

REVISTA ENERGETICA

26

Julio - Agosto/82
July - August/82



Organización Latinoamericana de Energía
Latin American Energy Organization

MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA **olade** WINDMILLS
FOR PUMPING WATER **olade** ENERGIA ELECTRICA EN EL ECUADOR
ELECTRICITY POWER IN ECUADOR **olade** EL CARBON COMO IN-
TEGRANTE DE LA POLITICA ENERGETICA DE VENEZUELA **olade** COAL
AS A COMPONENT IN VENEZUELAN ENERGY POLICY.

El presente documento forma parte de
4 entregas sucesivas.

MOLINOS DE VIENTO PARA BOMBEO DE AGUA

1a. entrega

INTRODUCCION

Uno de los objetivos principales de la Organización Latinoamericana de Energía es el de fortalecer los programas nacionales de sus Países Miembros en el área energética. Por eso, el Programa Regional de Energía Eólica de OLADE ha tenido un componente de fundamental importancia, que es la capacitación técnica complementaria de los profesionales de la región que se hacen cargo de los distintos programas de Energía Eólica.

Como avances concretos del Programa de Energía Eólica de OLADE podemos presentar la elaboración del Atlas Eólico Preliminar de Centroamérica y los trabajos, en adelantada etapa de consecución, del Atlas Eólico Regional y la realización de Cursos-Seminarios sobre la utilización del viento como fuente de energía.

El bombeo de agua a través de los molinos de viento, materia del presente trabajo, es la principal aplicación de la Energía Eólica. No solamente en los tiempos lejanos, sino hoy día encontramos millares de estas máquinas operando en todo el mundo y particularmente en América Latina.

Se considera que un documento que contiene estudios acerca de la aplicación más trascendental de la energía eólica, es la mejor manera de concluir esta etapa inicial del Programa de Energía Eólica de OLADE.

El recurso viento ha sido ampliamente analizado en Documentos Seriadados de OLADE; por lo tanto, éste se inicia, en el I Capítulo, con un estudio sobre el recurso hídrico, de fundamental importancia para el diseño del Sistema Conversor de Energía Eólica, seguido en capítulos sucesivos de estudios sobre las máquinas eólicas de eje horizontal y vertical utilizadas para el bombeo de agua, incluyendo el dimensionamiento de sus componentes principales, así como un enfoque respecto a la adecuación de estas máquinas a sus condiciones de operación. La bomba utilizada para elevar el agua, común a las dos modalidades de máquinas de viento, mereció un capítulo aparte.

Finalmente, el documento concluye con un análisis económico sobre molinos de viento utilizados en el bombeo de agua, comparados con sistemas afines que utilizan otras fuentes de energía.

Para profundizar el estudio sobre cualquier punto aquí referido, se sugiere al lector consultar las referencias bibliográficas respectivas, cuyo listado forma parte de este documento.

A los profesionales latinoamericanos que trabajan con la utilización del viento como fuente de energía, se espera poder brindarles un informe de real provecho, objetivo y práctico. La respuesta a estos esfuerzos estará directamente relacionada ya sea con la mejoría de las condiciones de riego en la región o con un aumento en el suministro del agua que alimente los abrebaderos y las fuentes de la gran población rural de América Latina, haciéndoles partícipes del innegable desarrollo que hoy presenciamos.

Este documento, presentado y discutido en el I Curso-Seminario Latinoamericano sobre Molinos de Viento para Bombeo de Agua, promovido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC) y el Ministerio de Energía y Minas del Perú, y llevado a cabo en Lima, Perú fue elaborado en base a los trabajos preparados por los siguientes especialistas:

- BRASIL: Ing. Sergio Leal Braga
 Dr. Alcir de Faro Orlando
- Ing. Francisco E.M. Saboya
 Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro
- COLOMBIA: Ing. Jorge A. Granados Robayo
 Universidad Nacional
- CHILE: Ing. Luis Guardamagna Sanhueza
 Instituto de Investigaciones Tecnológicas
- MEXICO: Ing. Enrique Caldera Muñoz
 Instituto de Investigaciones Eléctricas
- PERU: Ing. Alfredo Oliveros Donohue
 Ing. Teodoro Sánchez Campos
 Ing. Emilio Mayorga Navarro
 Ing. Alberto Ruíz de Somocurcio
 Instituto de Investigación Tecnológica Industrial
 y de Normas Técnicas

De los trabajos presentados por los participantes en el Seminario, cabe destacar el que hizo el ingeniero Lodevicus Vanssen, del Comité Directivo para la Energía Eólica para los Países en Desarrollo, con sede en Holanda, quien estaba radicado temporalmente en Perú, bajo un programa de Asistencia Técnica. Su ponencia se incluye en este documento como capítulo 6.

CAPITULO 1 – ANALISIS DEL RECURSO HIDRICO

1.1 EVALUACION POTENCIAL DEL RECURSO

1.1.1 Ciclo Hidrológico

El concepto central de la Hidrología es el “Ciclo del Agua” o “Ciclo Hidrológico” que comprende la circulación del agua de los océanos a la atmósfera, luego a los continentes y nuevamente a los océanos. (Figura 1).

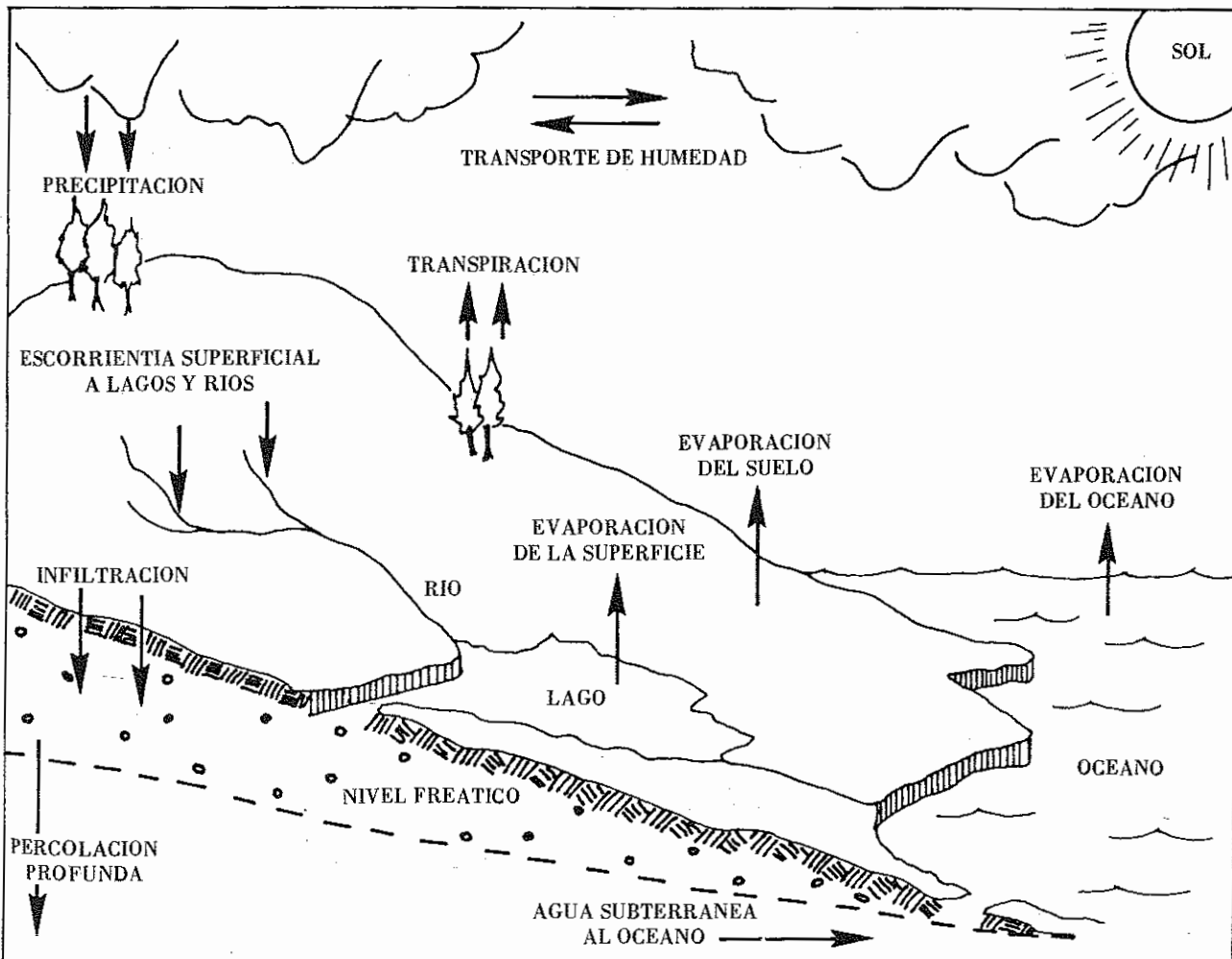


Figura 1 – Ciclo Hidrológico

En el desarrollo del Ciclo Hidrológico, las partículas de agua son transportadas mediante procesos de evaporación, vientos, precipitación, flujo superficial y subterráneo, etc. y pasan a través de los depósitos de almacenamiento que encuentran en su recorrido, tales como océanos, lagos, nubes, atmósfera, ríos, etc.

El estado que presentan las partículas durante cada uno de los procesos ya mencionados depende de las condiciones de temperatura y presión reinantes en cada instante; así, pueden pasar del estado gaseoso al líquido mediante disminución de la presión y la temperatura, o del estado sólido al líquido simplemente cuando se aumenta la temperatura.

1.1.2 Volumen de Agua en el Ciclo Hidrológico

Se estima que el volumen total de agua en el globo terrestre es de aproximadamente 1350×10^{15} metros cúbicos. A esta conclusión se ha llegado con base en estudios independientes realizados por Ackerman & Lof y R. L. Nace, cuyos resultados no difieren significativamente entre sí y son presentados en la Tabla 1.

DISTRIBUCION DEL RECURSO AGUA	TABLA No. 1			
	Ackerman & Lof $m^3 \times 10^9$	Valores de R. L. Nace (corregidos) Volumen de agua $m^3 \times 10^9$	o/o de Recursos totales	o/o de Recursos de agua dulce
1. Océanos	1.307'510.000	1.300'000.000		
2. Lagos salados y mares interiores		100.000		
A. Total agua salada	1.307'510.000	1.300'100.000	97.26	
3. Glaciares y capas polares	30'427.978	28'500.000		77.652
4. Vapor atmosférico	14.185	12.700		0.035
5. Minerales hidratados	414			
6. Agua en animales y plantas	1.129			
B. Agua dulce no utilizable	30'443.706	28'512.700	2.13	77.687
7. Lagos	124.583	123.000		0.335
8. Ríos	1.151	1.230		0.003
RECURSOS SUPERFICIALES DE AGUA DULCE	125.734	124.230	0.01	0.338
9. Agua en el suelo	37.498	65.000		0.178
10. Agua subterránea (hasta 800 m)	4'499.808	4'000.000		10.898
11. Agua subterránea (Prof. mayor de 800 m)	5'630.927	4'000.000		10.898
RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA	10'168.233	8'065.000	0.60	21.974
C. Agua dulce disponible	10'293.967	8'189.230	0.61	22.31
D. Total recursos de agua dulce	40'737.673	36'701.930	2.74	100.00
E. Total recursos de agua tierra	1.348'247.673	1.336'701.930	100.00	

DISTRIBUCION APROXIMADA DEL AGUA EN LA TIERRA

Puede observarse que los recursos de agua subterránea son muy superiores a los recursos de agua dulce superficial. Sin embargo, su utilización plena depende de factores económicos y técnicos por cuanto más del 50 o/o del total del agua subterránea se encuentra por debajo de los 800 metros de profundidad.

1.1.2.1 Importancia del agua subterránea

El agua subterránea tiene, generalmente, las siguientes características:

- a. En la mayoría de los casos es agua que no está contaminado y se encuentra protegido de la polución.
- b. Se puede extraer por pozos, desde unos pocos lts/seg hasta cientos de lts/seg (miles de gpm).
- c. Es un poco más dura y más mineralizada que el agua superficial de la misma localidad, pero su calidad es más uniforme durante el año.
- d. No es necesario remover los sedimentos.
- e. Cuando está poluída, el tratamiento es simple y relativamente barato.
- f. La temperatura, como su calidad química, es relativamente uniforme durante el año.
- g. Es un suministro de emergencia en el caso de un desastre nuclear.

1.1.2.2 Distribución del agua subterránea

Humedad del suelo	$65 \times 10^{12} \text{ m}^3$
Agua a menos de 800 m de profundidad	$4 \times 10^{15} \text{ m}^3$
Agua a más de 800 m de profundidad	$4 \times 10^{15} \text{ m}^3$

1.1.3 Propiedades del Suelo

El medio poroso es básicamente un suelo compuesto de partículas sólidas, de agua y aire, agrupados en tal forma que dejan intersticios, que varían de tamaño y forma, interconectados entre sí, formando una red bastante complicada de conductos por entre los cuales circula el agua. En algunas rocas esta interconexión no existe, impidiendo así el paso del agua entre ellas; en otras estas interconexiones son de tamaños cavernosos. La naturaleza de los intersticios está determinada por la evolución geológica a que ha sido sometida la roca.

1.1.3.1 Porosidad

La porosidad es una medida del espacio intersticial de una roca, por consiguiente,

de la cantidad de fluido que el medio puede almacenar; se expresa como el volumen de espacio vacío dividido por el volumen total ocupado por la roca y depende de:

- a. Forma y colocación de las partículas
- b. Granulometría
- c. Grado de compactación

Ahora bien, si consideramos el caso especial de granos redondos la porosidad dependerá de la colocación de los mismos y no de su tamaño. Así, pueden ser obtenidos para las colocaciones cúbica y hexagonal valores del 47.6 o/o y 26 o/o respectivamente para cualquier diámetro de las partículas. (Figura 2).

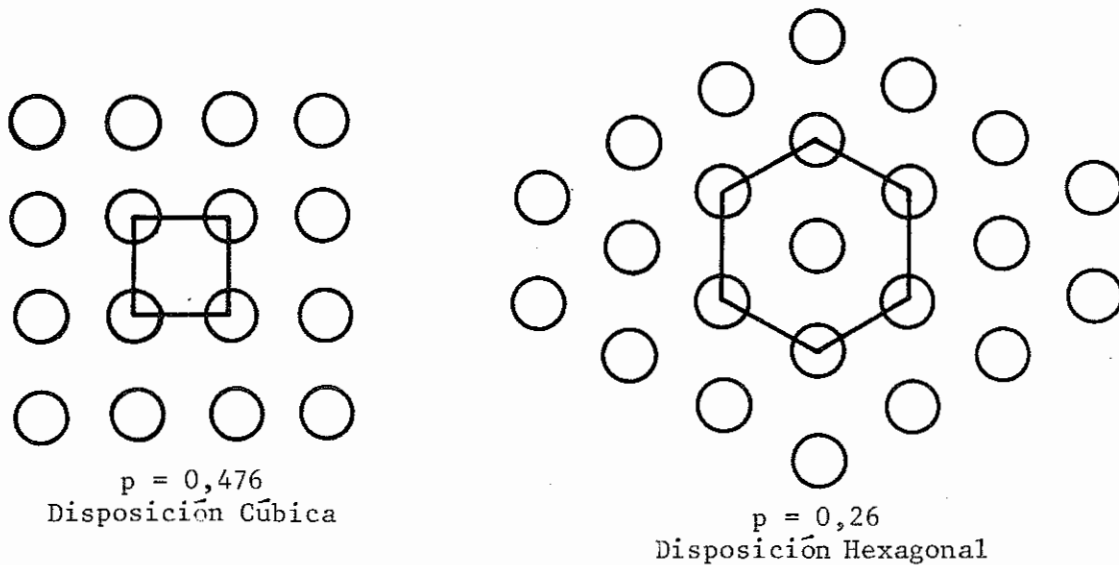


Figura 2 – Influencia de la disposición de los Granos en la Porosidad

Al comparar dos muestras de arena, una fina y otra media, bastante uniformes, el valor de la porosidad o sea la capacidad que tienen de almacenar una cierta cantidad de agua va a ser el mismo (teóricamente), aunque los poros individuales de la arena media sean de mayor tamaño. (Figura 3).

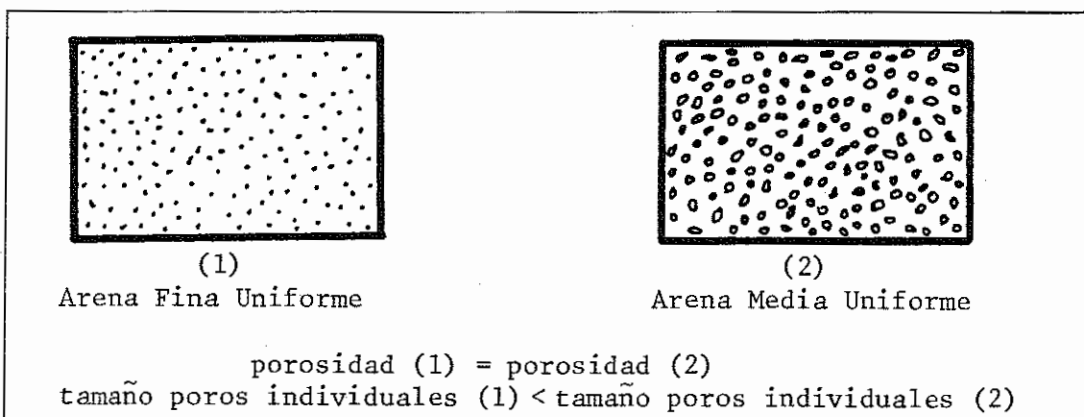


Figura 3 — Comparación de dos Muestras de Arena (Fina y Media)

La porosidad en las rocas sedimentarias variará dependiendo de la disposición de los espacios vacíos, como se ilustra en la Figura 4.

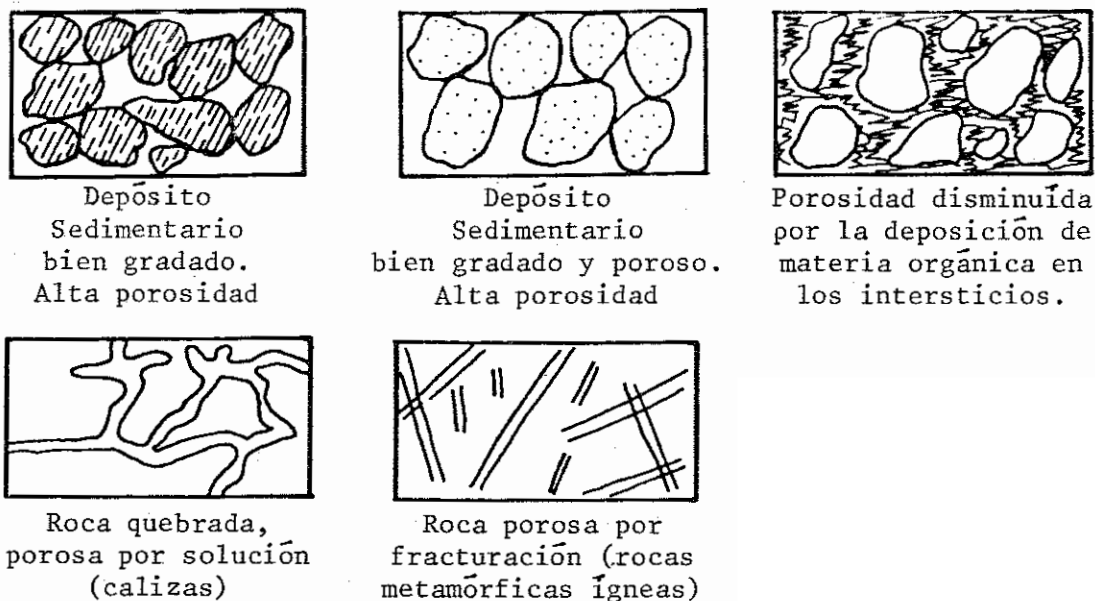


Figura 4 — Porosidad en función de los Espacios Vacíos en la Tierra

La determinación de la porosidad resulta más precisa para las rocas consolidadas que para los sedimentos no consolidados. Se puede considerar grande una porosidad mayor del 20 o/o, mediana entre el 5 o/o y el 20 o/o y pequeña menor que 5 o/o. La Tabla 2 indica algunos ejemplos de porosidad de ciertas rocas.

TABLA 2

POROSIDAD (p) DE ALGUNAS ROCAS PRINCIPALES

Rocas	P (o/o)*
Arcilla	45 – 55
Arena	35 – 40
Grava	30 – 40
Arena y Grava	20 – 35
Arenisca	10 – 20

*Estos valores dependen del grado de compactación

1.1.3.2 Permeabilidad

Permeabilidad es la capacidad que tiene un medio poroso para transmitir el agua; así llamamos permeable al terreno que permite el paso del agua e impermeable al terreno que prácticamente no la deja atravesar.

Lógicamente este concepto está íntimamente relacionado con la porosidad, vista anteriormente. Una roca granítica, por ejemplo, puede ser considerada, en un momento dado, como permeable si presenta fisuras o grietas por donde el agua pueda circular.

El valor de la permeabilidad depende de:

a. Granulometría: En general, se puede decir que una formación uniforme es más permeable que una no uniforme.

b. Porosidad: Aunque se han hecho varios estudios para determinar una relación entre la permeabilidad y las propiedades de un suelo, esto aún no está bien definido dada la gran dificultad que se encuentra al no poder considerar todos los factores que afectan la facilidad del movimiento del agua en el suelo. Existe la ecuación de Kozeny – Carman que suministra una idea de la relación que existe entre la permea-

bilidad y la porosidad. En términos generales establece que:

$$k = C_1 \frac{p^3}{(1-p)^2} d^2 \quad (1-1)$$

donde:

- d = un tamaño del grano característico
- k = permeabilidad intrínseca
- p = porosidad
- C₁ = constante que depende de la forma y colocación de los granos.

c. Forma y tamaño de los granos: Allen Hazen, en sus experimentos con filtros de arena, indicó que la permeabilidad varía con el cuadrado del tamaño efectivo. Sin embargo, parece que esto se cumple hasta cierto tamaño de arena.

d. Colocación y orientación de los granos: La colocación afecta la porosidad y por lo tanto la permeabilidad como ya se dijo anteriormente; la orientación de los granos es un factor que determina la diferencia de valores en permeabilidad en dos direcciones diferentes.

La Tabla 3 ilustra la permeabilidad (k) de algunas rocas.

TABLA 3

PERMEABILIDAD (k) DE ALGUNAS ROCAS PRINCIPALES

Tipo de roca	k (m ³ /día)*
Arcilla	10 ⁻³
Arena	5 - 40
Grava	100 - 1000
Arenisca con fisuras	50 y más
Piedra caliza	25
Mezcla de grava y arena con (o/o) de grava	
40 - 50 o/o	k arena
60 o/o	2 k arena
70 o/o	4 k arena

*Estos valores dependen del grado de compactación

1.1.4 Clasificación de Rocas de Acuerdo a su Contenido de Agua

Los diferentes tipos de rocas se pueden agrupar de acuerdo con la capacidad de contener agua y de permitir el flujo de ella, en tres clases:

a. Rocas con Acuíferos: Son rocas permeables que poseen intersticios intercomunicados a través de los cuales el agua se mueve con relativa facilidad bajo condiciones naturales de campo.

b. Rocas con Acuicierres (Capas confinantes): Son rocas impermeables que aunque pueden contener grandes cantidades de agua, no permiten el paso de ella con facilidad.

c. Rocas Acuífugas (Capas confinantes): Son rocas impermeables que no contienen ni transmiten agua. Son aquellas rocas en las cuales no existen intersticios intercomunicados y en consecuencia no absorben ni permiten el paso del agua.

