado por La National Water Well Association, que indica que la velocidad máxima permitida es de 3 cm/s para valores de conductividad hidráulica iguales o mayores a 120 m/día.

El área abierta de la rejilla se calcula en función de la longitud y ancho de cada ranura y por el número de ranuras en función del diámetro de ésta. La expresión utilizada para determinar el área es la siguiente:

$$A = \Pi x D x (n x e x l) \quad \text{ecuación 5}$$

A: área abierta total, m²/m
D: diámetro de rejilla, m
n: número de ranuras por m²
e: ancho de la ranura, m
l: longitud de cada ranura

El área abierta efectiva (A_e) se considera igual a:

$$A_e = 0.5 x A \quad (m^2/m) \quad \text{ecuación 6}$$

Esto, por que se asume que un 50% de la rejilla se tapa con materiales finos al operar el pozo.

Para el cálculo de la velocidad, se divide el caudal de extracción por el área abierta de la rejilla, comprobándose que no exceda la velocidad mínima exigida.

$$V_c = \frac{Q}{L x A_e} \quad \text{ecuación 7}$$

L: longitud de la rejilla, m
 Q: caudal de extracción, m³/s

Si la velocidad excediera el valor 0.03 m/s, será necesario aumentar el diámetro o la longitud de la zona de captación. Para efectos del diseño, es de utilidad práctica la tabla de valores de velocidades críticas del flujo, que se indica a continuación:

Tabla 6. Valores de velocidad crítica del flujo según tipo de material

Materiales del acuífero	Diámetro de los granos, mm	Velocidad crítica, m/s
Arenas limosas	0,01-0,1	0,01-0,02
Arenas finas	0,10-0,2	0,02-0,035
Arenas medias	0,25-0,50	0,04-0,07
Arenas gruesas	1,0-2,0	0,11-0,17
Gravas finas	2,0-4,0	0,18-0,80

Fuente: R. C. Smith. Prospección y explotación de las aguas subterráneas, citado por E. Celedón

Por otra parte, es recomendable que el área abierta de la rejilla tenga un porcentaje mayor o igual a la porosidad de los acuíferos o a los filtros de grava o arena. Respecto al tamaño de la ranura, cuando se requiere filtro de grava se debe estimar en función del análisis granulométrico del filtro, el cual a su vez se determina en función de la granulometría de la formación donde se encuentra el acuífero. Dicho análisis se realiza mediante cribas o tamices estándar, la cantidad de material retenido por cada tamiz es expresada en peso y por ciento del total. Estos valores se grafican anotando en el eje de las ordenadas el por ciento del peso retenido acumulado, por lo que los valores de este eje van de 0 a 100. En el eje de las abscisas se grafican los valores del tamaño de los granos correspondientes, como se muestra en la **figura 15**.

El *diámetro efectivo* es un índice utilizado para determinar el grado de finura del material que compone al acuífero, y corresponde al tamiz equivalente de la curva granulométrica en el 90% retenido del material tamizado total acumulado. En la tabla siguiente se presenta resultados de un análisis granulométrico de una muestra del material de un acuífero.

Tabla 7. Análisis granulométrico de una muestra de material acuífero

Abertura de tamiz, cm	Peso acumulado, gm	Porcentaje retenido, %
0,165	24	6
0,117	72	18
0,084	140	35
0,058	220	55
0,041	300	75
0,030	344	86
0,020	372	93
Tamiz final	400	100

Para el caso de la muestra anterior el diámetro efectivo (90%), corresponde a una abertura de 0.0243 cm.

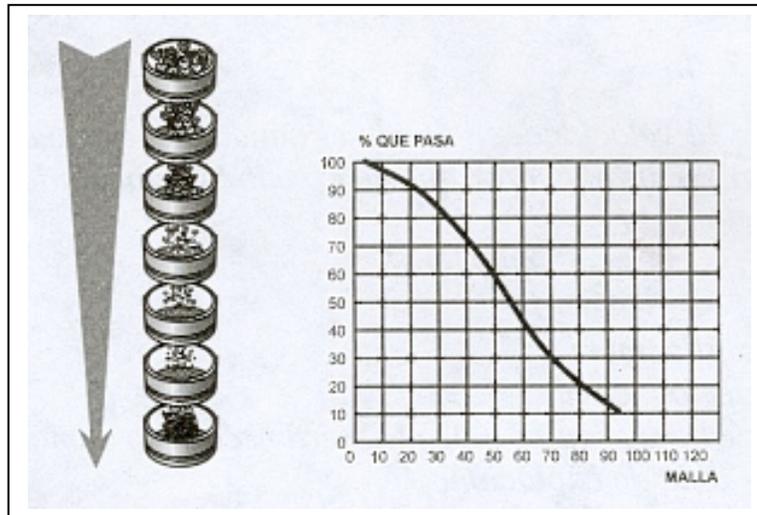


Figura 15. Tamices y curva de un análisis granulométrico

Por otra parte, el *coeficiente de uniformidad (CU)* de un acuífero, se define como la relación existente entre el valor de abertura de tamiz, equivalente al 40% retenido del material tamizado total acumulado (D_{40}), y el valor de abertura de tamiz equivalente al 90% retenido del material tamizado total acumulado (D_{90}); valor que da una idea de la pendiente de la curva granulométrica. Valores altos del CU corresponden a curvas más uniformes, es decir:

$$CU = \frac{D_{40}}{D_{90}} \quad \text{ecuación 8}$$

Para nuestro ejemplo, el coeficiente de uniformidad es:

$$CU = \frac{0,0775}{0,0243} = 3,2$$

Para formaciones de acuíferos de materiales relativamente finos y uniformes, es decir $CU \leq 5$, se recomienda para abertura de ranura el tamiz correspondiente a D_{40} y D_{50} si el acuífero no presenta o presenta riesgos de corrosión respectivamente. Para formaciones homogéneas de materiales más gruesos como gravas y arenas, se recomienda para abertura de ranura el tamiz correspondiente a D_{30} y D_{50} de la *fracción arenosa*; esto es, relacionado con la distribución de tamaño de grano sólo de las partículas de arena presentes en la muestra.

En el caso de formaciones de acuíferos de materiales relativamente finos y uniformes, es decir $CU > 5$, se recomienda para abertura de ranura, el tamiz correspondiente a D_{30} si el material sobre el acuífero es estable, y D_{50} si el material sobre el acuífero es inestable y con riesgo de derrumbes (por ejemplo material no consolidado).

En Chile, las paredes de la tubería de habilitación se dejan ranuradas en los tramos que enfrentan a los acuíferos atravesados durante la perforación, para permitir el flujo posterior de agua hacia el pozo. El ranurado normalmente se realiza en ranuras de 4" de longitud por

2 a 4 mm de ancho, alineadas en el sentido del tubo, alternando tramos huecos cada 4" con zonas de tubos.

Cuando se trata de acuíferos libres, la rejilla o tubería ranurada debe colocarse de preferencia en la parte inferior del acuífero. Su longitud deberá ser de un 50 a un 30% del espesor saturado del acuífero, ya que el abatimiento esperado será de un 70 a un 50% del mismo espesor; logrando así, pérdidas hidráulicas bajas y en consecuencia economía en la operación.

En los acuíferos confinados se aconseja utilizar una longitud del 70 al 80% del espesor del mismo, centrando la tubería ranurada o repartiéndola a lo largo del espesor total del acuífero e intercalando tramos de tubería ciega; evitando así, cambios bruscos de dirección en las líneas de flujo que llegan a la zona de captación. La recomendación anterior obedece a tener un ahorro en el costo del pozo, ya que es más económica la tubería ciega que la ranurada.

En ningún caso es recomendable que el nivel de bombeo vaya más allá de la parte superior de la tubería ranurada, evitando en lo posible que esta tubería permanezca seca o aportando en "cascada" en algún momento, para disminuir así el riesgo de oxidación y corrosión.

Filtro de gravas: se le llama filtro de gravas al relleno que se coloca entre la rejilla y la pared de la perforación. Su objetivo es estabilizar la pared de la perforación evitando derrumbes; retener la mayoría de los materiales finos que contiene la formación acuífera, evitando que penetren a la cámara de bombeo; e incrementar el diámetro efectivo del pozo y asegurar una buena porosidad y conductividad hidráulica alrededor del espacio anular en el sector ranurado. En ocasiones cuando los materiales del acuífero son gruesos y uniformes no es necesario colocar un filtro de grava propiamente tal, pero sí un empaque de gravas para estabilizar las paredes de la formación acuífera y evitar derrumbes (ver figura 16).