En las rocas porosas no consolidadas tales como arenas sueltas el agua se mueve a través de todo el volumen intergranular. En las rocas consolidadas el agua puede moverse sólo a través de fisuras, fracturas, fallas o aperturas de disolución hechas por el agua misma.

1.1.4.1 Tipos de acuíferos

Los acuíferos en cualquier tipo de roca, con porosidad intergranular o de fisuras, pueden clasificarse en tres grupos importantes:

I. ACUIFEROS LIBRES

Son aquellos en los cuales la superficie superior del agua subterránea está en contacto con la atmósfera a través de la zona de aeración (Figura 5). Se denomina **tabla de**

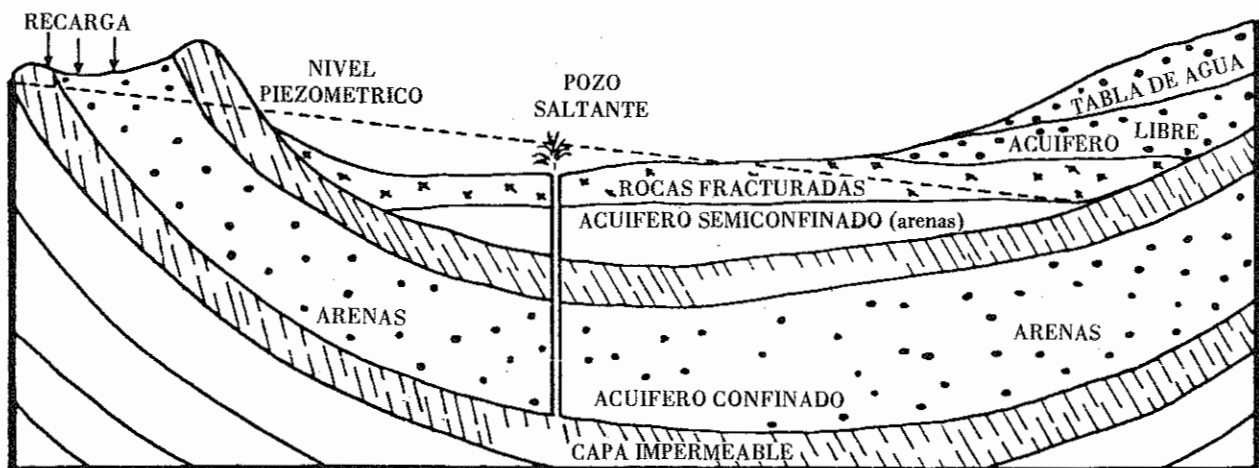


Figura 5 — Tipos de Acuíferos

agua la superficie superior de la zona de saturación.

La tabla de agua no es una superficie plana y generalmente tiende a seguir los contornos de la superficie del suelo. La profundidad de la tabla de agua varía de cero a cientos de metros dependiendo del clima y de la geología del área.

II. ACUIFEROS CONFINADOS

Son aquellos en los cuales el agua subterránea se halla confinada bajo presión en medio de rocas impermeables. En un acuífero confinado, el nivel del agua en un pozo se eleva por encima de la tabla de agua. Estos acuíferos se conocen también como acuíferos artesianos.

La superficie piezométrica de un acuífero confinado es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua en el acuífero (Figura 5). El nivel del agua en un pozo que penetra el acuífero confinado determina la elevación de la superficie piezométrica en ese punto, y si esta superficie yace por encima de la superficie del terreno se tendrá un pozo saltante. Un acuífero confinado se convierte en acuífero libre en el sitio donde la superficie piezométrica está por debajo de la base de la roca superior confinante.

III. ACUIFEROS SEMICONFINADOS

Son aquellos acuíferos completamente saturados de agua y limitados en su parte superior por una roca semipermeable (Figura 5). Estos acuíferos tienen una permeabilidad baja pero no despreciable y aunque la capacidad hidráulica de la capa suprayacente es apreciable, la componente horizontal del flujo es insignificante.

1.1.5 Influencia de la Topografía y la Geología del Terreno en los Acuíferos.

La presencia y distribución del agua subterránea en las rocas, están controladas por la geología (tipo, textura y estructura de la roca), la hidrología (zonas y magnitud de la recarga), y sus diferentes interrelaciones con la topografía.

Debido a que los diferentes factores se pueden combinar en un sinnúmero de formas, es muy difícil establecer normas o reglas generales que puedan aplicarse universalmente a cualquier estudio tendiente a identificar la presencia de agua subterránea. Solamente el conocimiento completo de la geología e hidrología del área puede identificar la situación, si los datos son bien interpretados y adecuadamente correlacionados con las formas topográficas del área.

Varios ejemplos prácticos ayudarán a clarificar las interrelaciones de una manera objetiva.

Las figuras 6 al 10 muestran ejemplos de acuíferos de diversa índole, en los cuales se pueden localizar pozos de buena calidad, fuentes, e inclusive pozos artesianos (saltantes).

Las figuras 11 al 14 ilustran como en un área pueden encontrarse pozos productivos, y a escasos metros de distancia, pozos de bajo rendimiento o baja calidad de agua.

Las figuras 6 y 7 presentan condiciones hidrogeológicas inversas, bajo la misma situación fisiográfica. En la figura 6 se tiene un acuífero libre localizado en la parte alta, de donde es posible extraer agua subterránea fácilmente. La figura 7 presenta un acuífero confinado por la roca suprayacente impermeable, y solamente se obtiene agua subterránea de fácil acceso en la parte baja junto al río. El control geológico está determinado por la disposición de las rocas permeables e impermeables aunque la topografía y la estructura geológica es la misma.

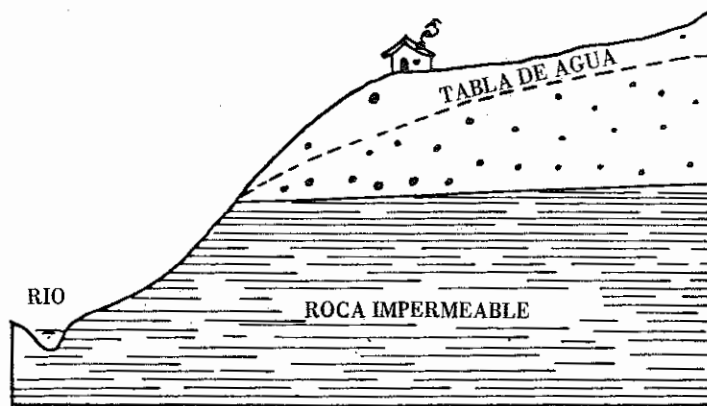


Figura 6 — Acuífero Libre

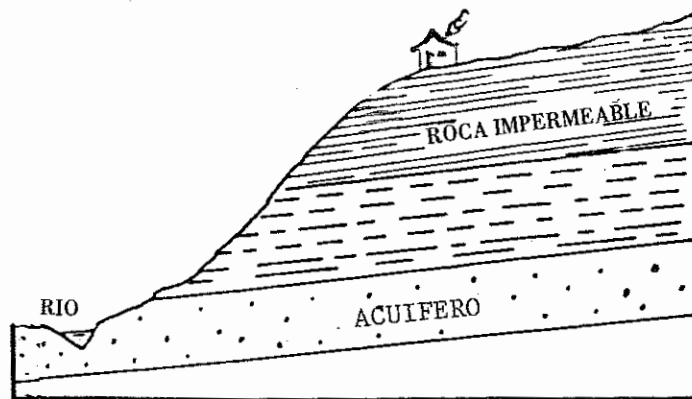


Figura 7 — Acuífero Confinado

Las figuras 8 y 9 muestran un claro control geológico del agua subterránea originada en ambos casos por movimientos tectónicos que causaron plegamiento (Figura 8) y desplazamiento a lo largo de una falla (Figura 9). En el primer caso el acuífero se halla en un sinclinal y aflora a la izquierda dando origen a una zona de manantiales y pozos saltantes. En el segundo, la falla ha desplazado el acuífero superficial que desaparece intempestivamente a lo largo de la línea de falla.

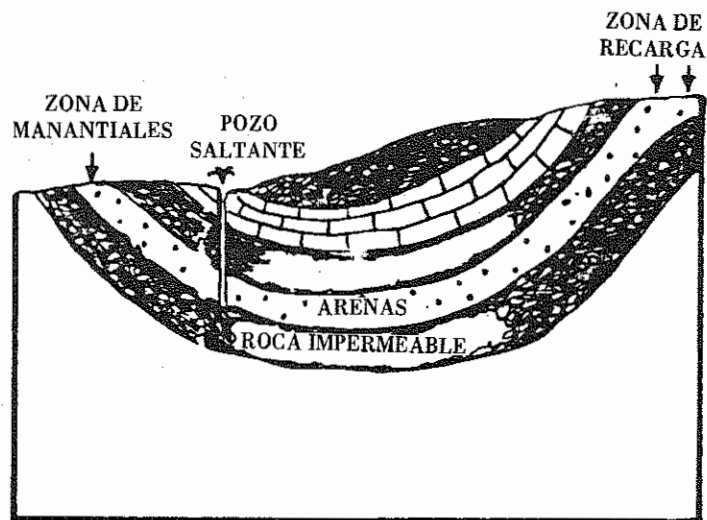


Figura 8 — Control Geológico del Agua Subterránea por Plegamiento

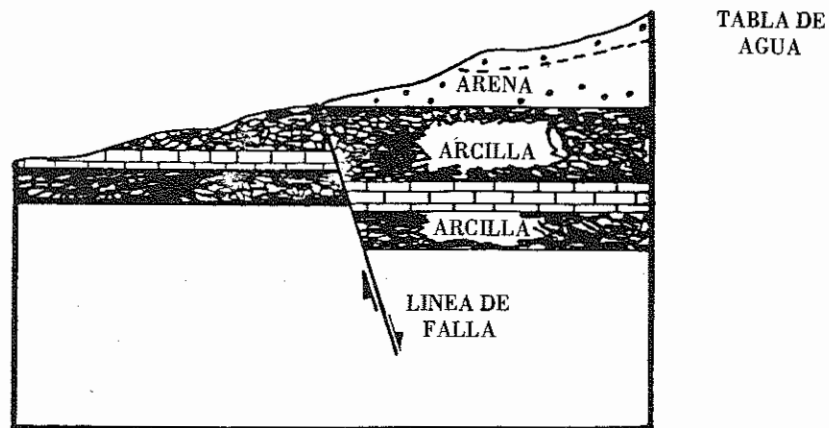


Figura 9 — Control Geológico del Agua Subterránea por Desplazamiento de una Falla

La presencia del agua subterránea en regiones "cársticas", es un caso especial, debido a que la alta solubilidad de las calizas en el agua, da como resultado características diferentes a las que se desarrollan en cualquier otra clase de roca. En la mayor parte de terrenos "cársticos", los ríos y demás corrientes superficiales son escasos, debido a que el flujo se concentra en corrientes subterráneas que aparecen posteriormente en forma de manantiales de gran volumen.

El sistema de cavernas desarrollado en la figura 10 es tal que la caverna superior no conduce agua a la superficie, mientras que la inferior capta todo el flujo subterráneo, almacena parte de él y lo conduce a la superficie en forma de un gran manantial.

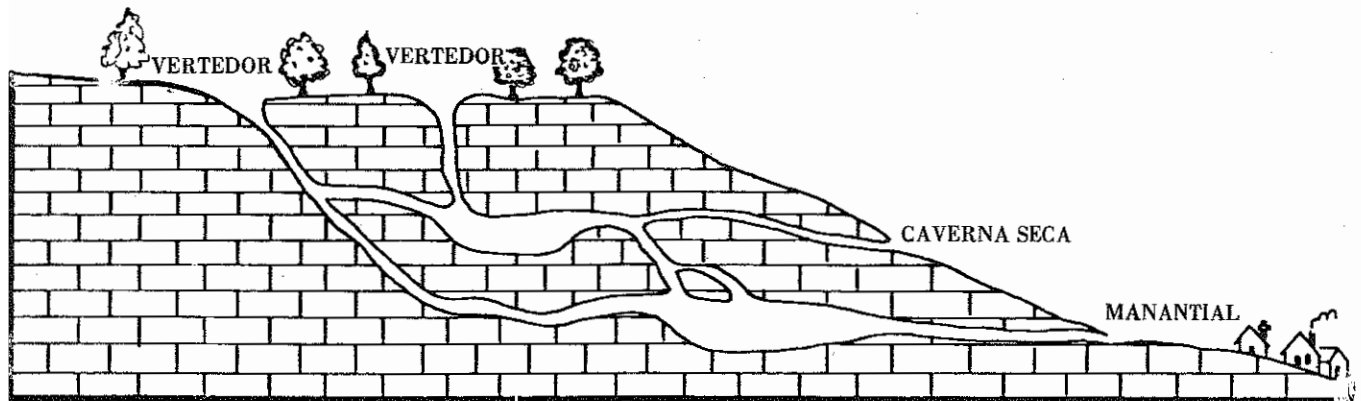


Figura 10 -- Sistema de Cavernas

La inclinación de los estratos de arcilla y de la superficie topográfica controlan la presencia del agua subterránea, como muestra la figura 11a. El pozo de la derecha puede ser productivo durante todo el año, mientras que el de la izquierda, a pesar de ser más profundo, es improductivo.

El caso contrario se presenta en la figura 11b. Una misma superficie topográfica, con diferentes características en la estructura geológica, da como resultado condiciones hidrológicas distintas. Como no existe contribución del agua subterránea al cauce, el río será de régimen esporádico; cuando en época de lluvias capta la escorrentia superficial alta. El control geológico es evidente.

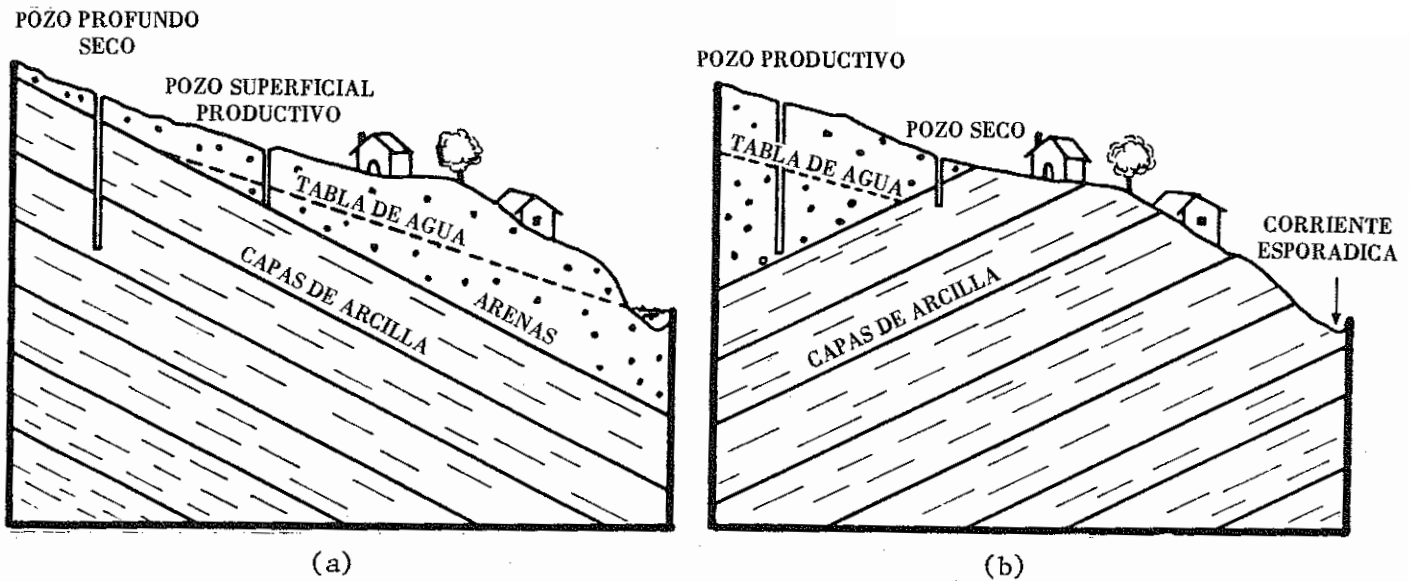


Figura 11 — Ejemplos de Pozos de Agua en función de la Inclinción de los Estratos Topográficos

La figura 12 muestra como una misma estructura geológica da lugar a condiciones hidrogeológicas diferentes, resultantes del control fisiográfico. Las arcillas y demás capas impermeables suprayacentes (Figura 12a) impiden la recarga directa de las arenas. Sin embargo en la figura 12b las condiciones topográficas son tales que la escorrentía superficial es encauzada hacia el valle donde afloran las arenas que reciben recarga del agua precipitada en toda el área de la cuenca.

El pozo que se señala como seco en el centro de la cuenca es productivo en la época de invierno, cuando la recarga intensa hace subir el nivel de la tabla de agua.

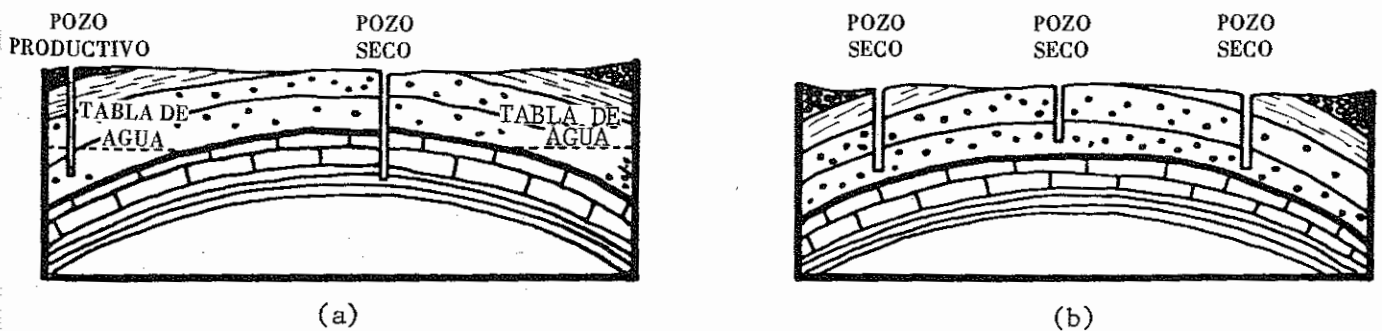


Figura 12 — Condiciones Geológicas en la Naturaleza (I)

La Figura 13 ilustra otro caso interesante de condiciones geológicas favorables. El pozo profundo, mostrado en la figura, a pesar de estar más cerca al mar que el pozo superficial salino será, sin duda, un buen pozo productor de agua dulce en forma continua. Tales condiciones geológicas favorables se presentan con frecuencia en la

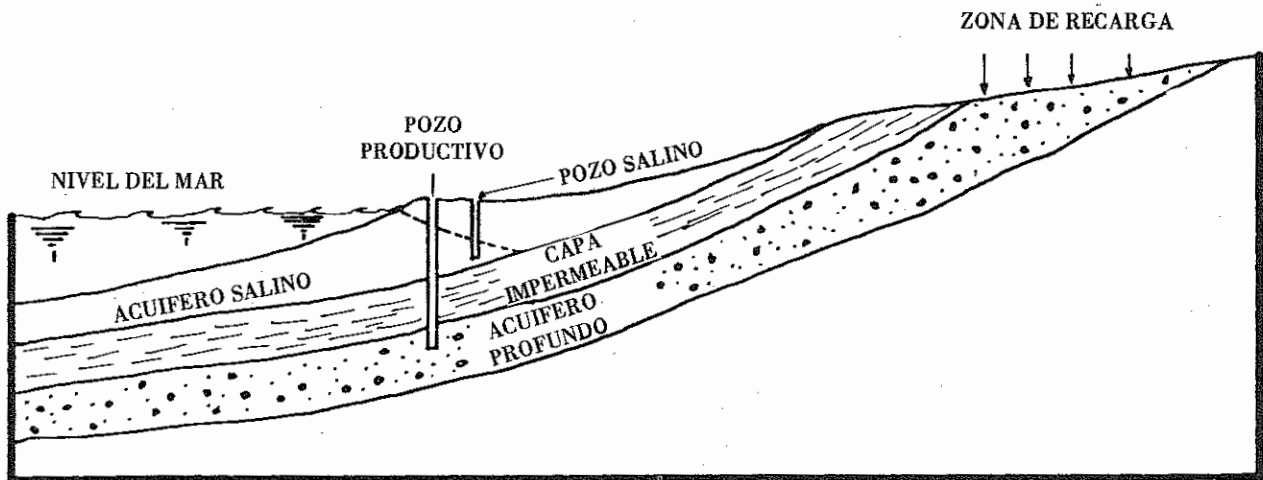


Figura 13 – Condiciones Geológicas en la Naturaleza (II)

En rocas impermeables, como las ígneas de la figura 14a o las areniscas consolidadas de la figura 14b, se puede hallar agua subterránea, solamente si se encuentran falladas o fracturadas en forma intensa. Las aguas termales de muchas regiones, suelen estar asociadas con fallas profundas como la indicada en la figura 14b.

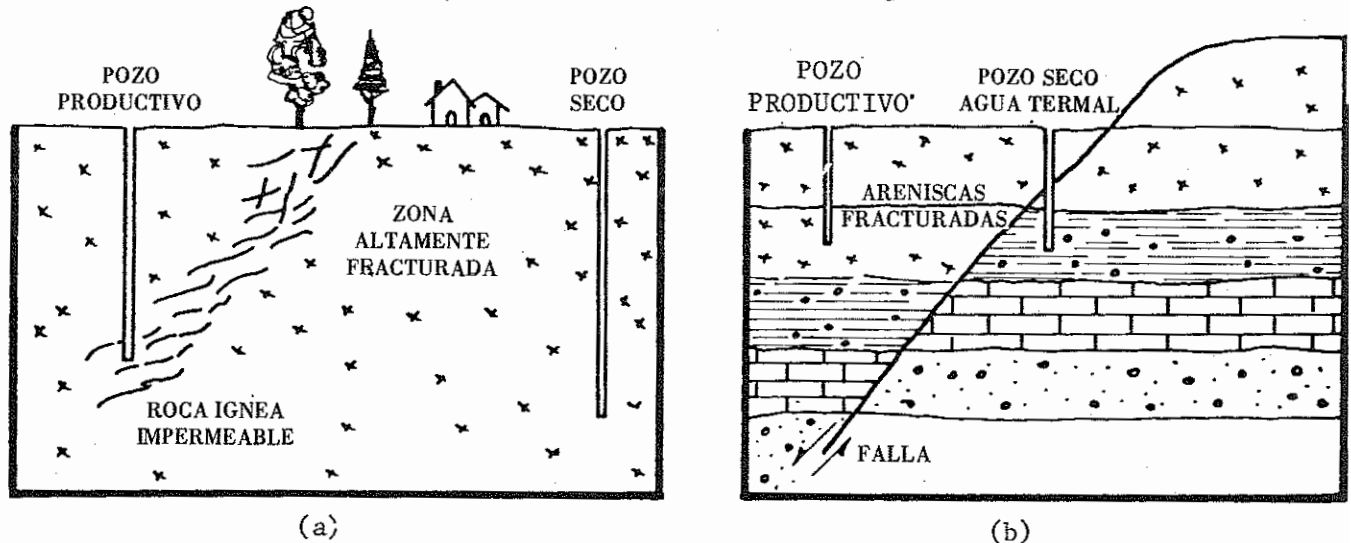


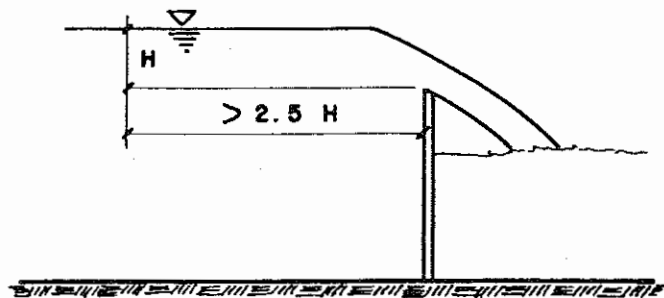
Figura 14 – Condiciones Geológicas en la Naturaleza (III)

Las anteriores ilustraciones, indican que es necesario tener en cuenta los aspectos geológicos, hidrológicos y topográficos, si se desea identificar claramente el modelo hidrogeológico del área en estudio, y que sólo un razonamiento completo y correcto, permitirá establecer las condiciones de almacenamiento del agua subterránea y su posible utilización.

1.1.6 Aforos de Recursos Superficiales

1.1.6.1 Vertedero

El vertedero, mostrado en la Figura 15, es un elemento colocado en el canal que obliga al agua a estancarse y verter por encima de él. Midiendo la altura de la superficie del agua se puede conocer el caudal; los vertederos pueden ser de pared gruesa y de pared delgada.



H se mide a una distancia superior a 2,5 H

Figura 15 – Vertedero

La ecuación que rige a estos medidores es:

$$Q = C H^n \quad (1 - 2)$$

donde:

- Q = caudal
- C = coeficiente de proporcionalidad
- H = altura de la superficie del agua
- n = exponente propio de cada forma de vertedero

La Figura 16 ilustra algunos tipos de vertederos

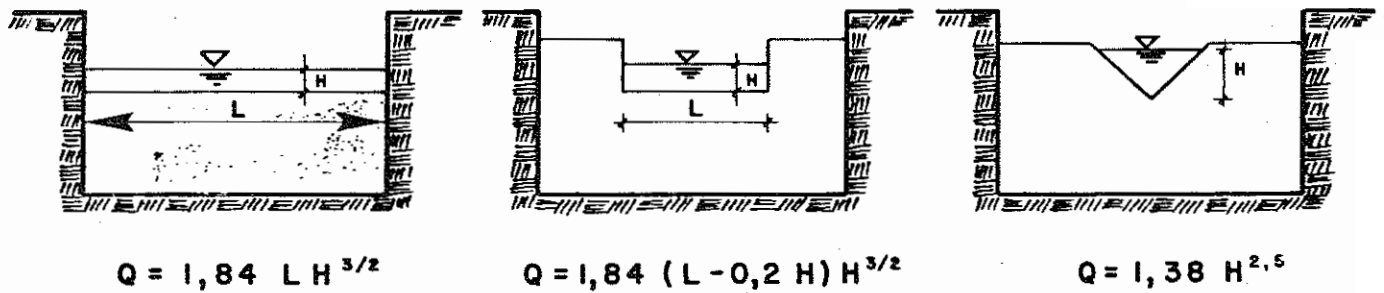


Figura 16 – Tipos de Vertederos

1.1.6.2 Molinete

El aforo con molinete se basa en la ecuación de continuidad:

$$Q = V \cdot A \quad (1 - 3)$$

donde:

- Q = caudal
- V = velocidad del caudal
- A = área de la sección total transversal del caudal

Para medir la velocidad se usa un correntómetro o molinete, que es un aparato en forma de hélice y que permite la determinación de aquella, mediante la ecuación:

$$V = a + b N \quad (1 - 4)$$

donde:

- a y b = constantes de cada aparato dadas por el fabricante
- N = el número de revoluciones por segundo a las que gira la hélice del molinete, movida por el agua

Para medir el caudal Q, se procede de la siguiente manera: el área total de la sección transversal del caudal se divide en pequeñas secciones, como se indica en la Figura 17, determinando el área y la velocidad media de cada una separadamente, teniendo como contorno, la superficie del agua, el fondo del cauce y dos verticales imaginarias que la separan de las otras. Los caudales parciales, que fluyen por cada

una de las secciones, se determinan en base a la ecuación:

$$q = v \cdot a \quad (1 - 5)$$

en la cual:

- q = caudal en la sección transversal a
- v = velocidad del caudal en la sección a (valor promedio de a mediciones a 0,2 h y 0,8 h)
- a = área de la pequeña sección transversal ($a < 0,1 A$)

El caudal total Q es la suma de los caudales parciales:

$$Q = \Sigma q \quad (1 - 6)$$

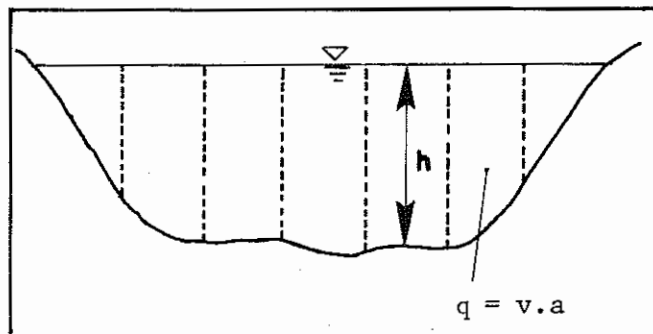


Figura 17 – Medida de Caudal de Agua con Molinete

1.1.6.3 Orificio

Consiste en una placa de menor diámetro que el de la tubería, colocada en esta (Ver Figura 18). Su ecuación es de la forma:

$$Q = K \cdot A \sqrt{2 g h} \quad (1 - 7)$$

donde:

- Q = caudal de descarga (m^3 / seg)
- K = factor de rugosidad
- g = aceleración de la gravedad ($9.81 m / seg^2$)
- h = altura piezométrica (m)
- A = área del orificio (m^2)

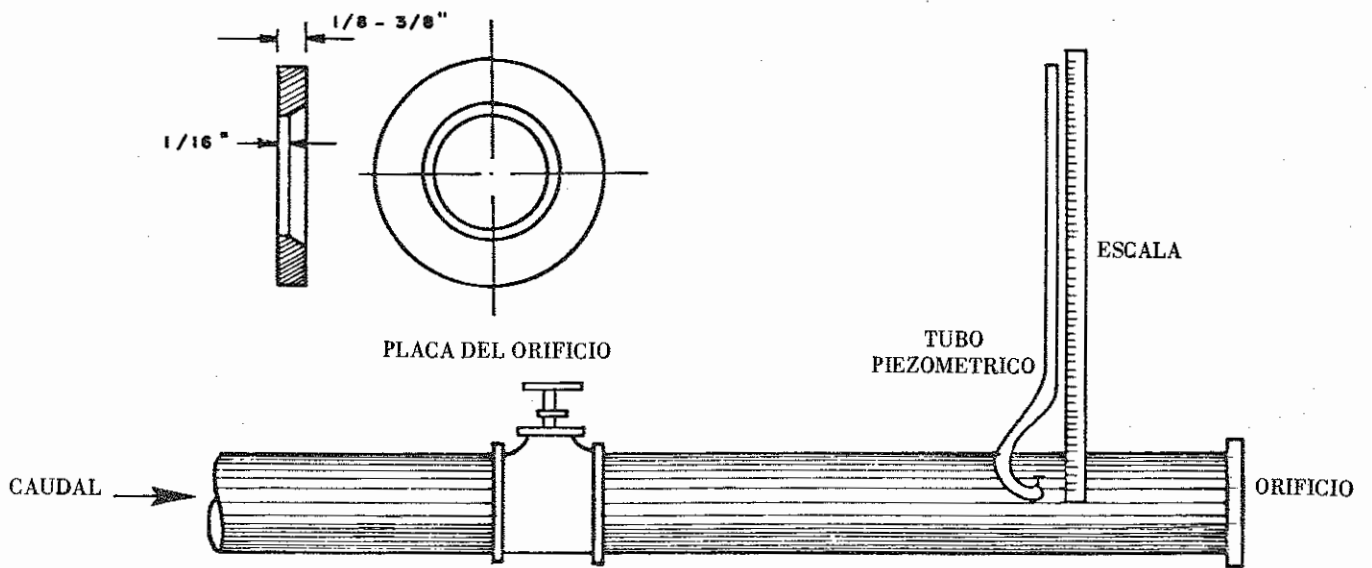


Figura 18 – Orificio Hidráulico para Medición del Caudal Q

El valor de K es obtenido gráficamente, conociéndose la relación de diámetros entre el orificio y la tubería. (Figura 19).

$$Q = KA \sqrt{2gh}$$

$$Q = 8,02 KA \sqrt{h}$$

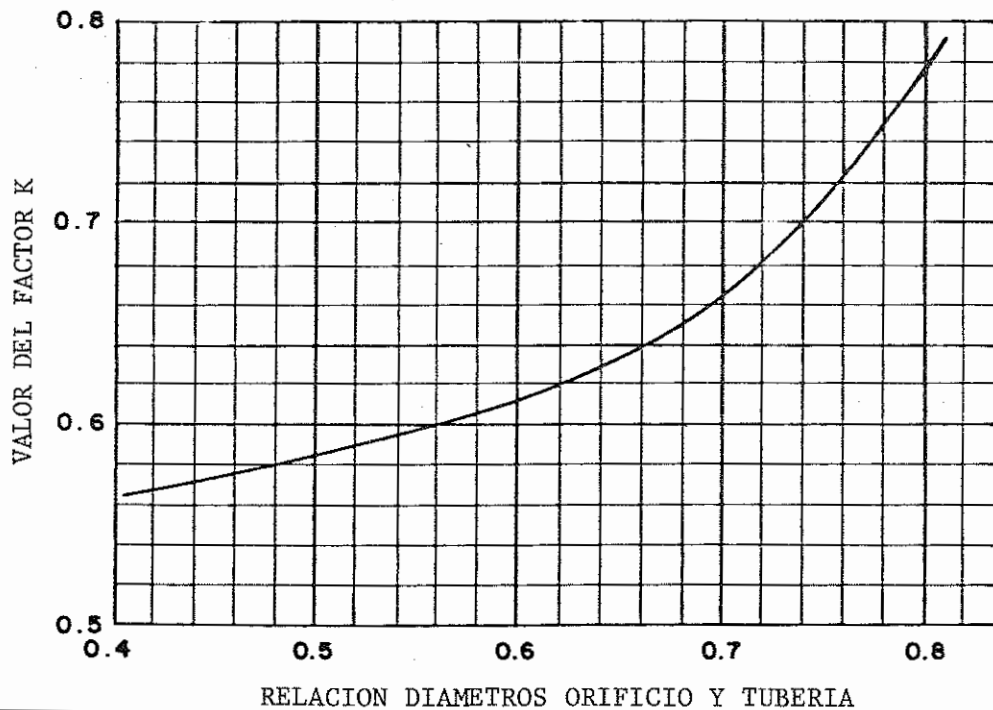


Figura 19 – Factor de Rugosidad (K)

1.1.7 Aforo de Recursos Subterráneos

El método más sencillo es medir la cantidad de fluido que cae en un determinado tiempo en un recipiente dispuesto para tal fin.

$$Q = \frac{\text{Volúmen}}{\text{Tiempo}} \quad (1 - 8)$$

Una pequeña variante es pesar una determinada cantidad de líquido que llena un recipiente en un tiempo establecido.

$$Q = \frac{\text{Peso}}{\gamma \times \text{Tiempo}} \quad (1 - 9)$$

donde:

$$\gamma = \text{peso específico del líquido}$$

Método de Coordenadas

El movimiento de la vena líquida (Figura 20) es uniforme en el sentido horizontal y acelerado en la dirección vertical. Combinando los dos movimientos, resulta:

$$V^2 = \frac{g}{2} \frac{x^2}{y} \quad (1 - 10)$$

donde:

$$\begin{aligned} g &= \text{aceleración de la gravedad (9.81 m/seg}^2\text{)} \\ V &= \text{velocidad del chorro a la salida (m/seg)} \\ A &= \text{área de la sección de tubería en la descarga (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Tomando el valor de V en (1 - 10):

$$V = 2,21 \frac{x}{\sqrt{y}} \quad (1 - 11)$$

Conociéndose el valor de A, se puede calcular Q por medio de la ecuación de continuidad (1 - 3):

$$Q = V.A = 2,21 A \frac{x}{\sqrt{y}} \quad (1 - 12)$$

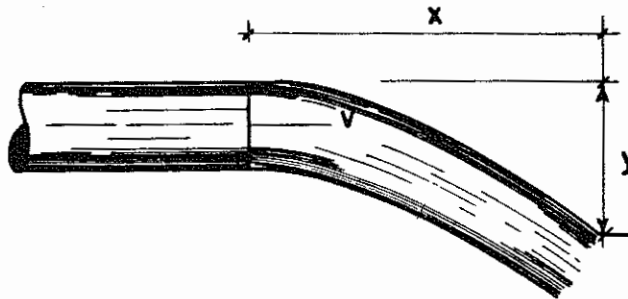


Figura 20 -- Medida del Caudal Q

1.2 BREVE RESEÑA DE CONSTRUCCION DE POZOS

1.2.1 Tipos de Pozos

Un pozo abastecedor de agua es una perforación, hoyo o tubería hincada en la tierra para aprovechar una fuente subterránea de agua.

Los pozos se clasifican en cinco tipos, de conformidad con sus métodos de construcción. Hay pozos excavados, barrenados, hincados, perforados por chorro de agua y perforados.

a. Pozo excavado: cuando la excavación se hace mediante el uso de picos, palas, azadones o equipo de excavar tales como cucharones de arena o de almejas.

b. Pozo barrenado: cuando la excavación se hace mediante el uso de barrenas manuales o mecánicas.

c. Pozo incado: cuando se construye hincando o impulsando un colador puntiagudo, conocido como punta de pozo, en el terreno. A la punta del pozo se le agregan entubados o tramos de tubería a medida que se va hincando en el terreno.

d. Pozo perforado por chorro de agua: cuando se hace la excavación mediante el uso de un chorro de alta presión de agua. Sin embargo, en algunas regiones del Artico, en vez de un chorro de agua se usa vapor.

e. Pozo perforado: cuando se hace la excavación ya sea por medio de barrenas de percusión o giratoria. El material excavado se extrae mediante un achicador, bomba de extraer arena, cucharón de succión, herramienta de barrena hueca o presión hidráulica.

1.2.1.1 Pozos excavados

Estos pozos tienen que ser necesariamente poco profundos y se excavan en donde el nivel freático está bastante cerca de la superficie. El diámetro puede alcanzar de 1 a 9 m y profundidades de 3 a 12 m. son comunes.

Su principal ventaja es que se puede construir con herramientas manuales. Además, su gran diámetro proporciona un depósito de tamaño razonable dentro del pozo mismo.

Sin embargo, los pozos excavados están expuestos a la contaminación a causa de la infiltración superficial, del material que sopla el viento y de basura que cae dentro de ellos. Su rendimiento es limitado debido a que usualmente no penetran la arena acuífera a una profundidad apreciable.

Los pozos excavados comúnmente se construyen en forma circular. El material que usualmente se utiliza es un pico y una pala. Se coloca un encintado o forro en la excavación antes que surja el peligro de que se desplome a causa de la profundidad del hoyo abierto.

La figura 21, 22 y 23 presentan detalles característicos de pozos excavados.

1.2.1.2 Pozos barrenados

La perforación se comienza forzando la barrena dentro de la tierra mientras se gira la herramienta. La barrena abrirá su paso en el terreno a una velocidad promedio determinada por la dureza del suelo.

Una vez que el espacio entre las hojas esté lleno de material, se saca la barrena del hoyo y se vacía. Esta operación se repite hasta que se alcance la profundidad deseada.

Al construir pozos barrenados, pueden tropezarse con pequeñas rocas o peñones que impiden la penetración. Cuando esto ocurre, se quita la broca cortante y se sustituye por una barrena espiral, se baja esta herramienta dentro del hoyo y se le da vuelta en dirección de las agujas del reloj. La porción espiral se enroscará en la roca de manera que ésta se pueda alzar a la superficie.

La Figura 24 ilustra algunos tipos de barrenas.

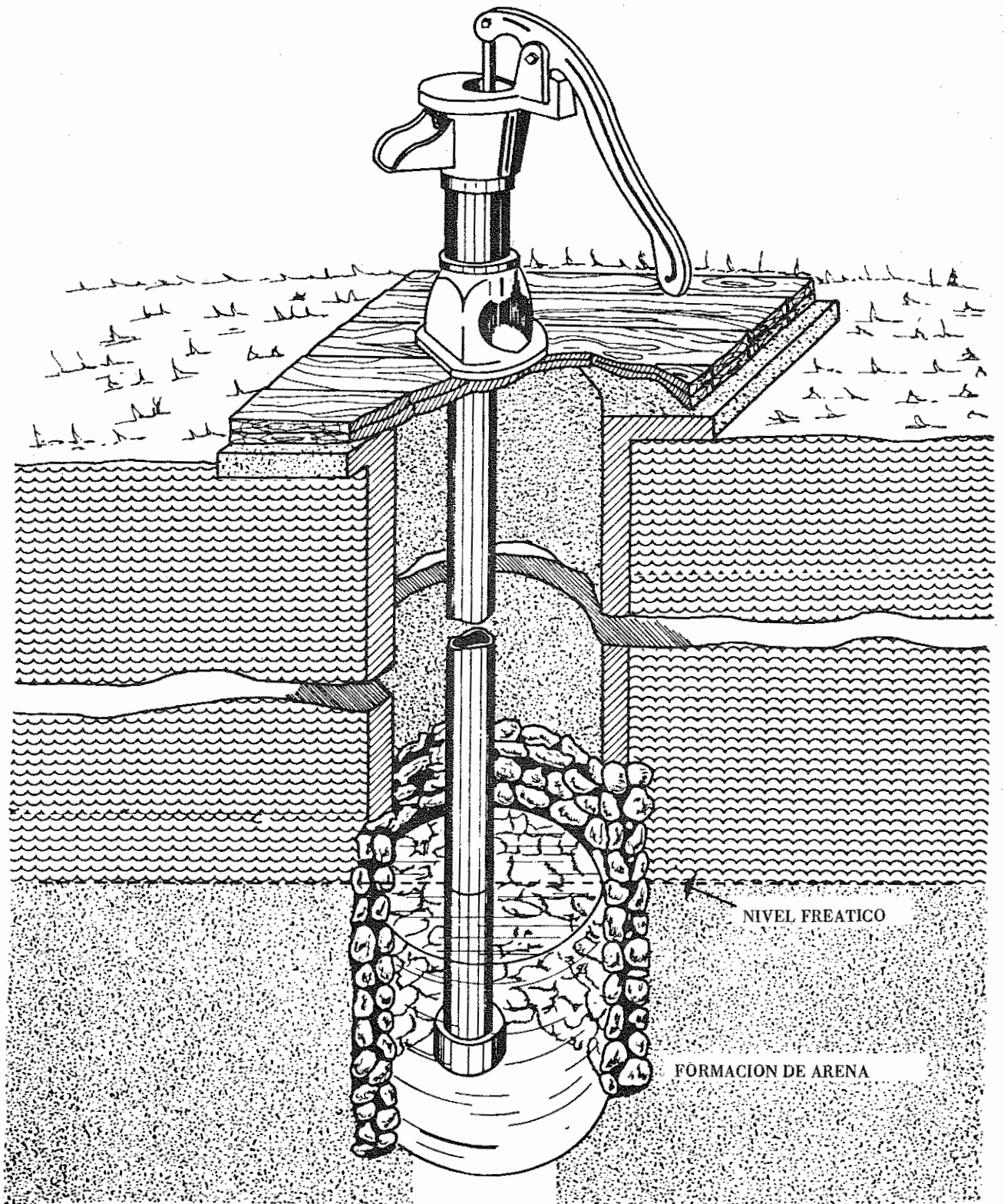
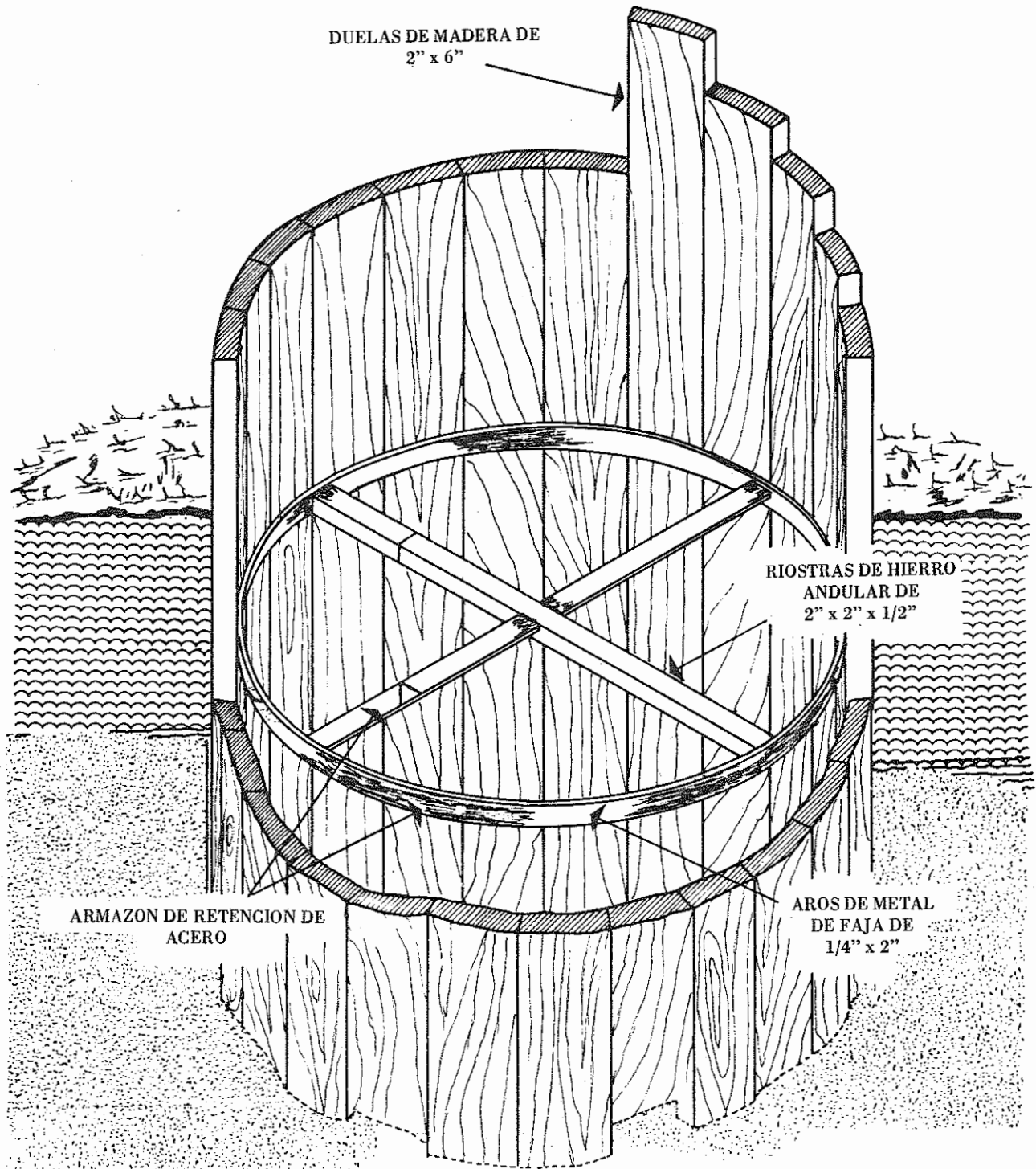


Figura 21 — Pozo Excavado Típico, con Bomba de Succión



NOTA: ARMAZON DE RETENCION COLOCADO A 5 PIES DE DISTANCIA PARA FORMACIONES TERRESTRES CORRIENTES.