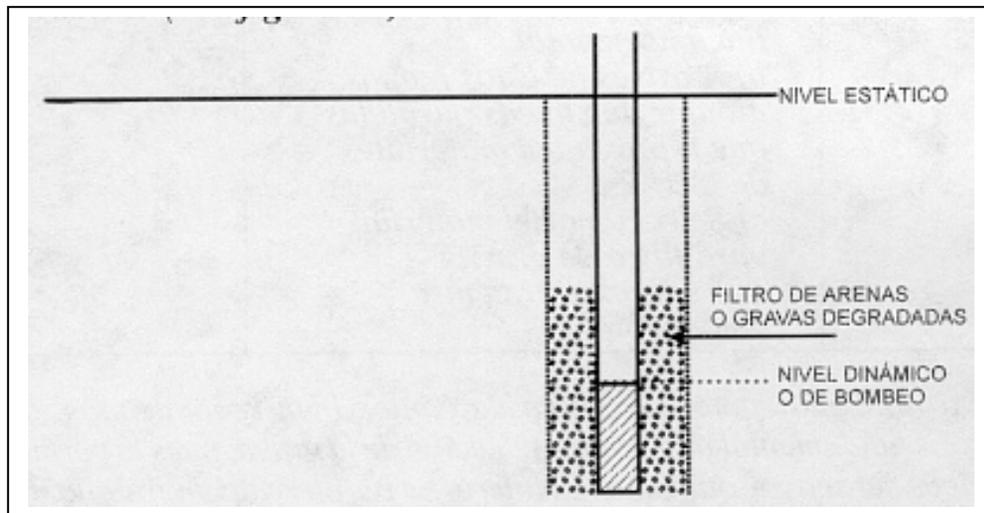


Figura 16. Filtro de gravas

Con el fin de diseñar el filtro de gravas, al igual que en el caso de la rejilla, se requiere contar con un análisis granulométrico de las formaciones acuíferas de donde se va a captar el agua. Normalmente los filtros de grava son necesarios cuando la formación acuífera es arenosa, con alto riesgo de entrada de este tipo de material al pozo, no siendo suficiente una rejilla o tubería ranurada. El criterio de selección de diámetro del material del filtro se basa también en el CU de la formación acuífera, existiendo una recomendación desarrollada por el Centro de Información de los Estados Unidos y que se presenta en la **tabla 8**.

Tabla 8. Criterios de selección del diámetro del material de filtro de grava

Coeficiente de uniformidad CU	Criterios de selección para el Filtro de grava	Tamaño ranurado de la rejilla
< 2.5	<p>a) CU entre 1 y 2.5 con un 50% del tamaño no mayor que 6 veces el 50% del tamaño del material de la formación acuífera.</p> <p>b) Si (a) no estuviera disponible, CU entre 2.5 y 5 con un 50% del tamaño no mayor que 9 veces el 50% del tamaño del material de la formación acuífera.</p>	≤ 10% del tamaño de grano acumulado del filtro de gravas
2.5 – 5	<p>a) CU entre 1 y 2.5 con un 50% del tamaño no mayor que 9 veces el 50% del tamaño del material de la formación.</p> <p>b) Si (a) no estuviera disponible, CU entre 2.5 y 5 con un 50% del tamaño no mayor que 12 veces el 50% del tamaño del material de la formación acuífera.</p>	≤10% del tamaño de grano acumulado del filtro de gravas
> 5	<p>a) Del análisis granulométrico, el 30% de tamaño de grano acumulado multiplicarlo por 6 y 9 localizando los dos puntos en el gráfico sobre una línea horizontal.</p> <p>b) A través de estos puntos dibujar dos líneas paralelas que representen materiales de $CU \leq 2.5$</p> <p>c) Seleccionar el material para filtro de gravas que se encuentra entre ambas líneas</p>	≤10% del tamaño de grano acumulado del filtro de gravas

El material utilizado como filtro será de cantos bien redondeados, lavados y uniformes. Es fundamental una prolija selección de la grava, pues la permeabilidad del filtro debe ser mayor que la del acuífero. Se requiere de un trabajo minucioso y prudente en la colocación del filtro, procurando que no se pierda la graduación de grava elegida. El espesor del filtro de gravas deberá ser de 7 a 20 cm (3 a 8”), dependiendo este valor de la profundidad del pozo y de lo regular de la construcción de la perforación; recomendándose siempre un espacio anular superior a 7 cm (3”), para evitar “punteos” del material durante su

colocación. Por otro lado, valores mayores de 20 cm (8”) del espesor del filtro entorpecen las operaciones de limpieza y en ocasiones resulta casi imposible remover los residuos de lodos de perforación contenidos en los acuíferos al terminar la construcción.

En muchas ocasiones, especialmente en Chile, las características del subsuelo posibilitan la creación de la pared de grava con las propias partículas que constituyen la formación. Al respecto, el Ingeniero Mexicano Vicente Vargas (1976) sugiere la siguiente receta para el buen diseño de estos filtros: “cualquier clase de materiales, por finos que sean, se pueden controlar con un filtro constituido por grava graduada, con partículas limitadas entre ¼ y ½ pulgada de diámetro”.

Según G. Castany, citado por E. Celedón (1978), sólo procede aplicar el procedimiento de construir la pared de grava artificial cuando la granulometría del acuífero es uniforme, lo que se produciría cuando el $CU \leq 2 - 2,5$; y cuando $D_{60\%}$ es menor de 0,5 mm y $D_{10\%}$ es mayor de 0,03 mm. Al contrario, si el $CU \geq 2$, no procedería ejecutar pared de grava artificial y sólo construirla con el simple desarrollo natural del acuífero.