Figura 22 — Pozo Excavado, Revestido en Madera

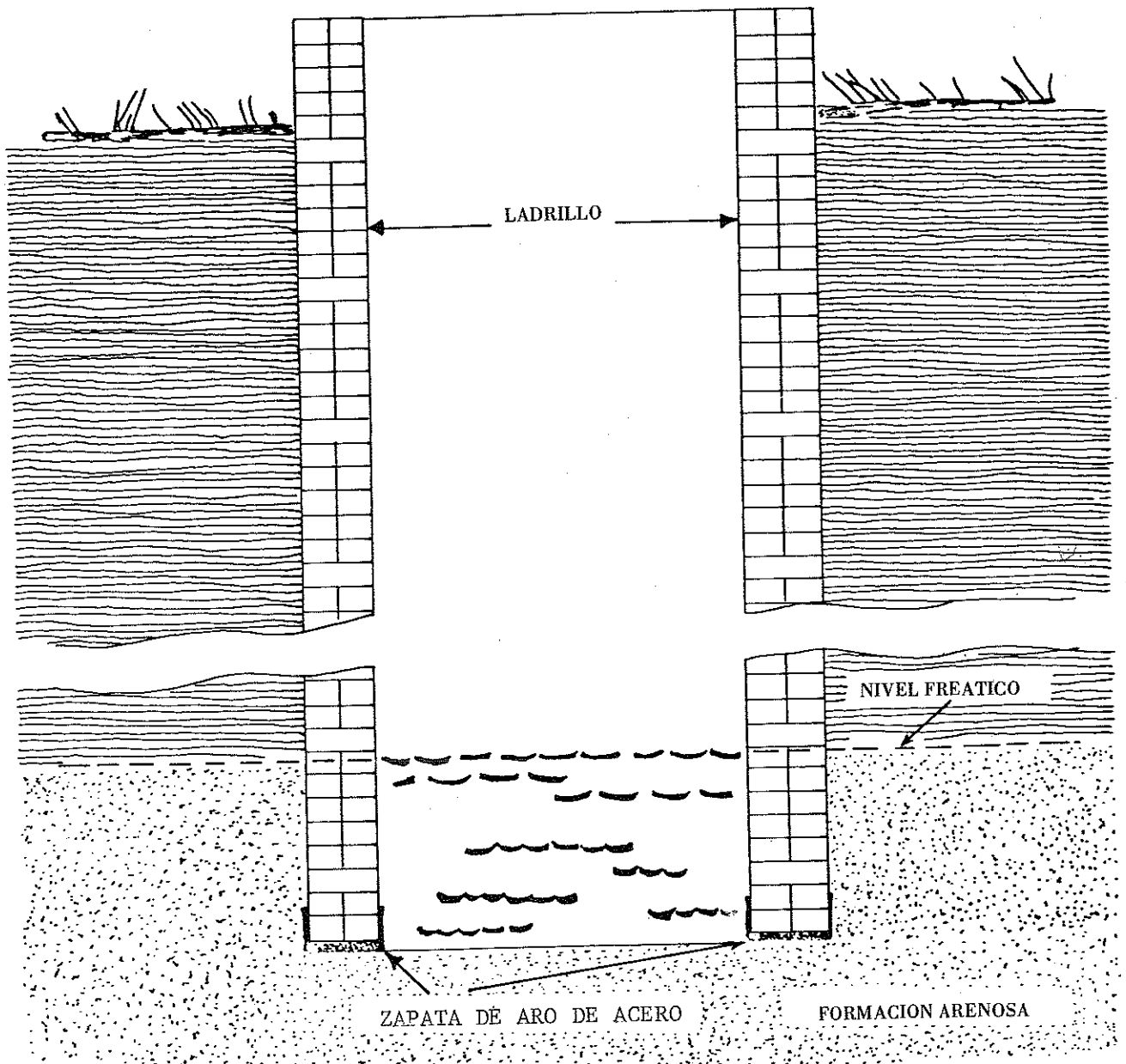
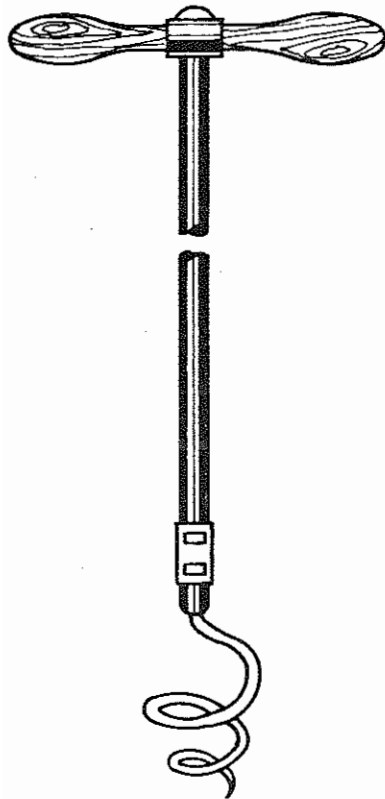
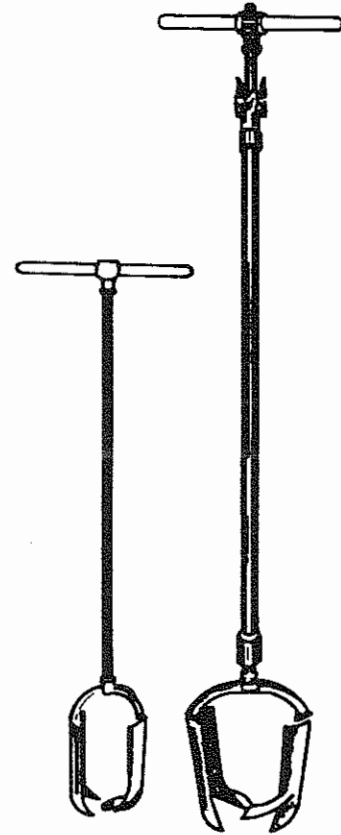


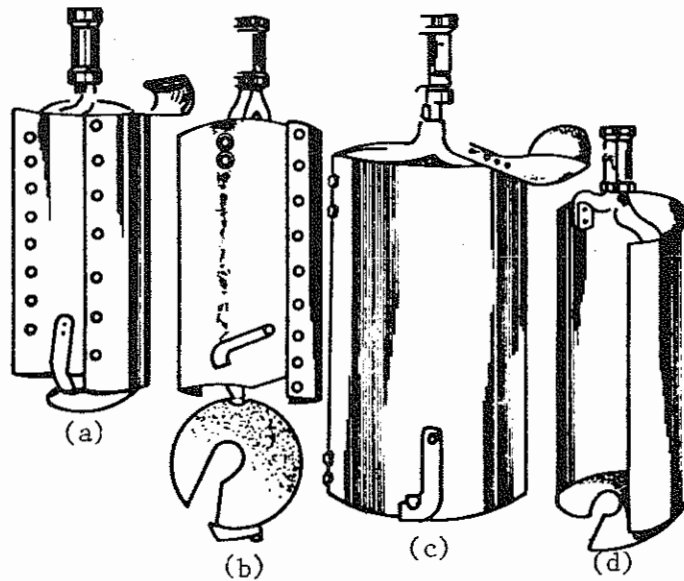
Figura 23 — Sección Transversal de un Pozo Excavado, con Encintado de Ladrillos



BARRENA ESPIRAL DE
CUERO DE CARNERO



BARRENAS DE MANO



- (a) Barrena con escariador no ajustable
- (b) Barrena con el fondo abierto para vaciamiento
- (c) Barrena con escariador ajustable
- (d) Barrena de media caña

Figura 24 — Barrenas para Perforación de Pozos

1.2.1.3 Pozos hincados

Los pozos hincados, o de percusión de pequeño diámetro, se construyen hincando en el terreno una punta de pozo la cual está acoplada al extremo inferior de secciones de tubería conectadas firmemente. (Figura 25).

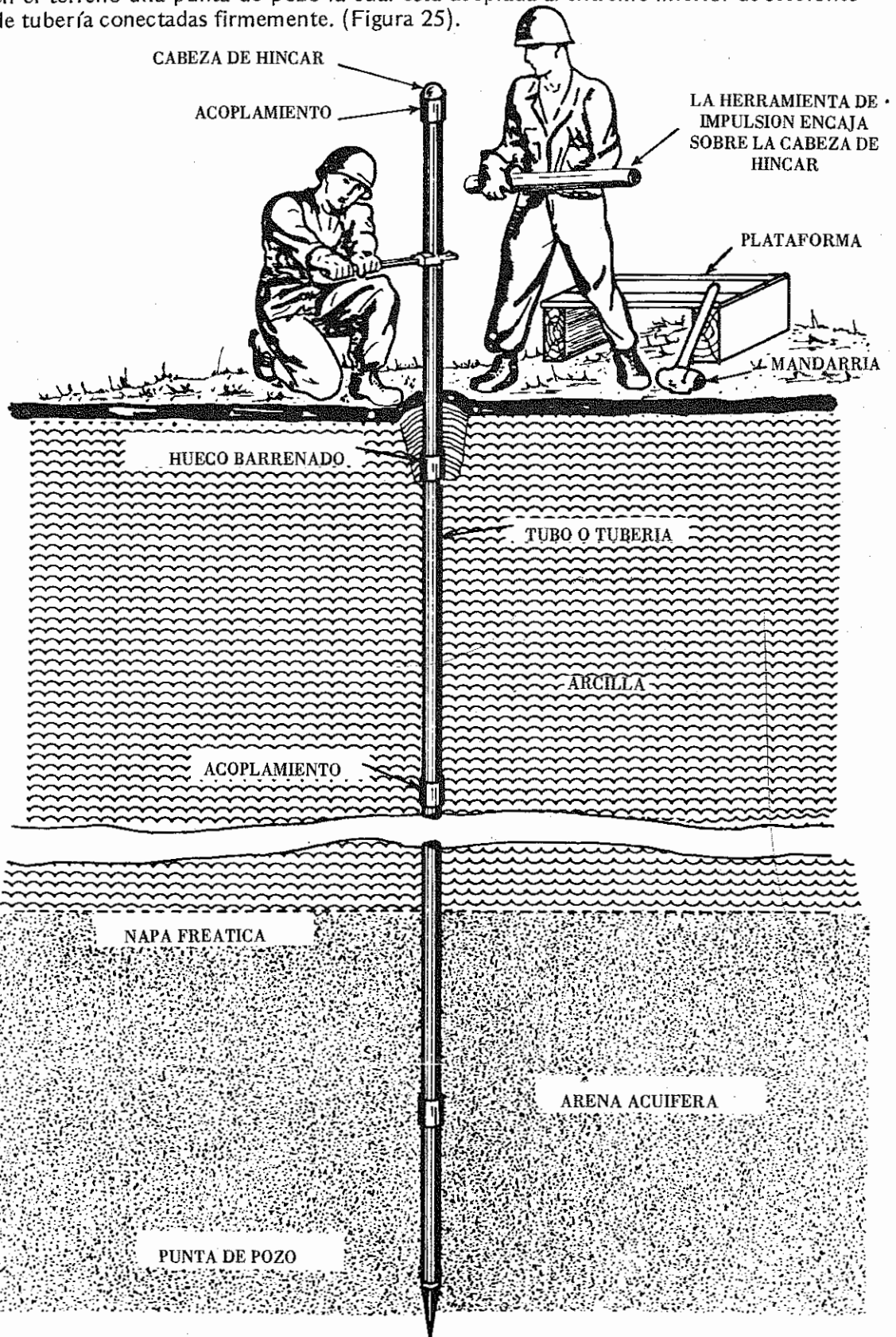


Figura 25 — Hincado de una Punta de Pozo con una Herramienta de Impulsión

La punta de pozo , mostrada en la Figura 26, consiste en un tubo perforado con una punta de acero en su extremo inferior para abrirse paso a través de guijarros o capas finas de material duro. La punta de pozo debe introducirse bastante profunda para que penetre la formación acuífera debajo del nivel freático. Para pozos poco profundos no debe excederse a los 25 pies.

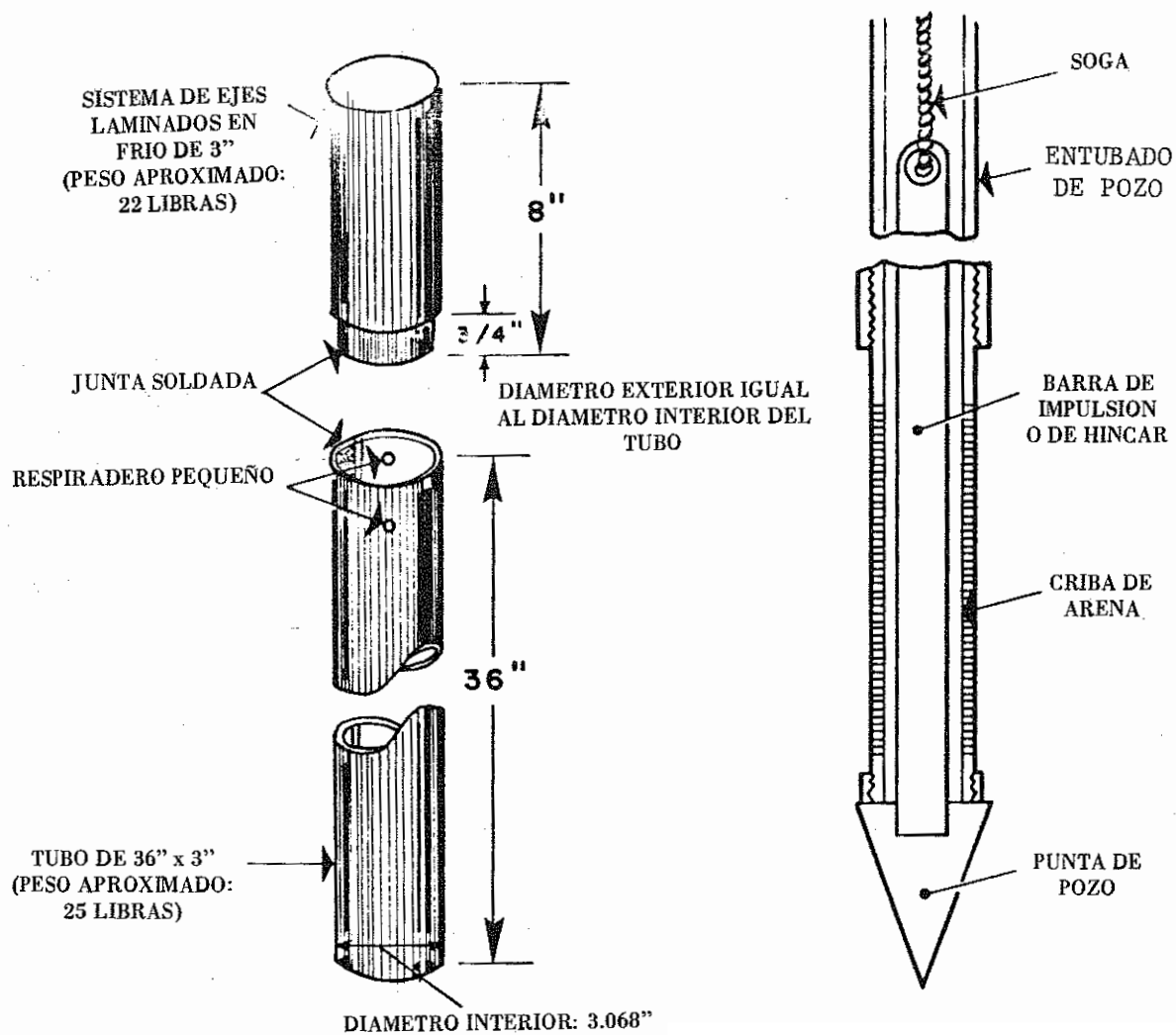


Figura 26 — Herramientas de Impulsión o de Hincar

La Figura 27 muestra como se hace los arreglos del pilón de hincar.

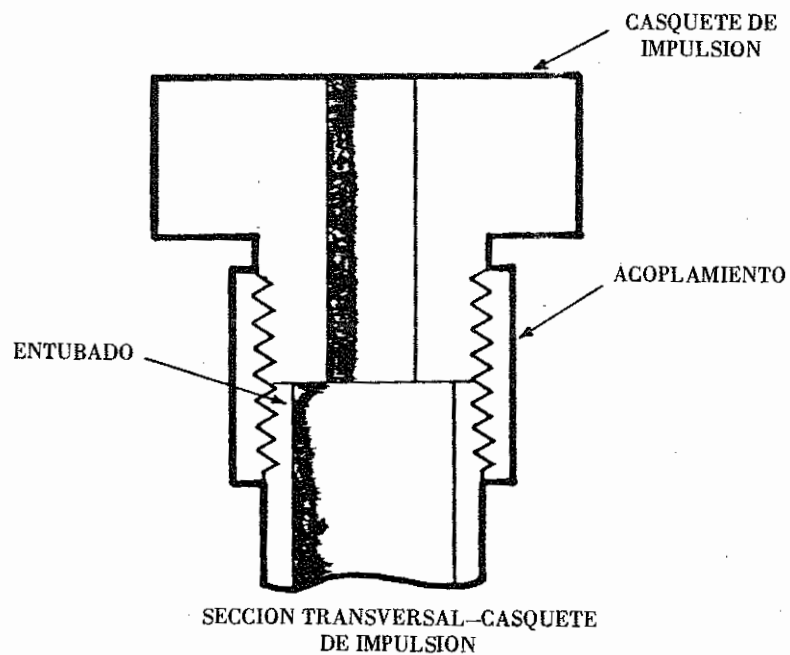
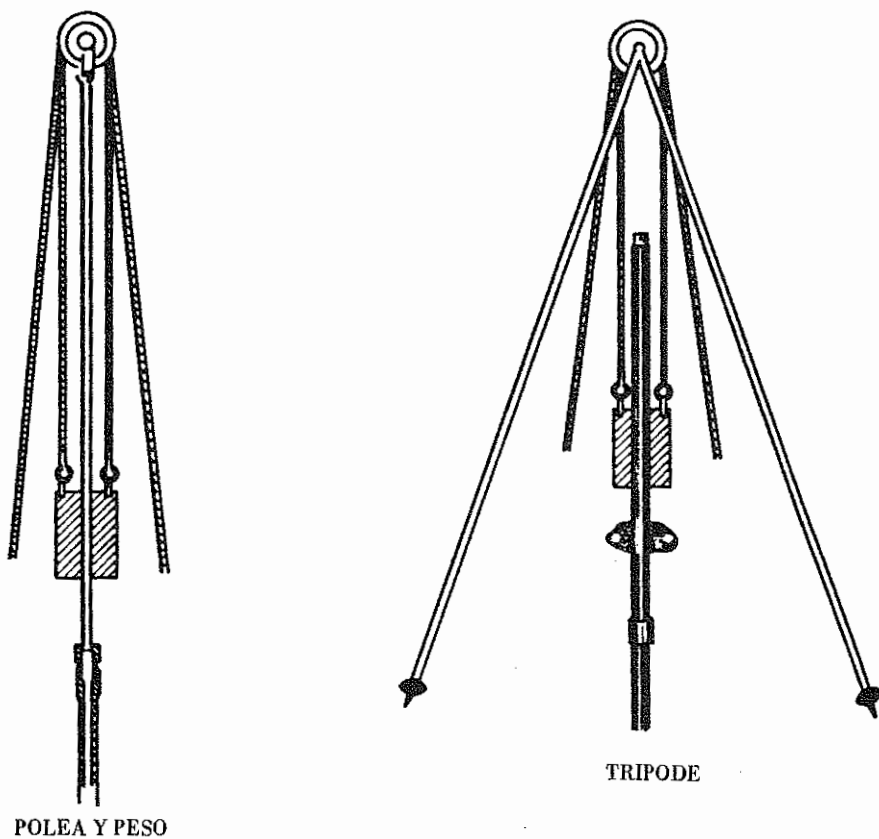


Figura 27 — Arreglos del Pilón de Hincar

Generalmente se usan secciones de tubo de 5 a 6 pies de longitud para formar la cañería que también sirve como entubado para el pozo terminado. Los pozos hincados usualmente tienen de 1 1/4 a 2 pulgadas de diámetro, pero también se construyen pozos más grandes de hasta 4 pulgadas de diámetro.

Los tubos de pequeño diámetro que se requieren para estos pozos son ligeros, fáciles de llevar y de fácil colocación por medios manuales. El entubado más grande que se usa en estos pozos, aun cuando es más pesado y más difícil de hincar, tiene la ventaja de que permite instalar bombas para pozos profundos en el entubado a una profundidad de 25 pies o más bajo el suelo.

El uso principal de los pozos hincados para el suministro de agua es la construcción de pozos de emergencia en donde el nivel freático esté cerca de la superficie terrestre. Si se ha de bombear el pozo con una bomba del tipo de recoger agua en cántaros o bomba centrífuga (usada en pozos poco profundos), el nivel del agua que se bombea no ha de exceder 25 pies.

Los pozos hincados generalmente se comienzan en un hoyo perforado con una barrena de mano. El diámetro del hoyo debe ser un poquito más grande que el de una punta de pozo y el hoyo no debe ser tan profundo sino hasta donde pueda trabajar una barrena.

La Figura 28 ilustra un pozo hincado ya equipado para la producción de agua a través de una bomba de succión.

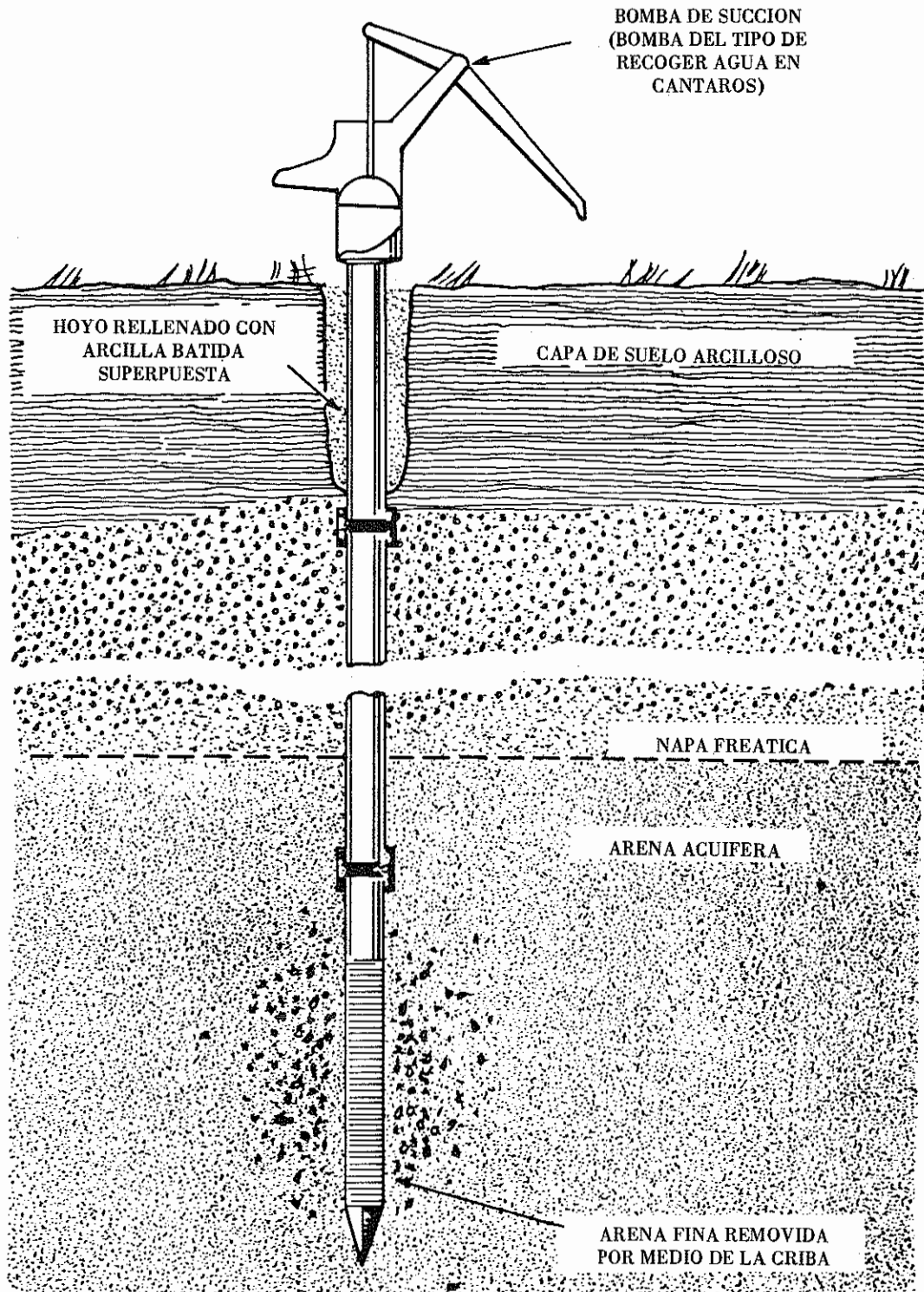


Figura 28 — Pozo Hincado y Equipado con Bomba de Succión

1.2.1.4 Pozos perforados por chorros de agua

1.2.1.4.1 Descripción

El método de construcción de pozos por chorro consiste en perforar un hoyo en la tierra por la fuerza de una corriente de agua de alta presión. Este chorro afloja el material que golpea y arrastra las partículas más finas hacia arriba y fuera del hoyo.

Este método de construir pozos es particularmente fructuoso en tierras arenosas cuando el nivel freático queda cerca de la superficie terrestre. Es un método sencillo y confiable que se puede realizar enteramente con herramientas manuales y el éxito no depende del equipo de perforación voluminoso el cual es difícil de acarrear.

Generalmente, se pueden usar dos técnicas de construcción: hundimiento de un entubado por corriente de agua o hundimiento de una punta de pozo autosurtidora. Además la perforación puede usarse para analizar el carácter general de una formación mediante el examen de las cortaduras o re siduos traídos a la superficie por la corriente de retorno.

1.2.1.4.2 Equipo de perforación por chorro

El equipo esencial de perforación por chorro incluye un malacate, una bomba de chorro con manguera, una articulación giratoria hidráulica, un suministro adecuado de fluido de perforación, un peso de hincar y un juego de herramientas para tubería pesada.

a. Malacate: se requiere un malacate para manejar la tubería de perforación y el entubado. Se puede usar equipo operado a mano tal como un trípode con una pasteca. De estar disponible, es conveniente usar un equipo de perforación del tipo de percusión con un malacate mecánico.

b. Bomba: es apropiado el uso de una bomba, con una conexión adecuada de manguera, que sea capaz de sacar de 50 a 100 galones por minuto a una presión de 50 libras por pulgada cuadrada. La cantidad de agua que se requiere para excavar un pozo por chorro varía con el tipo de sedimento que se esté penetrando.

Las tierras arenosas requieren mucho más agua, pero no es necesaria una alta presión. Una presión de boquilla de cuarenta libras por pulgada cuadrada en la broca es adecuada en la mayoría de los casos.

La arcilla y arcilla compacta requieren menos agua pero no se aflojan fácilmente a menos que se lance una pequeña corriente penetrante a alta presión. Con boquillas pequeñas colocadas en la broca de la barrena se puede lograr una presión hasta de 200 libras.

c. Articulación giratoria: la articulación giratoria hidráulica debe poder sostener el peso de la barra de perforación y de resistir la presión máxima que descarga la bomba.

d. Fluido de perforación: comunmente se usa agua corriente en la perforación de pozos de chorro, sin embargo se puede preparar un fluido de chorro de mayor viscosidad y peso, mezclando arcilla o una bentonita comercial con agua. Este fluido espeso tiende a sellar la pared del hoyo y evitar la pérdida de agua dentro de la formación que se esté penetrando. Además de esto, el fluido de chorro es conducido del hoyo a un fosa de sedimentación en donde las cortaduras (material sacado del hoyo) se asientan en el fondo. La bomba de perforación por chorro puede recoger el fluido otra vez y hacer que circule nuevamente.

Las figuras 29 y 30 ilustran, respectivamente, el equipo necesario para la perforación por chorro y un pozo típico excavado por chorro.

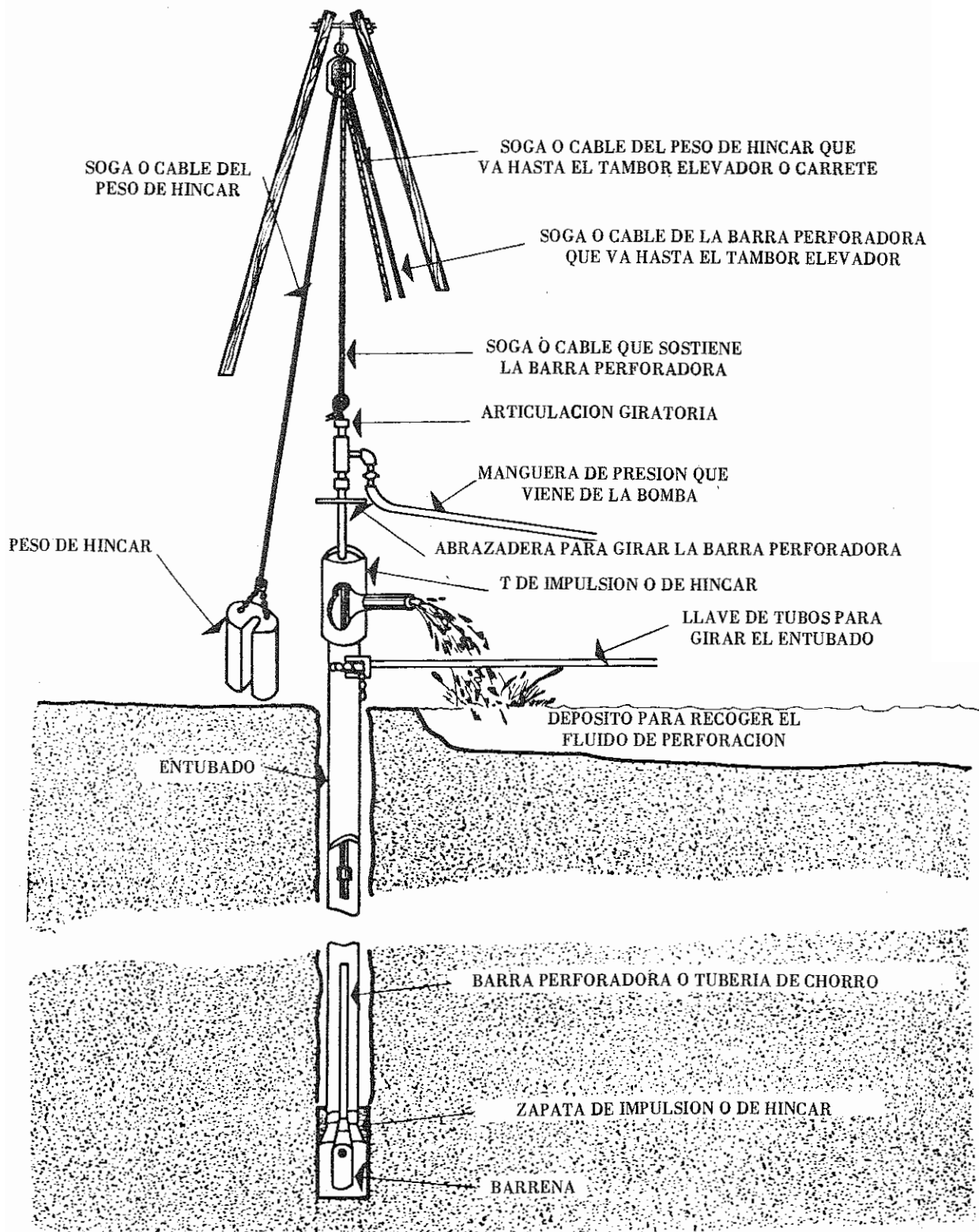


Figura 29 -- Equipo Sencillo de Perforación por Chorro

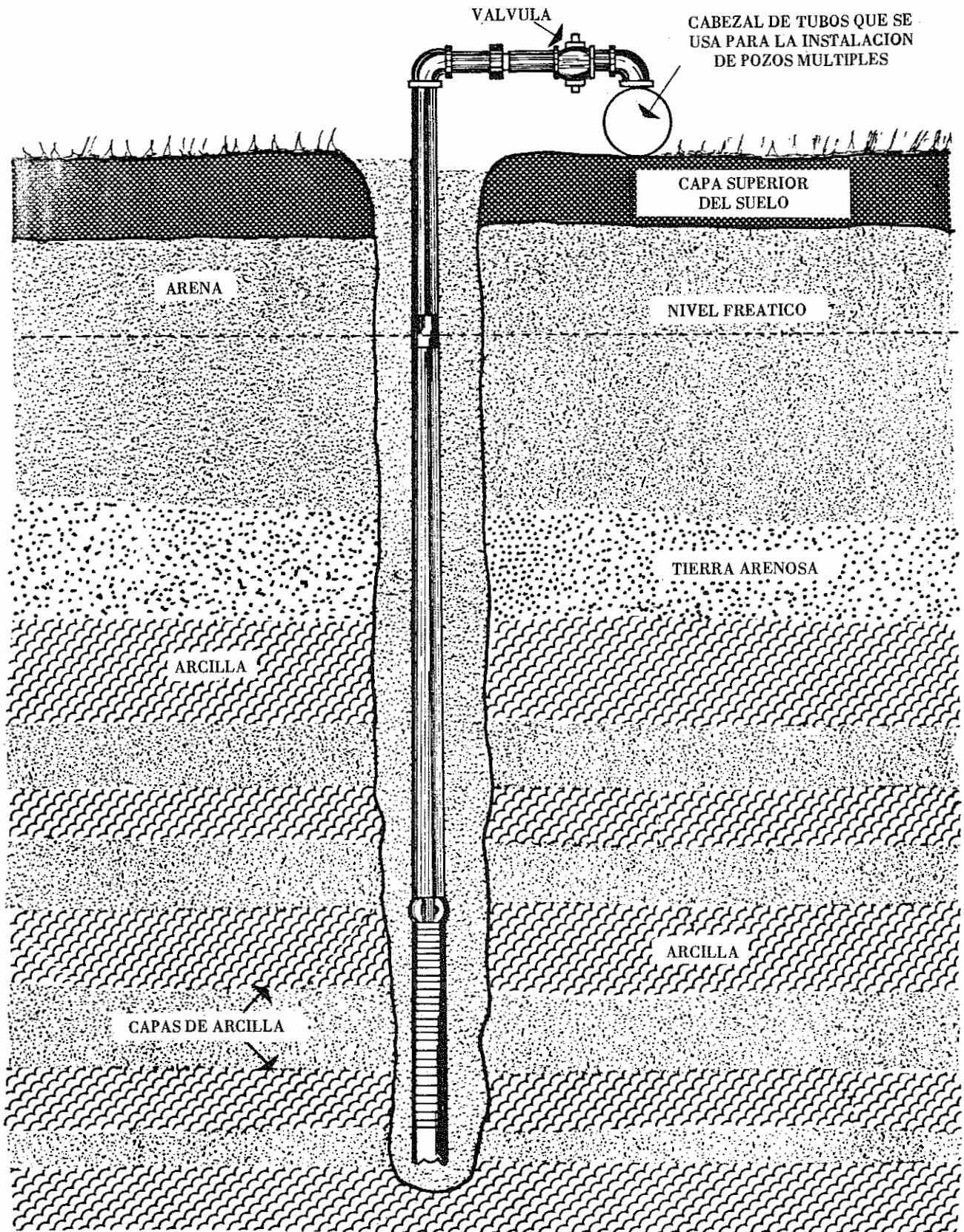


Figura 30 — Sección Transversal de un Pozo Excavado por Chorro

1.2.1.5 Pozos perforados

En la perforación de pozos para producción de agua, se utilizan básicamente los mismos equipos y materiales que son necesarios en la perforación de pozos de petróleo.

La literatura sobre perforación de pozos petroleros es bastante grande y por lo tanto dejamos de hacer un análisis más profundo de esta modalidad de perforación en este documento. Apenas ilustramos los dos sistemas de circulación del fluido de perforación, que pueden ser utilizados:

—Sistema de circulación directa (Figura 31)

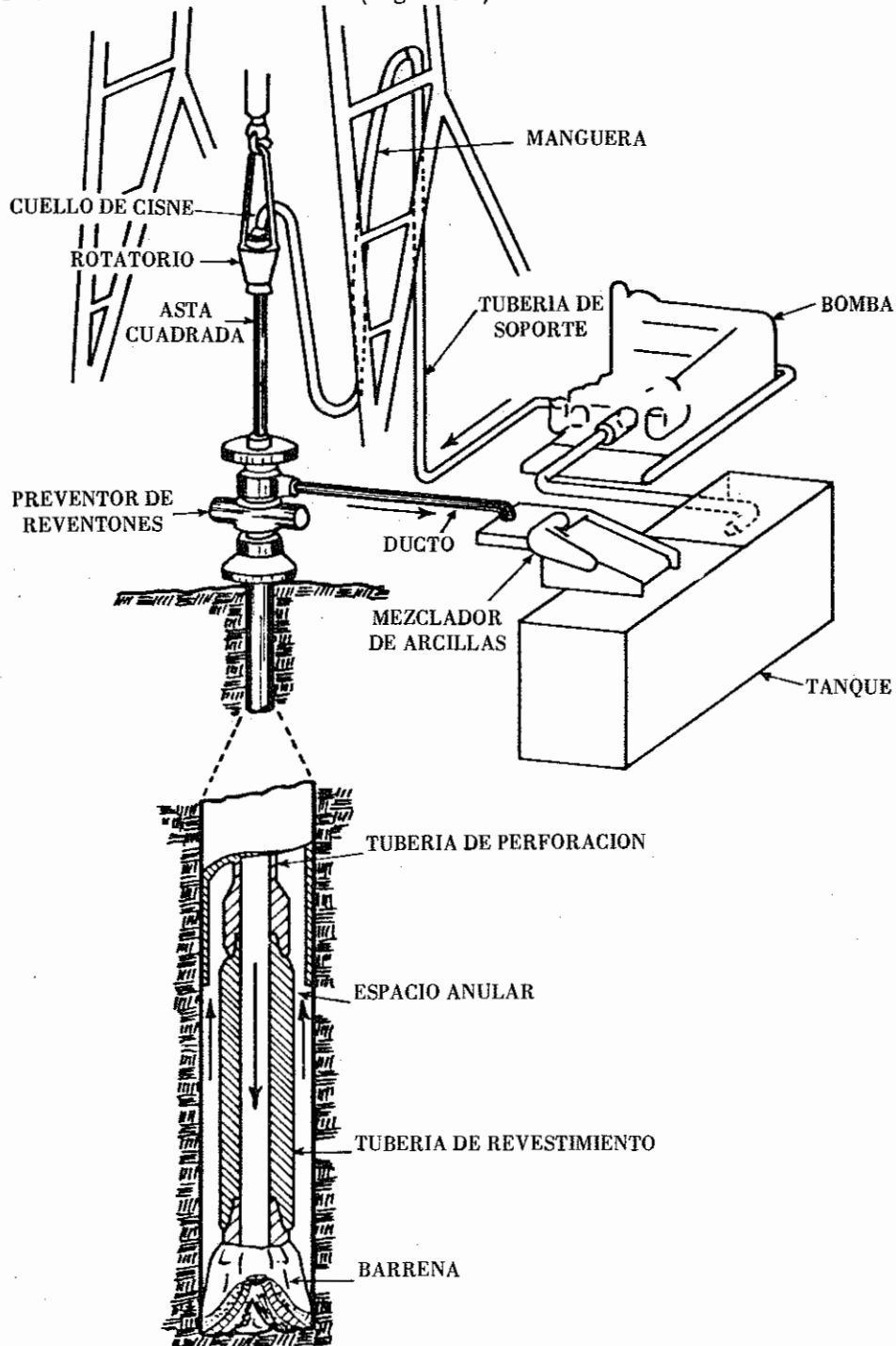


Figura 31 — Pozo Perforado con Sistema de Circulación Directa

-Sistema de circulación inversa (Figura 32)

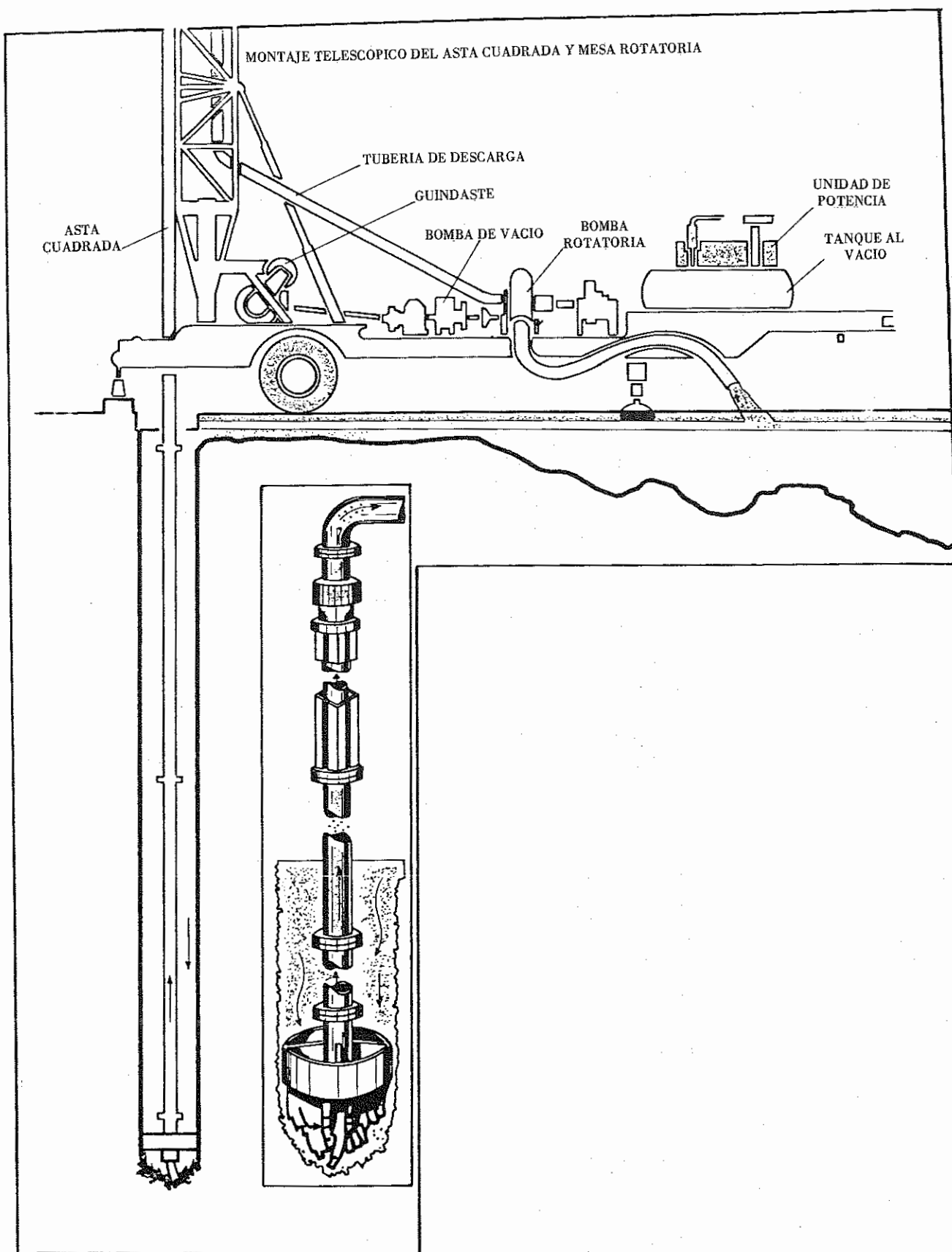


Figura 32 -- Pozo Perforado con Sistema de Circulación Inversa

1.3 COMPORTAMIENTO DE LOS ACUIFEROS

Para extraer el agua subterránea en una forma artificial utilizamos pozos verticales en cualquiera de sus formas (pozos perforados, hincados, excavados, taladrados) como también colectores horizontales. En los primeros el área de la rejilla en contacto con el acuífero es pequeña encontrándose este en posición vertical; en los colectores horizontales el área de contacto puede ser un poco mayor, encontrándose los tubos perforados por donde entra el agua en posición horizontal.

Al perforar un pozo en un valle el agua alcanzará dentro del pozo o el nivel de la tabla de agua, en el caso de que el acuífero perforado sea un acuífero libre (Figura 33a), o un nivel dado por el nivel piezométrico del punto correspondiente al acuífero que se quiera explotar (Figura 33b).

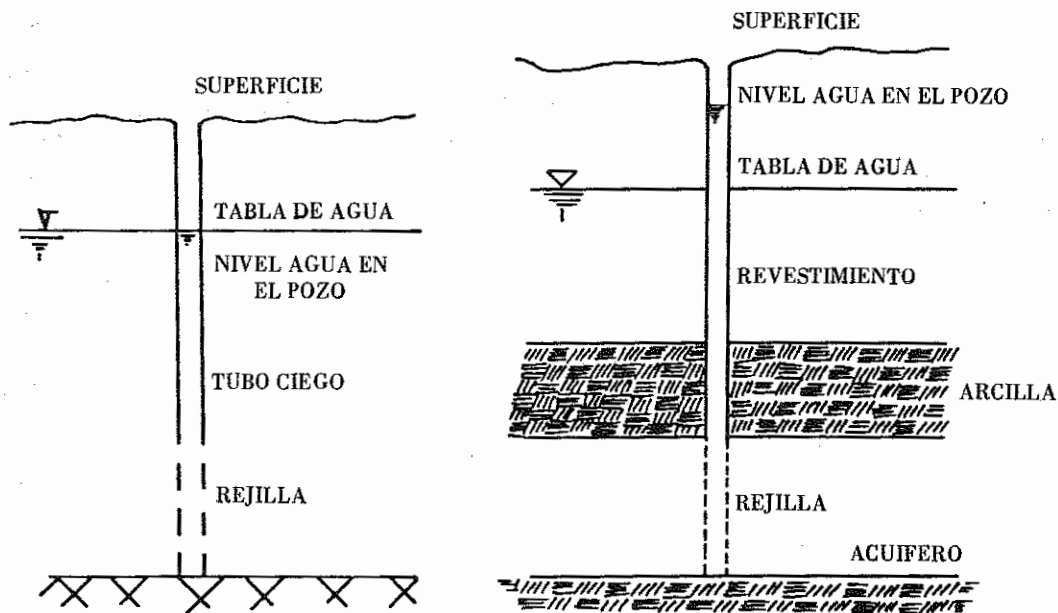


Figura 33 – Nivel Estático del Agua en el Pozo en dos ejemplos de Acuíferos

Ahora bien, si producimos por un medio artificial (equipo de bombeo) un descenso de ese nivel estático del pozo (al extraer un caudal Q_0), se establece un desequilibrio entre este punto y cualquier otro punto del acuífero quedando estos con un mayor nivel piezométrico, y por lo tanto comienza un flujo de agua desde todas las direcciones de la formación hacia el pozo en una forma radial y, en condiciones generales, en una forma simétrica, como se observa en la Figura 34.