El criterio de Karl Terzaghi (Celedón, 1978) establece que: “un material granular satisface los requisitos necesarios y suficientes para usarse como filtro de protección, si el 15% de su tamaño (D_{15}) es cuando menos 4 veces tan grande como las partículas mayores de la formación a proteger, que esté en contacto con el filtro, y no más de 4 veces que el 85% de la graduación D_{85} de las partículas más finas de la formación”; es decir:

$$\frac{D_{15}(\text{pared} - \text{grava})}{D_{85}(\text{acuífero})} > 4$$

Ejemplo 2. Sean los valores característicos del material acuífero A (arena fina homogénea) y acuífero B (arena heterogénea), siguientes:

Tamaño	D95	D90	D85	D75	D60	D50	D30	D15	D10
Acuíf. A	0,30	0,25	0,21	0,17	0,135	0,12	0,095	0,017	0,065
Acuíf. B	0,65	0,5	0,4	0,25	0,15	0,12	0,75	0,05	0,042

Aplicando la relación de Terzaghi, la selección del relleno de grava para el acuífero A es:

$$D_{85} < 0,21 \times 4 = 0,84 \text{ mm}$$

$$D_{15} > 0,017 \times 4 = 0,068 \text{ mm}$$

$$CU = D_{60} / D_{10} = 0,135 / 0,065 = 2,1$$

Relleno de grava para el acuífero B:

$$D_{85} < 0,4 \times 4 = 1,6 \text{ mm}$$

$$D_{15} > 0,05 \times 4 = 0,2 \text{ mm}$$

$$CU = D_{60} / D_{10} = 0,15 / 0,042 = 3,6$$

10.7 Limpieza y desarrollo del pozo

Este proceso consiste en un conjunto de operaciones, realizadas una vez colocada la rejilla, destinadas a extraer los residuos de la perforación (lodos); a estabilizar las formaciones en torno a las rejillas, logrando un arreglo y mejoramiento en la granulometría; a aumentar la permeabilidad del acuífero al nivel que tenía previo a la perforación, y que se ve reducida por la perforación misma al compactar las paredes del pozo; a extraer la presencia de lodos que recubren las paredes de este; y finalmente, a prolongar la vida útil del pozo.

Una vez terminado el pozo deberá realizarse operaciones de limpieza que tienen como objetivo desalojar la bentonita, o en forma más general los lodos de perforación utilizados durante la construcción. Los métodos de desarrollo son básicamente vaivén y pistón, chorros de agua a altas velocidades, aire comprimido, bombeos intermitentes o agitación y sobrebombeo. Es conveniente tomar en cuenta que la limpieza será más difícil conforme el acuífero sea más fino, o cuando el tiempo de construcción del pozo tenga una larga duración.

De acuerdo con lo anterior, es recomendable realizar la construcción del pozo lo más rápidamente posible, y una vez entubado y engavillado bombear y realizar las operaciones de limpieza sin pérdida de tiempo. Cuando los acuíferos son muy finos es conveniente utilizar lodos orgánicos para aprovechar su autodegradación y así, facilitar las operaciones de limpieza.

Otro factor que influye en la selección del método de limpieza del pozo, es el tipo de rejilla instalado en la zona de captación; si el área de entrada es la apropiada serán más eficientes y rápidas las operaciones de limpieza y desarrollo.

Además de los métodos mecánicos mencionados, existen aditivos químicos de agentes dispersantes que pueden acelerar el proceso de limpieza. Estos cumplen la misión de facilitar la eliminación de las arcillas presentes en el acuífero, pues las ponen en estado de suspensión, evitando su sedimentación, ya sea en el fondo del pozo o en la rejilla.

11. PRUEBAS DE BOMBEO

Las pruebas de bombeo son indispensables para conocer el comportamiento de los pozos y determinar las constantes de formación de los acuíferos (T y S). Las pruebas consisten básicamente en un control sistemático del caudal, de los niveles de agua y del tiempo transcurrido durante el bombeo del pozo. Estas pruebas son reconocidas como de caudal variable y caudal constante.

11.1 Prueba de caudal variable

La prueba de caudal variable o escalonado, consiste en bombear el pozo con diferentes caudales fijos durante períodos definidos, controlando los niveles de agua y el tiempo. Las Bases Técnicas de los Concursos a la Ley 18 450 establecen observaciones de niveles en función del tiempo conforme a la siguiente escala: 0 – 5 – 10 – 15 – 30 – 45 y 60 minutos,

y después cada 30 min hasta que el nivel deprimido se estabilice, no excediendo de 12 horas por etapa.

Estas mediciones incluyen en consecuencia, el nivel estático (antes de empezar el proceso de bombeo), el caudal de agua que se extrae, simultáneamente con el nivel dinámico correspondiente, lo que se realiza con una frecuencia determinada (**ver ejemplo 4**).

Los resultados de esta prueba permiten definir la curva de “agotamiento” del pozo y con ella diseñar las condiciones de explotación de la captación, proyectando en el tiempo la tendencia de los niveles para los diversos caudales. Con ayuda de un gráfico semilogarítmico se logra tener una estimación del comportamiento del pozo a futuro.