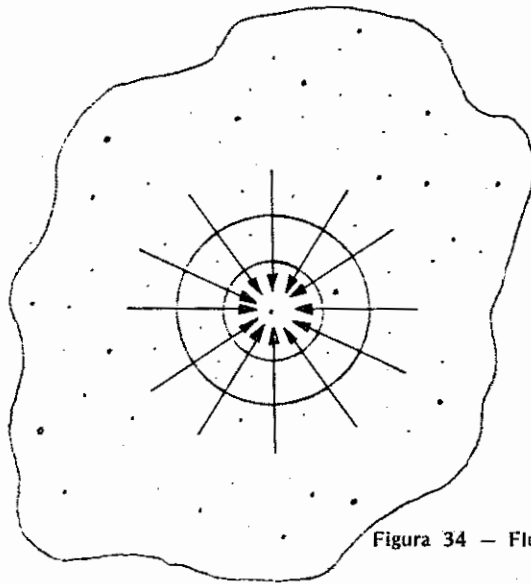


Figura 34 – Flujo de Agua en un Pozo en Producción

El abatimiento que se produce en el pozo es el mayor posible, disminuyendo a medida que se aleja de él (Figura 35). Conforme transcurre el tiempo, el volumen de agua que se extrae del acuífero es $(Q_0.t)$ lo que hace que poco a poco la zona afectada por este abatimiento se agrande hasta cuando se logre un equilibrio.

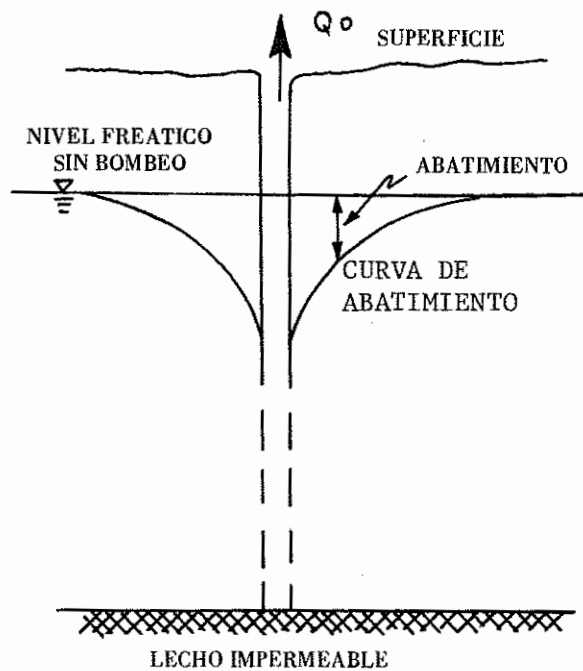


Figura 35 – Abatimiento del nivel de Agua en un Pozo en Producción

La ecuación que rige la curva de abatimiento, es de la forma:

$$s = \frac{Q_0}{4 \pi T} W(u) \quad (1 - 13)$$

u es una función del tiempo t:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (1 - 14)$$

donde:

- s = abatimiento observado en un punto determinado (m)
- Q_0 = caudal extraído del pozo (m^3 /día)
- T, S = propiedades del material del acuífero.
- r = distancia a partir del pozo en donde se observa el abatimiento (m)
- t = tiempo a partir del comienzo de bombeo (días)
- W (u) = integral logarítmica

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \ln \frac{0.56146}{u} + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \frac{u^4}{4 \times 4!} + \dots$$

1.4 NECESIDADES Y CALIDADES DE AGUA

1.4.1 Criterios de Calidad de Agua

El criterio de la calidad del agua depende directamente del uso que se le vaya a dar a la misma. Muchas de las características físico-químicas y bacteriológicas requeridas para determinado uso, son características adoptadas para propósitos generales.

Así, por ejemplo, es condición generalmente aceptada que en un suministro público, para uso doméstico e industrial, el agua debe ser clara, de sabor agradable, de temperatura razonable, ni corrosiva ni incrustante, libre de minerales que produzcan efectos biológicos indeseables y carente de organismos patógenos.

Existen diferentes términos usados para describir la calidad del agua, es conveniente tener en claro el significado de dichos términos para evitar confusiones y errores en su uso.

El término "polución", es un término de significado general, el cual podemos decir que significa la introducción de condiciones indeseables al agua haciéndola

ofensiva al gusto o al olor y no-satisfactoria para uso doméstico o industrial. Un tipo específico de polución sería la "contaminación", la cual implica la introducción al agua de materiales tóxicos, bacterias u otras sustancias perjudiciales que harían a esta fuente completamente rechazable para el consumo.

Aguas "puras", en el sentido estricto de la palabra no existen, se usa por lo tanto el concepto de agua "segura" y agua "potable". Un agua "segura" es un agua cuyo consumo no implica ningún riesgo para la salud del consumidor, y un agua "potable" es aquella que además de ser segura es satisfactoria desde el punto de vista físico-químico y biológico, es decir es además atractiva para su consumo como bebida. Debe tenerse en cuenta que el concepto de agua "segura" es un concepto de valor relativo y no absoluto, es decir que de acuerdo a la técnica y métodos disponibles se puede decir que un agua es segura cuando no existe evidencia de riesgo para la salud del consumidor.

1.4.2 Estándares de Calidad de Agua

Las enfermedades consideradas como transmisibles por el agua incluyen entre otras, fiebre tifoidea, disentería amibiana y bacilar, cólera, gastroenteritis, tularemia, esquistosomiasis y poliomielitis. Por lo tanto, al evaluar la calidad de un suministro de agua, un factor esencial es el control del suministro como posible vector de enfermedad. La importancia de las técnicas de análisis bacteriológico y el significado de dichos ensayos es por lo tanto obvio.

En los estándares de calidad del agua, además de la consideración del análisis bacteriológico y físico, es necesario incluir el análisis químico. El análisis químico fue establecido para revelar el carácter general del agua y determinar la concentración de sus constituyentes. Dichos análisis tienen múltiples fines, desde el de determinar la potabilidad de un suministro hasta el de evaluar la eficiencia de un proceso de tratamiento o detectar cualquier posible fuente de polución.

Las limitaciones impuestas en los estándares de calidad del agua para muchos de sus constituyentes, se basan en el conocimiento de sus propiedades y efectos y en algunos casos simplemente en limitaciones impuestas por las condiciones económicas y la experiencia.

—Aluminio: desde el punto de vista de salud pública no representa ningún problema.

—Boro: en pequeñas cantidades es de gran importancia para la vida vegetal; por encima de 30 mg/lit tiene efectos fisiológicos adversos.

—Arsénico: notoriamente tóxico para los seres humanos. La ingestión de 100

mg. da como resultado un severo envenenamiento y 130 mg., se ha probado son fatal Su efecto es acumulativo y su eliminación demasiado lenta.

—Calcio: el contenido es siempre menor del requerido para nutrición humana (0.7 – 1 gr/día).

—OH⁻: alcalinidad cáustica; existe en aguas ablandada con cal-soda; en aguas con más de 50–100 mg/l, se presenta un sabor desabrido. Se recomienda en aguas ablandadas con cal-soda, para evitar sobretratamiento, que cumpla la siguiente condición:

$$\text{Alcalinidad} < \text{Dureza} + 35$$

Para aguas tratadas químicamente:

$$(\text{Alcalinidad a fenolftaleina}) < (\text{Alcalinidad total}) \times 0,4 + 15$$

—Cloruros: se recomienda cantidades menores a 250 mg/l. Dependiendo de la sensibilidad del individuo algunos detectan sabor salado a menores concentraciones, otros no.

—Cloro: la información no es clara y definitiva, el límite debe evaluarse de acuerdo a las condiciones específicas económico-ambientales del lugar.

—Cromo: aunque el cromo trivalente no es ofensivo, las sales de cromo hexavalente son irritantes. El límite adoptado es de 0.05 mg/l.

—Cobre: se presentan efectos fisiológicos cuando el consumo excede de los 100 mg/día y dichos efectos no son graves, reduciéndose a irritación del tracto intestinal, lo cual produce vómito y náusea.

El límite es de 3.0 mg/l para evitar sabores metálicos indeseables y efectos astringentes.

—Fluor: para dar protección adicional contra las caries dentales, 0.6 – 1.5 mg/l son los valores recomendados, dosis superiores pueden causar fluorosis dental y otros efectos indeseables, aún la muerte.

—Yodo: para evitar el bocio podría usarse la yodificación del agua con una dosis de 0.1 mg. de yodo/cabeza/día. El método más económico es, sin embargo, el de la sal yodada.

—Hierro: hierro + manganeso < 0.3 mg/l

El límite es dado por consideraciones tales como la apariencia rojiza (color) y las características de tinción.

—Plomo: no se encuentra en aguas naturales a menos que se introduzca por contaminación con arsenato de plomo y otras sales.

El servicio de Salud Pública de los Estados Unidos (USPHS), establece un límite de 0,1 mg/l, sin embargo en Holanda se acepta 0.3 mg/l. El efecto de envenenamiento con plomo es acumulativo y aunque no se han reportado casos, debe tenerse esto en cuenta.

—Magnesio: está sujeto a una concentración máxima de 125 mg/l por su efecto purgante. Sin embargo, hay organismos que resisten dosis altas sin mostrar tales efectos.

—Manganeso: hierro + manganeso < 0,3 mg/l

El estandar está basado en las características de tinción de estas aguas y en el hecho de servir el manganeso como nutriente de especies de organismos indeseables en los filtros y en el sistema de distribución.

—Nitratos: además de servir como indicadores de la calidad sanitaria del agua se recomienda un nivel máximo de 40 mg/l ó 10 mg/l NO_3^- ya que por encima de este valor se presentan casos de metehemoglobinemia en la población infantil.

—Fenol: se presenta en aguas naturales como resultado de polución con residuos industriales. Al aplicar cloro a dichas aguas para desinfección, se presentan problemas de olores y sabores indeseables, por esta razón, la concentración máxima permisibles es de 0.001 mg./l.

—Fosfatos: tienen importancia como nutrientes de organismos y por lo tanto estimulante de crecimientos indeseables.

—Radio: estudios hechos en los Estados Unidos indican que el consumo de agua, con la mayor concentración existente de radio, requerido para igualar la dosis medicinal mínima es de 2810 galones por día por cabeza. Por lo tanto, no es un factor de importancia en la calidad del agua para consumo humano.

—Selenio: el límite para evitar efectos tóxicos es de 0.05 mg./l.

—Plata: no abunda en aguas naturales y aún en concentraciones de 0.2 mg./l no tiene ningún efecto perjudicial para consumo humano.

—Sodio: el o/o de sodio permisible, se determina según la fórmula:

$$\text{o/o Na} = \frac{(\text{Na} + \text{K})}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \times 100 \quad (1 - 15)$$

en la cual las concentraciones están expresadas en miligramos equivalentes. Es un valor importante en aguas usadas para agricultura ya que el mantenimiento de la permeabilidad del suelo depende de dicho valor. En general se recomienda un valor máximo de 60 o/o.

—Sulfatos: en general el ión—sulfato está asociado con cationes de efecto laxante, por esta razón se recomienda un límite de 250 mg./l.

—Estaño: no se ha demostrado que tenga efectos perjudiciales.

—Sólidos totales: Los estándares recomiendan un límite de 500 mg./l y en regiones con aguas altamente mineralizadas se aceptan hasta con 1000 mg./l. El estandar está basado en condiciones de adaptabilidad al consumo del agua, para obviar los efectos fisiológicos notados en consumidores no acostumbrados a aguas de alto contenido mineral.

—Zinc: los estándares recomiendan un límite de 15 mg./l por razones de sabor y no por efectos fisiológicos.

—Mercurio: El Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos, ha propuesto tentativamente un límite de 0.005 mg./l, de mercurio en aguas para consumo humano. Las razones para establecer un estandar tan bajo surgen del grave riesgo que implica para la salud humana la ingestión aguda o crónica de mercurio orgánico e inorgánico.

Existen estudios clínicos que demuestran efectos irreversibles en el hígado, los riñones y el sistema nervioso central causados por ingestiones de mercurio en pequeñas cantidades. Debe anotarse que el mismo estandar ha sido adoptado en Rusia.

1.4.2.1 Estándares de calidad de agua para consumo humano

Se incluyen a continuación los estándares de calidad de agua para consumo humano del Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos adoptados en 1962.

Características Físicas: la turbiedad del agua no debe exceder de 5 unidades (escala de sílice), ni el color de 15 unidades (escala de platino—cobalto). El agua no debe tener ni olor ni sabor objetable.

Características Químicas: el agua no debe contener impurezas en concentraciones que puedan implicar riesgo para la salud de los consumidores. No debe ser excesivamente corrosiva. No debe contener cantidades excesivas de ninguna de las sustancias químicas usadas en su tratamiento. Toda sustancia que pueda tener efectos perjudiciales o cuyos efectos no sean conocidos, no podrá introducirse al sistema si su inclusión permite que llegue al consumidor.

La Tabla 4 muestra las sustancias químicas que no deberán estar presentes en un suministro de agua, en exceso de la concentración especificada.

TABLA 4

SUBSTANCIAS QUIMICAS NOCIVAS AL AGUA CUANDO EN EXCESO

Substancia	Concentración máxima permisible en mg/l
Alquil – Benceno – sulfonado (ABS)	0.5
Arsénico (As)	0.01
Cloruros (Cl)	250
Cobre (Cu)	1
Extracto clorofórmico (CCE)	0.2
Cianuro (CN)	0.01
Hierro (Fe)	0.3
Manganeso (mn)	0.05
Nitratos (NO ₃)	45
Fenoles	0.001
Sulfatos (SO ₄)	250
Sólidos disueltos totales	500
Zinc	5

La tabla 5 muestra las sustancias químicas que, en exceso de la concentración indicada, son causa de rechazo del suministro.

TABLA 5

SUBSTANCIAS QUIMICAS QUE PROVOCAN EL RECHAZO DEL AGUA CUANDO EN EXCESO

Substancia	Concentración en mg/l
Arsénico (As)	0.05
Bario (Ba)	1.0
Cadmio (Cd)	0.01
Cromo (Cr ⁶⁺)	0.05
Cianuro (CN)	0.2
Plomo (Pb)	0.05
Selenio (Se)	0.01
Plata (Ag)	0.05

La concentración promedio de Fluoruros deberá mantenerse dentro del límite superior e inferior dado en la Tabla 6. La presencia de fluoruros en concentraciones mayores de dos veces el valor óptimo constituye causa del rechazo del suministro.

TABLA 6

ESTANDARES DE FLUOR PERMISIBLES EN EL AGUA

Promedio anual de las temperaturas máximas diarias del aire en grados centígrados (*)	Límites de control recomendados		
	Concentraciones de fluoruros en mg/l		
	Inferior	Optimo	Superior
10 — 12	0.9	1.2	1.7
12.1 — 14.6	0.8	1.1	1.5
14.7 — 17.6	0.8	1.0	1.3
17.7 — 21.4	0.7	0.9	1.2
21.5 — 26.5	0.7	0.8	1.0
26.6 — 32.5	0.6	0.7	0.8

* Basados en datos de temperatura obtenidos para un mínimo de 5 años

1.4.2.2 Estándares de calidad de agua para uso agrícola

La mayor proporción de agua usada para agricultura la constituye el agua para irrigación. La calidad del agua para irrigación está influenciada principalmente por las siguientes características:

- a) Concentración total de sales solubles
- b) Proporción relativa de sodio vs. otros cationes
- c) Concentración de boro y otros elementos que pueden ser tóxicos
- d) En algunos casos, la relación entre la concentración de bicarbonatos y la dureza.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos acostumbra expresar las concentraciones de sales solubles en me/l. (miliequivalentes por litro) y el total de sales solubles en términos de la conductividad del agua en micromhos/cm. De acuerdo al mismo Departamento de Agricultura, la relación de sólidos disueltos en mg/l a conductividad en micromhos/cm a 25°C es de 0,64. La experiencia demuestra, sin embargo, que dicha relación puede ser tan baja como 0,55 y tan alta como 0.9 en promedio.

De acuerdo al Manual No. 60 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, aguas con conductividades menores de 750 micromhos por centímetro son satisfactorias para irrigación en lo concerniente a contenido total de sales. Sin embargo, algunos cultivos sensibles al contenido total de sales pueden verse afectados adversamente por dichas aguas si las condiciones de drenaje y percolación del suelo no son adecuadas.

Aguas en el intervalo de 750 a 2250 micromhos por centímetro son ampliamente usadas con resultados satisfactorios de crecimiento de cultivos cuando existe buen drenaje y buena administración del riego. Sin embargo, condiciones salinas se desarrollan si el drenaje y la percolación son inadecuados.

Si el contenido de sodio en un agua para irrigación es alto comparado con el contenido de calcio y magnesio, el sodio es absorbido por el suelo reemplazando al calcio y al magnesio. Como el contenido de sodio intercambiable aumenta por la razón anterior, el suelo se hace más sódico y se desarrollan condiciones físicas y químicas adversas que limitan o impiden el crecimiento de las plantas.

Los suelos sódicos se caracterizan, por lo tanto, por un exceso de sodio intercambiable y por una baja permeabilidad. La recuperación de un suelo sódico supone un reemplazo del sodio intercambiable por calcio o magnesio y la remoción del sodio por percolación. El reemplazo se hace comunmente por adición de yeso al suelo o al agua.

El "peligro de sodificación de un agua" o "índice de sodio" se mide por la relación de absorción de sodio (RAS), dada por la siguiente fórmula:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})/2}} \quad (1-16)$$

en la cual, Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , representan las concentraciones en miliequivalentes por litro de los iones respectivos. Para irrigación, se pueden usar aguas con RAS de valores incluso hasta 26 si el contenido mineral es bajo; pero si el contenido mineral es alto, el valor RAS debe ser menor a 10.

La figura 36 contiene la clasificación para aguas de riego basada en la salinidad y la relación de absorción de sodio, tomada del Manual No. 60 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. En dicha clasificación, las aguas se dividen en cuatro clases con respecto a su conductividad, siendo los puntos de división entre dichas clases, los valores 250, 750 y 2250 micromhos/cm. Asimismo, las aguas se dividen en cuatro clases según la relación de absorción de sodio.

Los siguientes comentarios acerca de las diferentes clases, son tomados del Manual No. 60 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

a. Clases de conductividad

Agua de baja salinidad (C1): puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

Agua de salinidad media (C2): puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

Agua altamente salina (C3): no puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se puede necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.

Agua muy altamente salina (C4): no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables y el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de

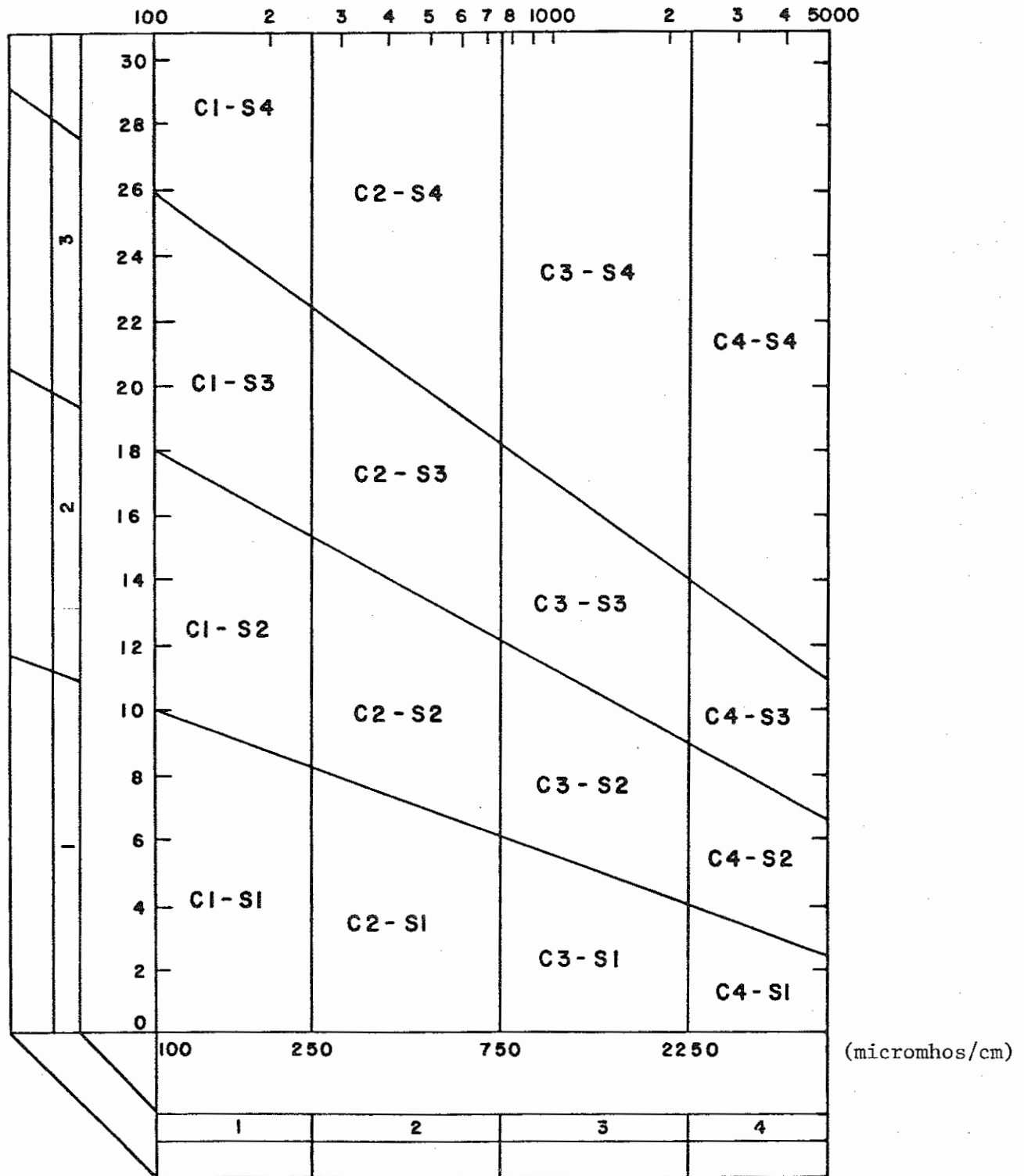


Figura 36 — Clasificación de Calidad de Agua para Riego

agua para lograr un buen lavado; en este caso, se debe seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

b. Clases según el contenido de sodio

Agua baja en sodio (S1): puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Agua media en Sodio (S2): en suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso.

Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

Agua alta en Sodio (S3): puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que estos requerirán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos ricos en yeso pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiables cuando se riega con ese tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir el sodio intercambiable; sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan en aguas de muy alta alcalinidad.

Agua muy alta en Sodio (S4): es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

c. Boro

El boro, en pequeñas concentraciones es esencial para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, es muy tóxico para ciertas especies y la concentración que afecta a unas es casi la misma que necesitan otras para un desarrollo normal. Las concentraciones tóxicas de boro que se encuentran en algunas aguas usadas para riego obligan a tenerlo en cuenta para establecer la calidad del agua. La Tabla 7 los límites señalados por Scofield.

TABLA 7

LIMITES PERMISIBLES DE BORO PARA AGUAS DE RIEGO

Clase de Boro	Cultivos sensibles mg/l	Cultivos Semitolerantes mg/l	Cultivos Tolerantes mg/l
1	< 0.33	< 0.67	< 1.0
2	0.33 – 0.67	0.67 – 1.33	1.0 – 2.0
3	0.67 – 1.0	1.33 – 2.0	2.0 – 3.0
4	1.0 – 1.25	2.0 – 2.5	3.0 – 3.75
5	> 1.25	> 2.5	> 3.75

La tabla o muestra la tolerancia de las plantas al boro.