C.V. Theiss (1935) concluyó una investigación que culminó con el descubrimiento de una expresión matemática que permite el cálculo del descenso del nivel de agua en un pozo, en función del tiempo de duración y de su caudal de bombeo.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{ecuación 9}$$

$$u = \frac{r^2 x S}{4xTt}$$

Donde r es el radio efectivo de construcción, y t el tiempo de bombeo.

Si se entra con el valor de u en la **tabla 10**, se obtiene el valor de la función de pozo W (u); entonces se podrá conocer el descenso s (depresión del nivel estático del pozo) para producir el caudal del proyecto Q.

Según Cooper y Jacob (1946), para $S \leq 0,3$, la ecuación 9 se puede escribir como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0,5772 - \ln u) ; \text{ sustituyendo } u:$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4xTt}{r^2 x S} - 0,5772 \right) \quad \text{ecuación 10}$$

Ejemplo 3. Un acuífero freático con una transmisividad $T = 1\,200 \text{ m}^2 / \text{día}$ se bombea mediante un pozo que penetra completamente con un caudal de $1\,500 \text{ m}^3 / \text{día}$. El radio de influencia $r_i = 500 \text{ m}$ y el pozo tiene un radio efectivo $r_e = 0,30 \text{ m}$. ¿Cuál es el descenso del nivel freático en el pozo luego de 2 días de bombeo?. Suponga que $S = 0,2$

Aplicando la ecuación 10 se tiene:

$$s = \frac{1500}{4 \times 3,1416 \times 1200} \left[\ln \left(\frac{4 \times 1200 \times 2}{0,3^2 \times 0,2} \right) - 0,5772 \right] = 1,25 \text{ m}$$

Por lo tanto, la depresión del nivel estático del pozo luego de 2 días de bombeo continuo es 1,25 m.

Tabla 10. Valores de la función de pozo de Theiss $W(u)$

u	$W(u)$	u	$W(u)$
0,0001	8,63	0,1	1,82
0,0002	7,94	0,2	1,22
0,0004	7,25	0,4	0,702
0,0006	6,84	0,6	0,454
0,0008	6,55	0,8	0,311
0,001	6,33	1,0	0,219
0,002	5,64	1,2	0,158
0,004	4,95	1,4	0,116
0,006	4,54	1,6	0,0863
0,008	4,26	1,8	0,0647
0,01	4,04	2,0	0,0489
0,02	3,35	2,5	0,0249
0,04	2,68	3,0	0,0131
0,06	2,30	3,5	0,00697
0,08	2,03	4,0	0,00378

11.2 Prueba de caudal constante

La prueba de caudal constante, similar a la anterior pero manteniendo un solo caudal durante un período definido, permite calcular la transmisibilidad del acuífero. En el caso de disponer de uno o varios pozos de observación será posible calcular el coeficiente de almacenamiento, para lo cual habrá que controlar los niveles y el tiempo en cada uno de ellos.

El tiempo de duración de las pruebas se debe condicionar a la trascendencia del proyecto y es materia de decisión del propietario de la obra. Sin embargo, lo usual es dar unas 8 a 12 horas para la prueba de caudal variable y 24 horas para la de caudal constante. La Comisión Nacional de Riego y la Dirección General de Aguas exige estos tiempos en las pruebas de bombeo, con fines de presentación de proyectos a la ley 18 450 e inscripción de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas respectivamente. Esta prueba se hará con un caudal que no supere el 90% del máximo caudal aforado en la prueba de gasto variable.

Teóricamente la variación de los niveles de agua en el pozo tiene un comportamiento de línea recta en función del logaritmo del tiempo. Por esta razón se debe medir de acuerdo con una escala de tiempos que siga aproximadamente una ley logarítmica. Una escala práctica es medir al minuto, 2, 3, 4, 5, 6; 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20; 25, 30, 35, 40; 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120; 150, 180, 210, 240...., y más minutos en la misma secuencia.

Ejemplo 4. En las tablas 11 y 12 y en las figuras 18 y 19 se presenta un ejemplo de las pruebas de bombeo, tomado del documento de PRODECOP INIA-Intihuasi. El pozo que se evalúa presenta un nivel estático a los 22,69 m; efectuándose 5 pruebas a caudal variable y una prueba a caudal constante ($Q = 13$ l/s), equivalente al 87% del caudal máximo utilizado. Es interesante destacar que la recuperación que se logra luego de la prueba a caudal variable, se efectuó en el 10% del tiempo que dura la prueba.

Tabla 9. Prueba de bombeo a caudal variable. Datos de abatimiento y recuperación**Nivel estático: 22,69 m****Inicio de bombeo: 09:00 h ; inicio de recuperación: 20:04 h****Fin de bombeo: 20:04 h ; fin de recuperación: 21:14 h****Duración de bombeo: 664 min ; Tiempo de recuperación: 70 min**

Etapa 1, Q = 2,1 l/s				Etapa 2, Q = 5 l/s				Etapa 3, Q = 8 l/s		
t, min	N.D., m	Abat., m	Q°, l/s	t, min	N.D., m	Abat., m	Q°, l/s	t, min	N.D., m	Abat., m
1	25.55	2.86	2.05	1	29.75	7.06		1	39.18	16.49
2	25.6	2.91		2	30.93	8.24		2	40.06	17.37
3	25.62	2.93		3	31.25	8.56		3	40.06	17.37
4	25.47	2.78		4	31.3	8.61		4	40.16	17.47
5	25.75	3.06	2.05	5	31.69	9		5	40.17	17.48
6	25.57	2.88		6	31.92	9.23		6	40.37	17.68
7	25.51	2.82	2.1	7	32.04	9.35		7	40.62	17.93
8	25.47	2.78		8	32.04	9.35		8	40.82	18.13
9	25.43	2.74		9	32.06	9.37		9	41.03	18.34
10	25.39	2.7		10	32.09	9.4		10	41.1	18.41
12	25.22	2.53		12	32.15	9.46		12	41.89	19.2
14	25.8	3.11	2.1	14	32.17	9.48		14	41.75	19.06
16	25.64	2.95		16	32.25	9.56		16	42.19	19.5
18	25.61	2.92		18	32.27	9.58		18	42.32	19.63
20	25.6	2.91	2.1	20	32.27	9.58		20	42.52	19.83
25	25.62	2.93		25	32.28	9.59		25	42.7	20.01
30	25.55	2.86		30	32.81	10.12	5	30	43.05	20.36
35	25.49	2.8	2	35	32.95	10.26		35	43.11	20.42
40	25.69	3		40	33	10.31		40	43.03	20.34
45	25.75	3.06		45	33.1	10.41	5	45	43.06	20.37
50	25.77	3.08		50	33.21	10.52		50	43.02	20.33
55	25.84	3.15		55	33.35	10.66		55	43.06	20.37
60	25.88	3.19		60	33.43	10.74	5	60	43.05	20.36
70	25.81	3.12	2.1	70	33.62	10.93		70	43.32	20.63
80	25.81	3.12	2.1	80	33.69	11		80	43.3	20.61
90	25.75	3.06	2.1	90	33.77	11.08		90	43.31	20.62
100	25.75	3.06		100	33.92	11.23		100	43.37	20.68
110	25.75	3.06		110	33.89	11.2		110	43.39	20.7
120	25.75	3.06		120	33.91	11.22		120	43.39	20.7

Q°: ajuste de caudal

Tabla 9. Continuación

Etapa 4, Q = 13,5 l/s				Etapa 5, Q = 15 l/s				Recuperación		
t, min	N.D., m	Abat., m	Q°, l/s	t, min	N.D., m	Abat., m	Q°, l/s	t, min	N.D., m	N.Res., m
1	49	26.31		1	71.2	48.51		665	38.5	15.81
2	52.06	29.37		2	72.14	49.45		666	32.53	9.84
3	53.06	30.37		3	73.21	50.52		667	30.17	7.48
4	54.34	31.65		4	74.09	51.4		668	29.03	6.34
5	55.64	32.95						669	28.26	5.57
6	55.86	33.17	13.5					670	27.67	4.98
7	56.04	33.35						671	27.33	4.64
8	56.54	33.85						672	27.03	4.34
9	57	34.31						673	26.7	4.01
10	57.53	34.84						674	26.4	3.71
12	57.21	34.52	13.5					676	26.02	3.33
14	57	34.31						678	25.7	3.01
16	57.77	35.08						680	25.4	2.71
18	57.94	35.25						682	25	2.31
20	58.4	35.71						684	24.66	1.97
25	58.63	35.94						689	24.36	1.67
30	59.42	36.73						694	24.1	1.41
35	59.66	36.97						699	24.01	1.32
40	59.49	36.8						704	23.88	1.19
45	59.41	36.72						709	23.7	1.01
50	59.43	36.74						714	23.6	0.91
55	59.29	36.6	13.5					719	23.54	0.85
60	64.74	42.05						724	23.47	0.78
70	65.77	43.08						734	23.15	0.46
80	66.4	43.71								
90	64.94	44.25	13.5							
100	68.19	45.5								
110	69.2	46.51								
120	69.12	46.43								
130	69.07	46.38		A los 4 min se alcanza el nivel de agotamiento, se detiene la bomba y se toma la recuperación.						
140	69.1	46.41								
150	69.92	47.23								
160	69.37	46.68								
170	68.59	45.9								
180	68.58	45.89								
190	68.61	45.92								
200	69.06	46.37								
210	69.18	46.49								
220	68.93	46.24								
230	68.97	46.28								
240	69.07	46.38								
250	69.05	46.36								
260	69.09	46.4								
270	68.96	46.27								
280	68.98	46.29								
290	69.05	46.36								
300	69.07	46.38								