TABLA 8

TOLERANCIA DE LAS PLANTAS AL BORO

Tolerantes	Semitolerantes	Sensibles
Athel (<i>Tamarix aphylla</i>)	Girasol (nativo)	Nuez encarcelada
Espárragos	Papa	Nogal negro
Palma (<i>Phoenix canariensis</i>)	Algodón Acala	Nogal Persa
Palma datilera (<i>P. dactylifera</i>)	Algodón Pima	Olmo americano
Remolacha azucarera	Tomate	Ciruella
Alfalfa	Rábano	Pera
Gladiolo	Olivo	Manzano
Haba	Cebada	Uva
Cebolla	Trigo	Higo Kadota
Nabo	Maíz	Nispero
Cof	Sorgo	Cereza
Lechuga	Avena	Durazno
Zanahoria	Zinia	Naranja
	Calabaza	Aguacate
	Fríjol Lima	Limón

(En cada grupo, las especies de arriba están consideradas como las más tolerantes, y las de abajo, como las más sensibles).

d. Bicarbonatos

En aguas usadas para riego ricas en iones bicarbonato, existe la tendencia de calcio y magnesio a precipitarse como carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. De esta manera, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo y la concentración relativa de sodio aumenta. El exceso de bicarbonato se mide por la relación "carbonato de sodio residual", la cual se define como la concentración de carbonato y bicarbonato menos la concentración de calcio y magnesio expresadas en miliequivalentes por litro. O sea:

$$\text{"Carbonato de Sodio residual"} = (\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

Aguas con más de 2,5 me/l de "carbonato de sodio residual" no son buenas para riego. Aguas que contienen de 1,25 a 2,5 me/l son dudosas y, las que contienen menos de 1,25 me/l son buenas con toda seguridad. Sin embargo, estas conclusiones están basadas en datos muy limitados y tienen carácter tentativo únicamente.

La Tabla 9 muestra los criterios de calidad de agua para irrigación, según C.S. Scofield.

TABLA 9
CALIDAD DEL AGUA PARA IRRIGACION
(según C.S. Scofield)

Constituyente	Clasificación		
	Clase I	Clase II	Clase III
Sólidos Disueltos Totales	0 – 700 mg/l	700 – 2000 mg/l	2000 mg/l
Cloruros	0 – 150 mg/l	150 – 500 mg/l	500 mg/l
Boro	0 – 0.5 mg/l	0.5 – 2.5 mg/l	2.5 mg/l
o/o Na	60	60 – 75	75

Clase I: Aguas seguras para irrigación en condiciones normales de clima suelo y para cultivos sensitivos.

Clase II: Aguas intermedias que pueden ser seguras para ciertas condiciones y ciertos cultivos, pero inseguras para otros cultivos y otras condiciones.

Clase III: Aguas inseguras en la mayoría de los casos.

1.4.3 Protección de Aguas Subterráneas

Las autoridades sanitarias deben poseer herramientas legales y humanas necesarias para proteger adecuadamente el agua subterránea. Es necesario impedir la descarga, en cualquier estrato de agua subterránea, de aguas residuales domésticas o industriales o de cualquier material venenoso, perjudicial o contaminante.

El propietario de un pozo debe estar alerta y observar con recelo cualquier cambio en la apariencia o sabor del agua. En tales casos, toda el agua usada para consumo y cocido de alimentos debe hervirse o desinfectarse con una dosis doble de cloro a la normalmente usada. El examen de laboratorio indicará la existencia de contaminación, si la hay, y las medidas que deben tomarse para encontrar y remover la causa del problema.

1.4.3.1 Localización del pozo

La distancia de seguridad entre el pozo y un sistema de disposición de aguas residuales depende de muchas variables, incluyendo la hidrología y la geología del área y los procesos químicos, físicos y biológicos. En general el pozo debe localizarse a una elevación superior a la de cualquier fuente cercana de contaminación y en una zona que no esté expuesta a inundaciones. La pendiente del terreno debe ser hacia afuera del pozo. El pozo no debe ser accesible a ninguna clase de insectos, roedores o animales.

Aunque no se puede generalizar y decir con certeza la distancia que debe existir entre el pozo y un sistema de disposición de aguas residuales, pues la polución orgánica prevalece por distancias pequeñas cuando viaja a través de arena, limos o arcilla, pero puede permanecer largas distancias cuando viaja a través de grava gruesa, roca fisurada, arcilla seca fracturada o canales del subsuelo, se deberían utilizar las siguientes distancias mínimas entre el agua y las unidades de aguas residuales sugeridas por el Departamento de Salud del Estado de Nueva York. (Tabla 10).

TABLA 10
DISTANCIAS MINIMAS ENTRE EL AGUA Y LAS UNIDADES
DE AGUAS RESIDUALES

Unidad	Distancia mínima al pozo o tubería de succión
Tanque Séptico	15 metros
Alcantarilla al tanque séptico y al sistema de disposición.	15 metros
Caja de distribución del sistema de disposición	30 metros
Campo de disposición subsuperficial	30 metros
Pozo de infiltración o pozo negro	45 metros
Letrina	30 metros
Corrales de granja, silos	30 metros

Quando se bombea un pozo, el agua subterránea localizada alrededor del pozo se dirige hacia él. Como el nivel de bombeo del agua en el pozo estará aproximadamente a unos 15 ó 45 metros por debajo del nivel de la tabla de agua, el pozo ejercerá una atracción sobre el agua subterránea hasta una distancia de 150 a 300 metros del mismo cualquiera que sea la elevación de la plataforma del pozo. En otras palabras, las distancias y las elevaciones de los sistemas de disposición de aguas residuales deben considerarse en relación con el nivel del agua en el pozo mientras se esté bombeando.

Un campo de disposición localizado a 30 metros de un pozo sobre el terreno puede aún encontrarse 15 metros por encima del nivel del agua en el pozo. Es conveniente, por lo tanto, tener siempre en cuenta los datos hidrogeológicos disponibles para una selección adecuada de la localización del pozo y recordar que las distancias mínimas dadas anteriormente deben usarse solamente como una guía.

1.4.3.2 Revestimiento

Todo pozo debe tener un revestimiento o camisa impermeable. La tubería de

revestimiento debe ser nueva, protegida contra la corrosión exterior e interior y prolongarse lo suficiente. En pozos excavados el revestimiento puede hacerse también con ladrillo, concreto o piedra impermeable y debe ir hasta una profundidad mínima de 3,50 mts., sobresaliendo 30 – 50 cms. sobre el nivel del terreno.

En pozos perforados el revestimiento debe llevarse por lo menos hasta un estrato impermeable sobre el lecho del agua y debe proveerse un sello hermético entre el revestimiento y el estrato impermeable. Si no existe estrato impermeable, la parte inferior del revestimiento se extiende bajo el nivel del agua en el pozo y se provee de una rejilla o coladera de calidad y longitud adecuada para permitir el paso del volumen calculado de agua para condiciones de bombeo normales.

1.4.3.3 Protección exterior

Todo pozo debe ir cubierto con una placa de concreto de espesor mínimo de 10 cm. y que se prolongue por lo menos 30 cm. alrededor de las paredes del pozo. La placa debe tener una pendiente del 2 o/o hacia afuera a fin de facilitar el drenaje del agua. El terreno que circunda la placa debe apisonarse dándole pendiente hacia afuera.

1.4.3.4 Desinfección de pozos

Todo pozo nuevo, modificado, reconstruido o reparado incluyendo el equipo de bombeo, debe ser desinfectado antes de entrar en servicio. El pozo se dará al servicio después de que el análisis bacteriológico dé resultado negativo para el grupo coliforme.

Para la desinfección de pozos, se usa preferentemente compuestos de cloro, tales como hipoclorito de calcio o "Perchloron" (H – T – H), con una concentración de cloro disponible del 70 o/o. También se usa cal clorada (25 o/o de cloro disponible), Perchloron líquido (11 o/o de cloro disponible) y otros compuestos comerciales.

La desinfección, cualesquiera que sea el producto de cloro usado, debe hacerse en tal forma que se garantice un residual de 50 mg/l de cloro libre en el agua durante un período mínimo de 24 horas.

La solución de cloro se prepara preferiblemente en envases de vidrio o de asbesto-cemento.

La tabla 11 indica las cantidades necesarias de "Perchloron" (H–T–H) para

preparar la solución que se usará en la desinfección, para suministrar una concentración de 50 mg/l de cloro disponible, según la capacidad del pozo.

TABLA 11

ESTANDARES DE "PERCHOLORON" PARA SOLUCION DESINFECTANTE

Capacidad del pozo en litros	Gramos de Percholoron	Litros de agua usados para preparar la solución
200	15	20
400	30	20
800	60	20
1.200	90	20
1.600	120	20
2.000	150	20
4.000	300	40
8.000	600	60
12.000	900	80

La Tabla 12 indica las cantidades necesarias de sal clorada (25 o/o de cloro disponible) para desinfección de pozos.

TABLA 12

ESTANDARES DE CAL CLORADA PARA DESINFECCION DE POZOS

Capacidad del pozo en litros	Gramos de cal clorada	Litros de agua usados para preparar la solución
200	45	20
400	90	20
800	180	20
1.200	270	20
1.600	360	20
2.000	450	20
4.000	900	40
8.000	1.800	60
12.000	2.700	80

El procedimiento que debe seguirse para desinfectar un pozo perforado o hincado es el siguiente:

- a. Una vez determinada la capacidad del pozo, con una bomba instalada provisionalmente, se bombea hasta obtener un agua tan clara y libre de turbiedad como sea posible.
- b. Se prepara la solución de "Perchloron" o cal clorada adecuada.
- c. Se retira el equipo de bombeo instalado provisionalmente y se agrega lentamente la solución preparada al pozo.
- d. Se lava el exterior (y el interior si es posible) del sistema de bombeo antes de colocarlo en el pozo.
- e. Después de instalar la bomba, se opera el sistema de bombeo hasta que aparezca un fuerte olor a cloro. Esto se hace intermitentemente unas dos o tres veces con intervalos de una hora, a fin de mezclar bien la solución en el pozo y lavar el interior de la bomba.
- f. Se deja que la solución permanezca en el pozo un período mínimo de 10 horas.
- g. Después de dicho período de tiempo se opera la bomba hasta que el agua esté libre de olor a cloro.
- h. Se toman las muestras necesarias para el análisis bacteriológico.

Debe recordarse que el proceso anterior sólo elimina las bacterias patógenas presentes en el momento de la desinfección y que si existe una fuente de contaminación externa el problema sólo habría sido resuelto temporalmente.

The present document is the first of four successive parts.

WINDMILLS FOR PUMPING WATER

Part 1

INTRODUCTION

One of the major objectives of the Latin American Energy Organization is to strengthen the national programs of its member countries in the field of energy. For this reason, the Regional Wind Energy Program of OLADE has had a component of fundamental interest in the complementary technical training of regional professionals in charge of the different wind energy programs.

As concrete advances of the Wind Energy Program of OLADE, we can present the elaboration of a Preliminary Wind Atlas for Central America and the work advanced towards a Regional Wind Atlas, as well as several Seminar-Courses on the use of wind as a source of energy.

Water pumping by means of windmills, the subject of the present paper, is the main application of wind energy. Not only in remote times, but also nowadays, we can find thousands of these machines operating throughout the world and particularly in Latin America.

It is considered that a document containing studies on the most transcendental application of wind energy is the best way to conclude this initial stage of OLADE's wind energy program.

The wind resource has been widely analyzed in the OLADE Document Series; and therefore, the first chapter of this paper begins with a study on the water resource, of fundamental importance for the design of wind energy conversion systems. Subsequent chapters discuss horizontal —and vertical— axis wind machines used for pumping water, including the dimensioning of their principal components, and also focus on matching these machines to their operating conditions. The pumps used to raise water, common to both types of wind machines, deserved a chapter apart.

Finally, the document concludes with an economic analysis of windmills used in pumping water, as compared with similar systems using other sources of energy.

In order to study any point discussed herein in greater detail, it is suggested that the reader consult the bibliographical references cited at the end of each chapter.

It is hereby hoped to provide Latin American professionals working in the field of

wind energy with a an objective practical value. The response to these efforts will be directly related either to an improvement in regional irrigation or to an increase in the water supply feeding water troughs and fountains for the rural populations of Latin America and making them participants in the undeniable development we are witnessing today.

This document was presented and discussed at the First Latin American Seminar-Course on Windmills for Pumping Water, which was promoted by the Latin American Energy Organization (OLADE), the Institute of Industrial Technological Research and Technical Standards (ITINTEC) and the Ministry of Energy and Mines of Peru and held in Lima, Peru; and it was elaborated on the basis of papers prepared by the following specialists:

- BRAZIL:** Sergio Leal Braga
Alcir de Faro Orlando
Francisco E. M. Saboya
Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro
- CHILE:** Luis Guardamagna Sanhueza
Institute of Technological Research
- COLOMBIA:** Jorge A. Granados Robayo
National University
- MEXICO:** Enrique Caldera Muñoz
Institute of Electrical Research
- PERU:** Alfredo Oliveros Donohue
Teodoro Sanchez Campos
Emilio Mayorga Navarro
Alberto Ruiz de Somocurcio
Institute of Industrial Technological Research and Technical Standards

Of the papers presented by the Seminar participants, we should note the one prepared by engineer Lodevicus Vanssen, from the Steering Committee on Wind Energy for Developing Countries, with headquarters in Holland, who was residing temporarily in Peru through a program of technical assistance. His paper is included as Chapter 6 of this document.

CHAPTER 1 – ANALYSIS OF THE WATER RESOURCE

1.1 EVALUATION OF RESOURCE POTENTIAL

1.1.1 Hydrologic Cycle

The central concept of hydrology is the “water cycle” or “hydrologic cycle,” which is comprised by the circulation of water from the oceans to the atmosphere, then to the continents, and back again to the oceans. (Figure 1).

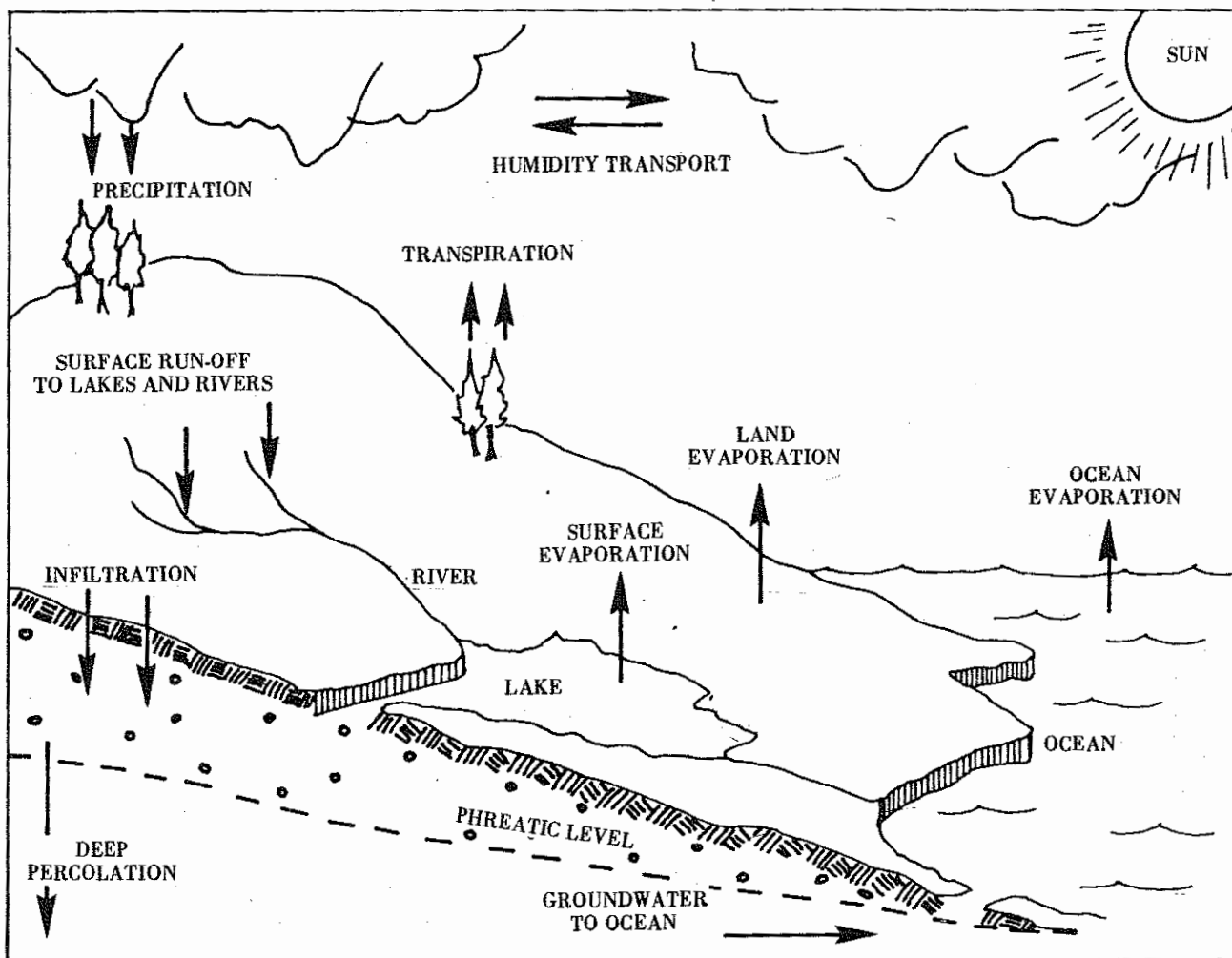


Figure 1 – The Hydrologic Cycle

In the development of the hydrologic cycle, the water particles are transported by the processes of evaporation, winds, precipitation, surface and subsurface flows, etc.; and they pass through the various kinds of storage deposits found along their path: oceans, lakes, rivers, clouds, the atmosphere, and others.

The state in which the particles are found during each one of the above-mentioned processes depends on the temperature and pressure conditions prevailing at each moment. Thus, they can go from the gaseous to liquid state, with a decrease in pressure and temperature, or from the solid to liquid state, with a temperature increase.

1.1.2 Water Volume in the Hydrologic Cycle

It has been estimated that the Earth has a total water volume of approximately 1350×10^{15} cubic meters. This has been concluded on the basis of independent studies done by Ackerman and Lof and by R.L. Nace, with no significant differences in their findings. The corresponding figures are presented in Table 1.

DISTRIBUTION OF THE WATER RESOURCE	Ackerman & Lof	R. L. Nace (corrected values)		
	$m^3 \times 10^9$	Volume of water $m^3 \times 10^9$	o/o of Total Resources	o/o of Fresh-water Resources
1. Oceans	1,307,510,000	1,300,000,000		
2. Salt lakes and inland seas		100,000		
A. Total salt water	1,307,510,000	1,300,100,000	97.26	
3. Glaciers & polar ice-caps	30,427,978	28,500,000		77.652
4. Atmospheric steam	14,185	12,700		0.035
5. Hydrated minerals	414			
6. Water in plants & animals	1,129			
B. Unusable fresh water	30,443,706	28,512,700	2.13	77.687
7. Lakes	124,583	123,000		0.335
8. Rivers	1,151	1,230		0.003
SURFACE FRESH-WATER RESOURCES	125,734	124,230	0.01	0.338
9. Groundwater	37,498	65,000		0.178
10. Groundwater (up to 800 m)	4,499,808	4,000,000		10.898
11. Groundwater (more than 800 m deep)	5,630,927	4,000,000		10.898
GROUNDWATER RESOURCES	10,168,233	8,065,000	0.60	21.974
C. Available fresh water	10,293,967	8,189,230	0.61	22.31
D. Total fresh-water resources	40,737,673	36,701,930	2.74	100.00
E. Total on-land water resources	1,348,247,673	1,336,701,930	100.00	

APPROXIMATE DISTRIBUTION OF THE EARTH'S WATER

It can be observed that the underground water reserves are larger than the fresh-water resources on the surface. Nevertheless, their full utilization depends on both technical and economic factors, since more than 50 o/o of the total subsurface water is found at a depth greater than 800 meters.

1.1.2.1 Importance of Groundwater

Groundwater generally has the following characteristics:

- a. In most cases, it is unpolluted.
- b. It can be extracted by means of wells, in amounts ranging from a few liters per second to hundreds of liters per second (thousands of gallons per minute-gpm).
- c. It is a little harder and more mineralized than surface water in the same area, but its chemical quality is more uniform throughout the year.
- d. It is not necessary to remove sediments.
- e. When it is polluted, treatment is simple and relatively inexpensive.
- f. Its temperature, like its chemical quality, is relatively uniform throughout the year.
- g. It provides an emergency water supply in the case of a nuclear disaster.

1.1.2.2 Distribution of Groundwater

Soil humidity	$65 \times 10^{12} \text{ m}^3$
Water less than 800 meters deep	$4 \times 10^{15} \text{ m}^3$
Water more than 800 meters deep	$4 \times 10^{15} \text{ m}^3$

1.1.3 Soil Properties

A porous medium is basically earth composed of solid particles, water, and air, grouped in such a way that they leave interstices which vary in form and size and which are interconnected to form a rather complicated network of conduits through which water can circulate. In some rocks, this interconnection does not exist, and the passage of water is thus impeded; in others, the interstices become enormous caverns. The nature of the interstices is determined by the geological evolution of the rocks.

1.1.3.1 Porosity

Porosity is a measure of the interstitial space in a rock, i.e., of the amount of fluid that a given medium can store. It is expressed as the volume of empty space

divided by the total volume occupied by the rock, and it depends on the following factors:

- a. Form and arrangement of the particles
- b. Particle size (granulometry)
- c. Degree of compaction

If we consider the special case of round grains, porosity will depend on their placement and not on their size. For cubical and hexagonal arrangements, values of 47.6 o/o and 26 o/o can be obtained, respectively, for any particle diameter. (Figure 2)

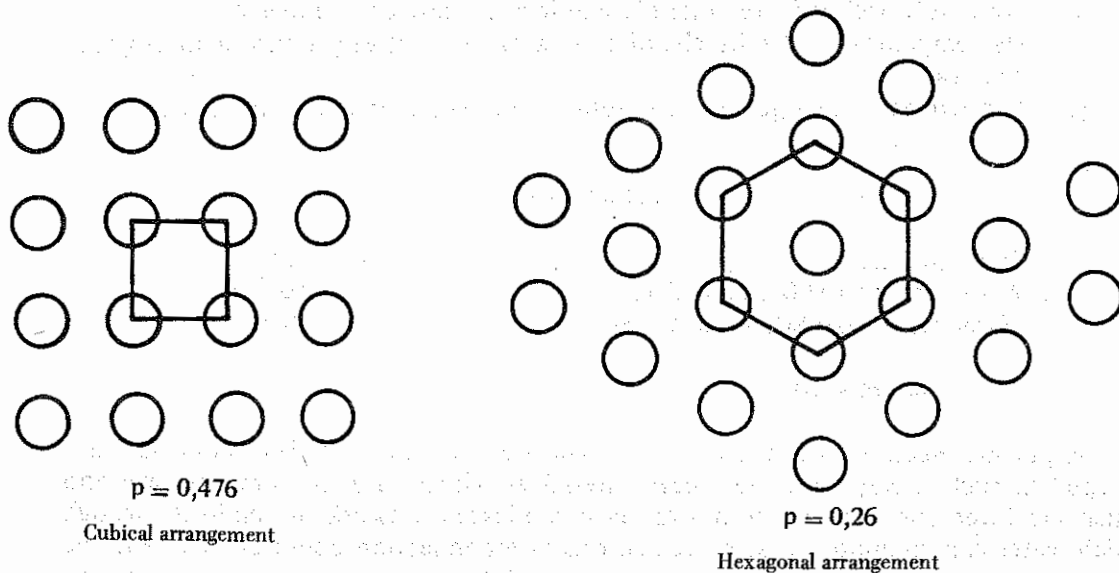


Figure 2 — Influence of Granular Arrangements on Porosity

When comparing two fairly uniform samples of sand, one fine- and one medium-grained, the porosity value, i.e., the capacity to store a certain amount of water, is going to be the same (in theory); but the individual pores of the medium-grained sand will be larger. (Figure 3).