Fig. 18. Gráficos del abatimiento del nivel de agua en el pozo a caudal variable y curva de recuperación
PRODERCOOP pagina 106

Tabla 10. Prueba de bombeo a caudal constante. Datos de abatimiento y recuperación

Inicio de bombeo: 19/04/97; 21:14. **Inicio de recuperación:** 20/04/97; 21:14 h

Fin de bombeo: 20/04/97; 21:14 h. **Fin de recuperación:** 21/04/97; 08:00 h

Duración de bombeo: 1440 min ; **Tiempo de recuperación:** 646 min

Bombeo a Q Cte., 13 l/s				Bombeo a Q Cte., 13 l/s				Recuperación		
t, min	N.D., m	Abat., m	Q°, l/s	t, min	N.D., m	Abat., m	Q°, l/s	t, min	N.D., m	Abat., m
1	39.68	16.99		210	62.8	40.11		1441	38.96	16.27
2	46.72	24.03		240	63	40.31		1442	31.56	8.87
3	48.02	25.33		270	63.18	40.49		1443	29.39	6.7
4	50.95	28.26		300	63.36	40.67		1444	28.55	5.86
5	51.94	29.25		330	64	41.31		1445	28	5.31
6	52.51	29.82		360	64.31	41.62	12.5	1446	27.42	4.73
7	53.55	30.86		390	65.2	42.51		1447	26.89	4.2
8	54.77	32.08		420	68.17	45.48		1448	26.67	3.98
9	55.36	32.67		450	70.59	47.9		1449	26.48	3.79
10	55.76	33.07		480	72.14	49.45		1450	26.23	3.54
12	56.79	34.1		510	74.28	51.59	12.0*	1452	25.8	3.11
14	56.81	34.12		540	70.1	47.41		1454	25.54	2.85
16	57.18	34.49		570	70.34	47.65		1456	25.31	2.62
18	57.23	34.54		600	70.59	47.9		1458	25.1	2.41
20	57.65	34.96		630	70.08	47.39		1460	24.94	2.25
25	58.25	35.56		660	70.61	47.92		1465	24.6	1.91
30	58.55	35.86		690	70.78	48.09		1470	24.36	1.67
35	58.91	36.22		720	70.62	47.93		1475	24.2	1.51
40	59.51	36.82		750	70.54	47.85		1480	24.05	1.36
45	60	37.31		780	70.49	47.8		1485	23.94	1.25
50	60.41	37.72		810	70.88	48.19		1490	23.81	1.12
55	60.73	38.04		870	67.65	44.96	11.5*	1495	23.7	1.01
60	60.51	37.82		930	67.35	44.66		1500	23.61	0.92
70	60.24	37.55		990	67.25	44.56		1510	23.52	0.83
80	60.3	37.61		1050	66.67	43.98		1520	23.45	0.76
90	60.71	38.02		1110	67.68	44.99		1530	23.38	0.69
100	61.15	38.46		1170	68.67	45.98		1620	22.98	0.29
110	61.24	38.55		1230	69.34	46.65		2086	22.84	0.15
120	62.06	39.37		1290	69.49	46.8				
130	62.52	39.83		1350	69.35	46.66				
140	62.85	40.16		1410	69.39	46.7				
150	62.62	39.93		1440	69.37	46.66				
160	62.08	39.39								
170	62.83	40.14								
180	62.74	40.05								

Q°: se comprueba caudal

* : nivel de agotamiento

Figura 19. Gráficos de abatimiento y recuperación a caudal Cte.,y curva de agotamiento del pozo
PROPDECOOP pagina 108

12. EJEMPLO DE DISEÑO DE POZO PROFUNDO

A través de sondeos preliminares de una región con fines de explotación de aguas subterráneas se obtuvo la siguiente información:

Nivel estático: 18.0 m

Transmisividad: $0.0044 \text{ m}^2 / \text{s}$

Coefficiente de almacenamiento: 0,00005

Caudal: 60 l / s

Ubicación del acuífero: entre los 45 y 64 m

Tipo de acuífero: confinado

Análisis granulométrico: de la formación del acuífero, la curva granulométrica dio un diámetro efectivo al 40% y 90% equivalente al tamiz de 0,25 mm y 0,09 mm respectivamente; y en la granulometría del filtro se obtuvo 0,07 mm para el 90%.

El abatimiento esperado será de 10 m, considerando un bombeo continuo de unos 2 meses y un diámetro de la perforación del pozo de unos 60 cm.

De acuerdo a los referidos antecedentes, la cámara de bombeo requiere una longitud de:

Nivel estático	18,0 m
Abatimiento esperado	10,0 m
Abatimiento regional	3,0 m
Sumergencia de la bomba	<u>10,0 m</u>
Total	41,0 m

La variación de niveles estacionales debe ser pequeña debido al valor bajo de la transmisividad, aunque siempre es conveniente verificar esta condición. En la sumergencia de la bomba se incluye la longitud necesaria para alojar el cuerpo de impulsores más una longitud adicional, para asegurar la sumergencia del impulsor inferior (7 m), y un abatimiento del acuífero a nivel regional. El abatimiento regional es una información que se debe obtener a través de las oficinas técnicas regionales (Dirección de riego, DGA, CNR); si no existieran estos datos, será necesario investigar en pozos ya existentes en el área de estudio.

En el ejemplo se consideró un abatimiento regional de 0,2 m anuales aplicados durante una vida útil del pozo de 15 años ($15 \times 0,2 = 3,0 \text{ m}$).

Para extraer el caudal de 60 l/s se requiere de una bomba de 10 pulg (**tabla 4**), por lo que se propone una cámara de bombeo de 20 pulg de diámetro, una longitud de 41 m y un espesor de tubería de 3/16 pulgadas.

El acuífero está situado entre los 45 y 64 m; por lo tanto, la zona de captación se ubicará en donde se localiza el acuífero consiguiendo una penetración total. Es necesario diseñar el filtro de gravas y la rejilla, como es un acuífero confinado se utilizará una longitud de 80% del espesor del acuífero, centrando la tubería en una longitud de 15 m ($0,80 \times 19$).

Se debe determinar la necesidad de utilizar filtro de grava: el criterio en este caso es basarse en la información de la curva granulométrica de la formación acuífera y la relación D_{40} / D_{90} ; cuando ésta es menor que 3 es necesario el uso de filtro de grava. En el presente caso se tiene:

$$D_{40} / D_{90} = 0,25 / 0,09 = 2,8$$

Es decir, es necesario ubicar un filtro de gravas cuyo espesor será de 10 cm, favoreciendo su colocación y posterior limpieza.

En la zona de captación también se ubicará la rejilla y su diámetro de abertura es dependiente de la presencia del filtro de gravas; como éste es requerido, la recomendación es que la abertura de la rejilla debe ser equivalente a D_{90} del filtro. De acuerdo a la curva granulométrica de nuestro ejemplo, la abertura de la rejilla resulta ser de 0,07 mm que corresponde al 90% retenido del filtro de arenas graduadas.

El diámetro de la tubería en la zona de captación se obtiene considerando que la velocidad de descenso del agua en el interior de ésta, depende del valor de la conductividad hidráulica; es decir:

$$T = K \times H$$

$$K = T / H$$

$$K = \frac{0,0044m^2 / s}{19m} \times 86400s = 20m / día$$

De la **tabla 5** se obtiene que la velocidad de entrada a la tubería a través de la rejilla debe ser igual o menor a 1,5 m/s. Entonces:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,06m^3 / s}{\Pi \frac{D^2}{4} m^2} = 1,5m / s$$

Despejando:

$$D = 0,2257 m = 8,88 \text{ pulg}$$

$$D = 9 \text{ pulg mínimo aceptable}$$

Para determinar el diámetro definitivo de la tubería de la rejilla se debe calcular el área abierta de la rejilla, para lo cual la restricción existente es que la velocidad de entrada a través de ella no debe sobrepasar los 0,03 m/s, aunque en el caso presente, donde la conductividad hidráulica es tan baja, es conveniente utilizar una velocidad no mayor a 0,01 m/s.

De acuerdo a lo anterior, las tuberías a emplear serán aquellas que tengan una abertura menor a 1 mm, lo que obliga a utilizar el tipo helicoidal: para una velocidad de entrada de 0,03 m/s se requiere un área de 2 m^2 ; si la velocidad es de 0,02 m/s el área abierta requerida es de unos 3 m^2 ; y si se adopta una velocidad de sólo 0,01 m/s el área será de 6 m^2 .

Por lo tanto, el pozo requerirá una tubería ranurada tipo helicoidal de 12 pulg de diámetro con una abertura menor a 1 mm.

13. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Custodio, E y Llamas, M. R. 1976. *Hidrología subterránea, tomo 2*. Barcelona, España.

Celedón S., Eugenio. 1978. *Captaciones de aguas subterráneas. Curso de Postgrado Aguas Subterráneas*. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Universidad de Chile. Santiago, Chile, abril.

CNR-CIREM. 1996. *Manual de obras menores de riego*. Comisión Nacional de Riego y Centro de Información de recursos Naturales. Santiago, Chile.

PRODECOP-INIA Intihuasi. 1998. *Manual de riego*. Proyecto de desarrollo para comunidades campesinas y pequeños productores de la IV región. La Serena, Chile.

VERTIENTE. 1999. Revista del Capítulo Chileno de ALHSUD. Año 4, N° 4, julio