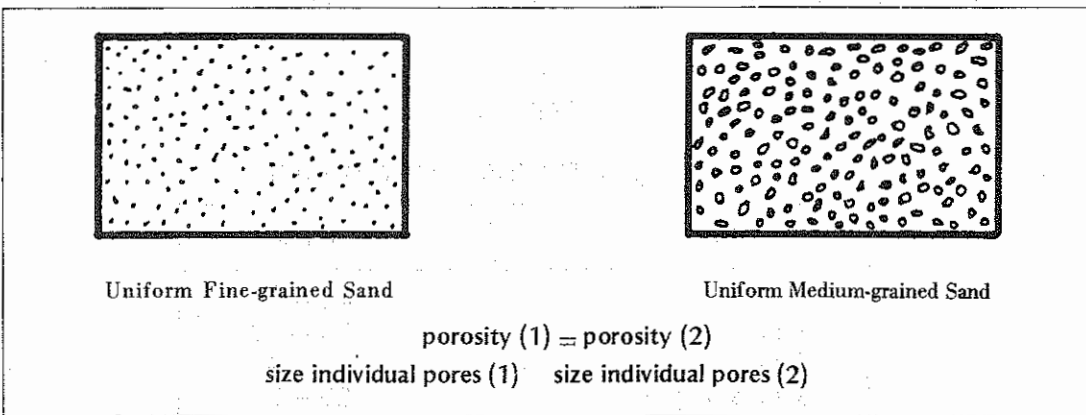


Figure 3 — Comparison of Two Sand Samples (Fine- and Medium-grained)

The porosity of sedimentary rocks will vary in accordance with the arrangement of the empty spaces, as illustrated in Figure 4.

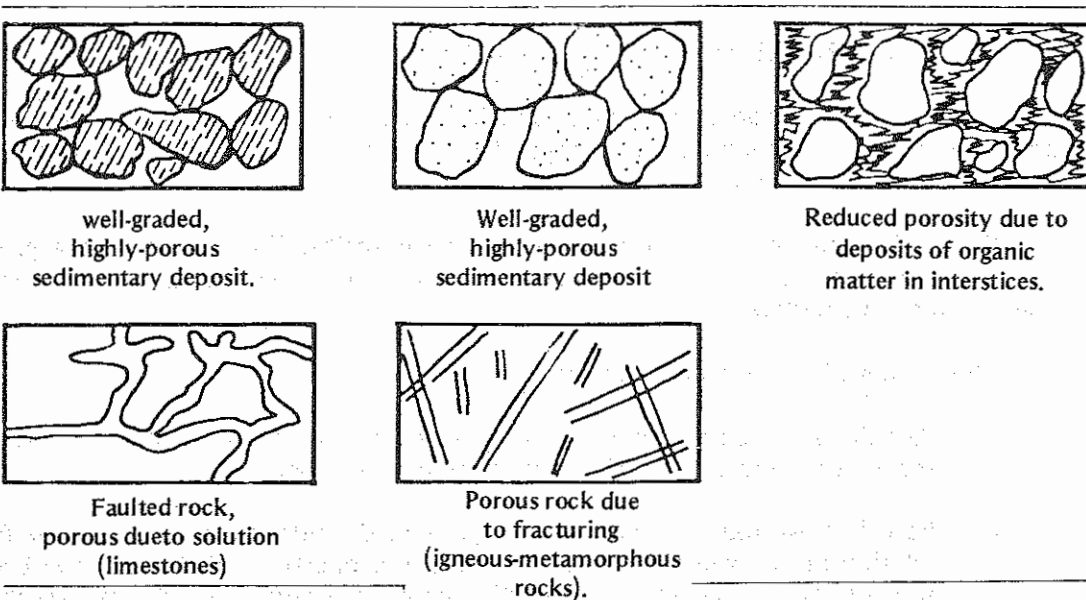


Figure 4 — Porosity as a Function of the Empty Spaces in the Earth

The accuracy of the porosity determinations depends on the way in which the samples are taken; the measurements taken in consolidated rocks prove to be more accurate than those taken in unconsolidated sediments. A porosity greater than 20 o/o can be considered high; between 5 o/o and 20 o/o, medium; and below 5 o/o, low. Table 2 gives some examples of the porosity of certain types of rock.

TABLE 2
POROSITY (p) IN SEVERAL TYPES OF ROCK

Rock	p (o/o)*
Clay	45 – 55
Sand	35 – 40
Gravel	30 – 40
Sand and gravel	20 – 35
Sandstone	10 – 20

*These values depend on the degree of compaction

1.3.2 Permeability

Permeability is a porous medium's capacity to transmit water. Thus, it is said that land is permeable if it permits the passage of water, and impermeable if it practically does not allow water to seep through.

Obviously, this concept is closely related to porosity. For example, at a given moment, a granitic rock can be considered permeable if it presents fissures or cracks where water can circulate.

The permeability value depends on:

- a. Particle size (granulometry): In general, it can be said that a uniform formation is more permeable than a non-uniform one.
- b. Porosity: Although several studies have been undertaken to determine the relationship between permeability and soil properties, this has not yet been well defined, given the impossibility of considering all of the factors that affect the ease of water movements in the ground. The Kozeny-Carman

theory provides an idea of the relationship existing between permeability and porosity. Broadly speaking, it establishes that:

$$k = C_1 \frac{p^3}{(1 - p)^2} d^2 \quad (1 - 1)$$

where:

- d = size of a characteristic grain
- k = intrinsic permeability
- p = porosity
- C₁ = a constant that depends on the form and arrangement of the grains

- c. Form and size of the grains: Allen Hazen, in his experiments with sand filters, indicated that permeability varies with the square of the effective size. Nevertheless, it seems that this is only true for up to a certain size of sand.
- d. Arrangement and orientation of the grains: Granular arrangement affects porosity and, therefore, permeability, as stated before; the orientation of the grains is a determining factor in the different permeability values for two different directions.

Table 3 illustrates the permeability (k) of several types of rock:

TABLE 3

PERMEABILITY (k) OF SEVERAL TYPES OF ROCK

Rock	k (m ³ /day)
Clay	10 ³
Sand	5 – 40
Gravel	100 – 1000
Fissured sandstone	50 and above
Limestone	25
Sand mixed with (o/o)	
of gravel:	
40 – 50 o/o	K – sand
60 o/o	2K
70 o/o	4K

*These values depend on the degree of compacting.

1.1.4 Types of Rock

The different types of rocks can be grouped under three headings, according to their capacity to contain water and to permit its flow.

- a. Aquifers: These are permeable rocks that have intercommunicated interstices through which water can move with relative ease under natural field conditions.
- b. Aquicludes (confining layers): These are impermeable rocks which, although they may contain large amounts of water, do not permit it to pass easily.
- c. Aquifuges (confining layers): These are impermeable rocks which neither contain nor allow the passage of water. They are those in which intercommunicated interstices do not exist and, consequently, they do not absorb or permit the passage of water.

In the unconsolidated porous rocks such as loose sand, water moves through the entire intergranular volume. In consolidated rocks, water can only move through fissures, fractures, or faults or through dissolution openings made by the water itself.

1.1.4.1 Types of Aquifers

The aquifers in any type of rock with intergranular or fissure-based porosity can be classified in three important groups:

I. Free Aquifers

These aquifers are those in which the surface above the groundwater is in contact with the atmosphere through an aeration zone (Figure 5). The surface above the saturation zone is known as the **water table**.

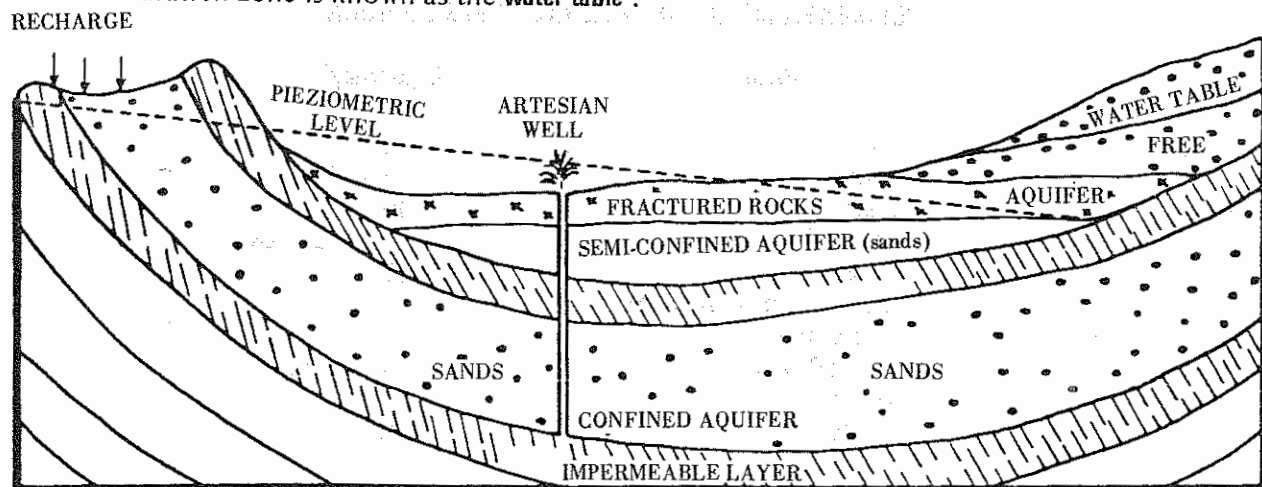


Figure 5 — Types of Aquifers

The water table is not a flat surface, and it generally tends to follow the lines of the ground's surface. The depth of the water table varies from zero to hundreds of meters, depending on the climate and geology of the area.

II. Confined Aquifers

These aquifers are those in which the groundwater is confined under pressure inside the impermeable rocks. In a confined (or artesian) aquifer, the water level in a well is raised above the upper part of the aquifer.

The piezometric surface of a confined aquifer is an imaginary surface that coincides with the hydrostatic level of the water in the aquifer (Figure 5). The level of the water in a well that penetrates a confined aquifer determines the elevation of the piezometric surface at that point; and if this surface lies above the ground level, the well will be an artesian well. A confined aquifer becomes a free aquifer at the place in which the piezometric surface is below the base of the confining upper rock (cap rock).

III. Semi-confined Aquifers

These are those aquifers which are completely saturated with water and are limited from above by a semi-permeable rock (Figure 5). These aquifers have a low but not insignificant permeability (Figure 5); and although the hydraulic capacity of the overlying layer is appreciable, the horizontal component of the flow is negligible.

1.1.5 Influence of Topography and Geology on Aquifers

The presence and distribution of groundwater in rocks is controlled by geology (type, texture, and structure of the rock), by hydrology (zones and magnitude of recharge), and by the different interrelationships with topography.

Due to the fact that these factors can combine in a number of ways, it is very difficult to establish norms or general rules that can be applied universally to any study aimed at identifying the presence of groundwater. Only a complete knowledge of the geology and hydrology of a given area can reveal the true nature of the situation and even then, only if the data are well interpreted and adequately correlated with the topography of the area.

Several practical examples will aid in clarifying the interrelationships. Figures 6 through 10 provide examples of different kinds of aquifers in which good-quality wells, fountains and even artesian wells can be located.

Figures 11 through 14 illustrate how an area can have productive wells and only a few meters away wells with low yields or with water of poor quality.

Figures 6 and 7 present inverse hydrogeological conditions occurring in the same physiographic situation. Figure 6 shows a free aquifer located in a high place where it is possible to extract groundwater easily. Figure 7 presents an aquifer confined by a cap rock, where easily accessible groundwater is only obtained in the low part, next to the river. Geological control is determined by the arrangement of the permeable and impermeable rocks, even though the topography and geological structure are the same.

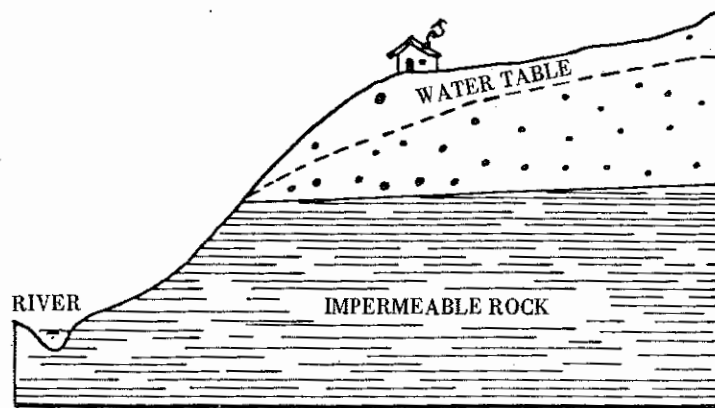


Figure 6 — Free Aquifer

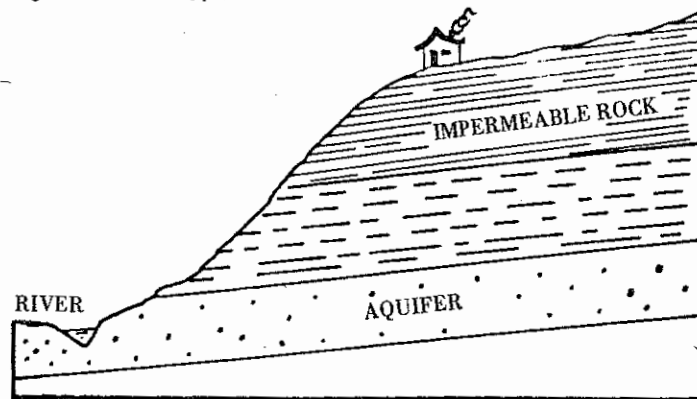


Figure 7 — Confined Aquifer

Figures 8 and 9 show a clear geological control of the groundwater, in both cases originating in the tectonic movements that caused folding (Figure 8) and displacements along a fault (Figure 9). In the first case, the aquifer is found in a syncline, with outcropping to the left, giving rise to an area of springs and artesian wells. In the second, the fault has displaced the surface aquifer, which disappears suddenly along the fault line.

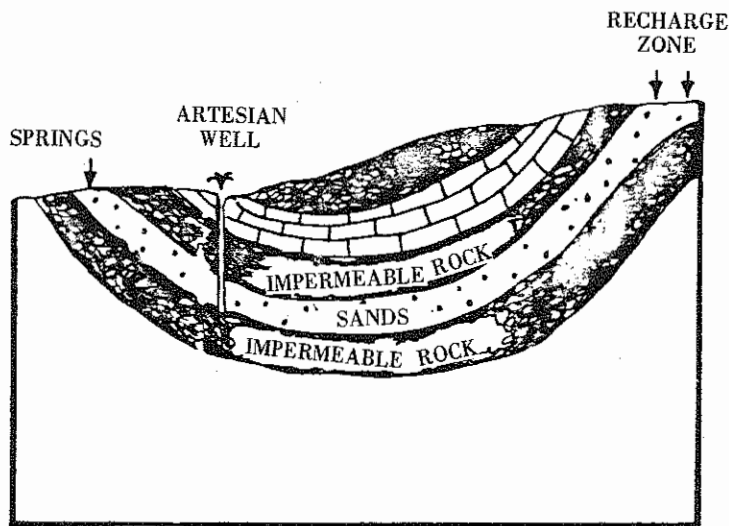


Figure 8 — Geological Control of Groundwater through Folding

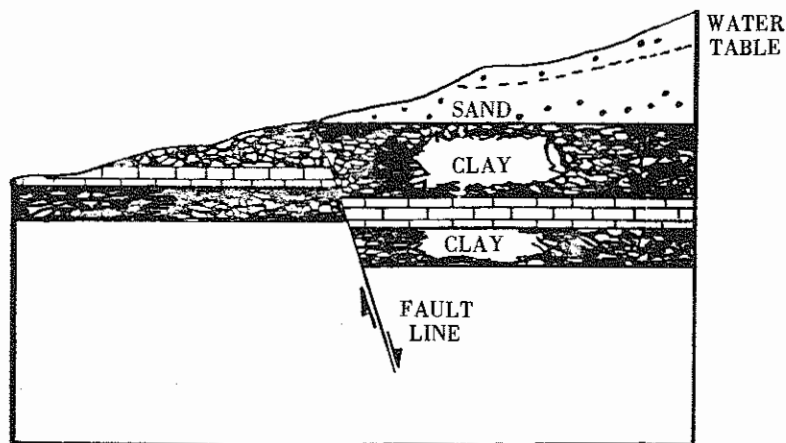


Figure 9 — Geological Control of Groundwater through Fault Displacement

The presence of groundwater in karstic regions is a special case, due to the fact that the high solubility of limestone in water results in hydrological characteristics different from those developed in any other type of rock. In most of the karstic regions, rivers and other surface currents are scarce since the flow is concentrated in underground currents that appear later in the form of large-volume springs.

The system of caverns developed in Figure 10 is such that while the upper cavern does not conduct water to the surface, the lower one captures all of the subsurface flow, stores part of it, and transports it to the surface in the form of a large spring.

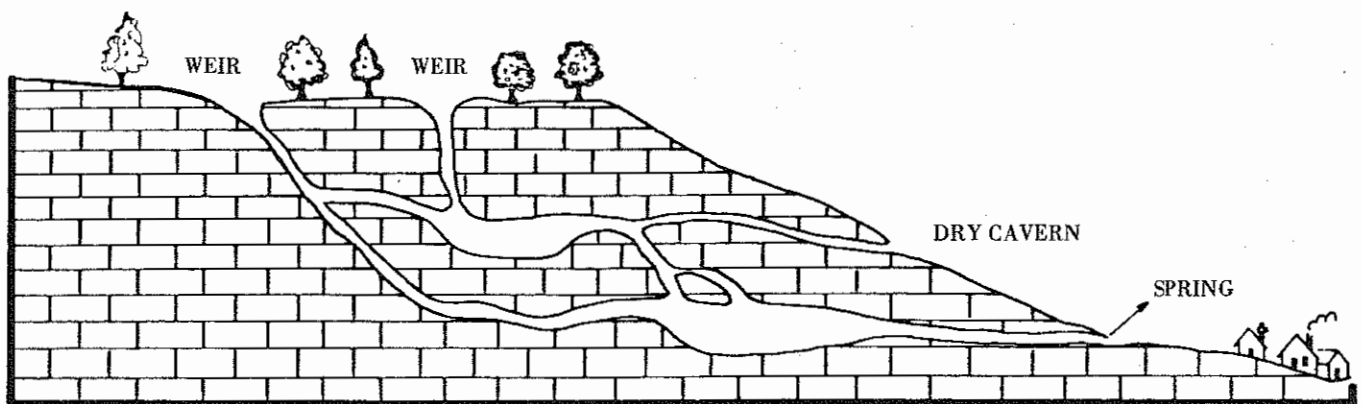


Figure 10 — System of Caverns

The slope of these layers of clay and of the topographical surface controls the presence of groundwater, as illustrated in Figure 11a. The well on the right can be productive throughout the year, while that on the left, despite its greater depth, is unproductive.

The opposite case is presented in Figure 11b. The same topographical surface, with different characteristics in its geological structure, results in different hydrological conditions. Since the groundwater does not contribute to the water flow, the river will have a sporadic regimen; during the rainy season it will capture the high surface run-off. Geological control is evident.

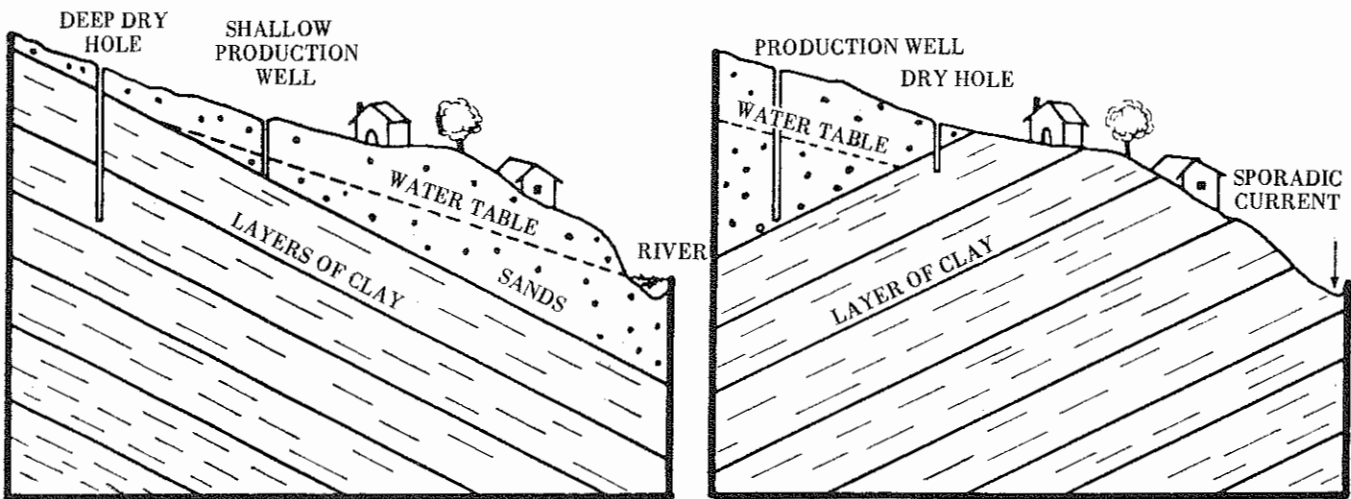


Figure 11 — Examples of Water Wells as a Function of the Slope of the Topographical Strata

Figure 12 shows how one same geological structure gives rise to different hydro-geological conditions, as a result of the physiographic control. The clays and other overlying impermeable layers (Figure 12a) impeded direct sand recharge. However, in Figure 12b, the topographical conditions are such that the surface run-off is channeled towards the valley, where the sands that are recharged by precipitated water outcrop in the entire basin area.

The “dry hole” in the center of the basin is productive in the winter season, when intense recharge makes the water table rise.

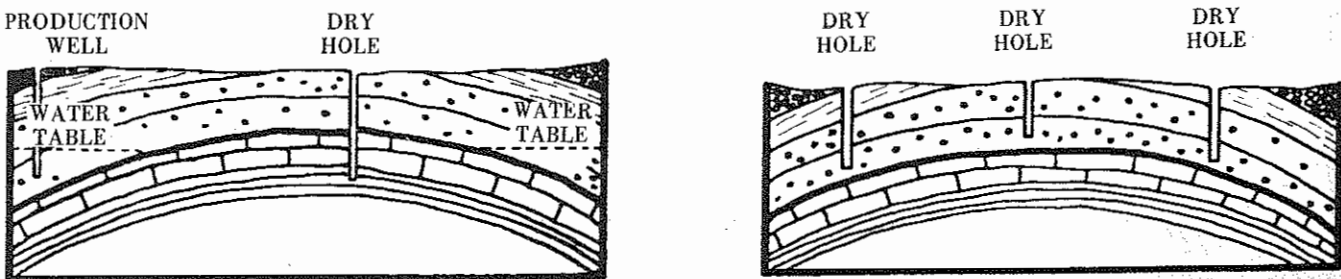


Figure 12 — Natural Geological Conditions (1)

Figure 13 illustrates another interesting case of favorable geological conditions. The deep well shown in the figure, despite its greater proximity to the sea than the saline surface well, will undoubtedly be a good continuously productive well for fresh water. Such favorable geological conditions are frequently presented by Nature.

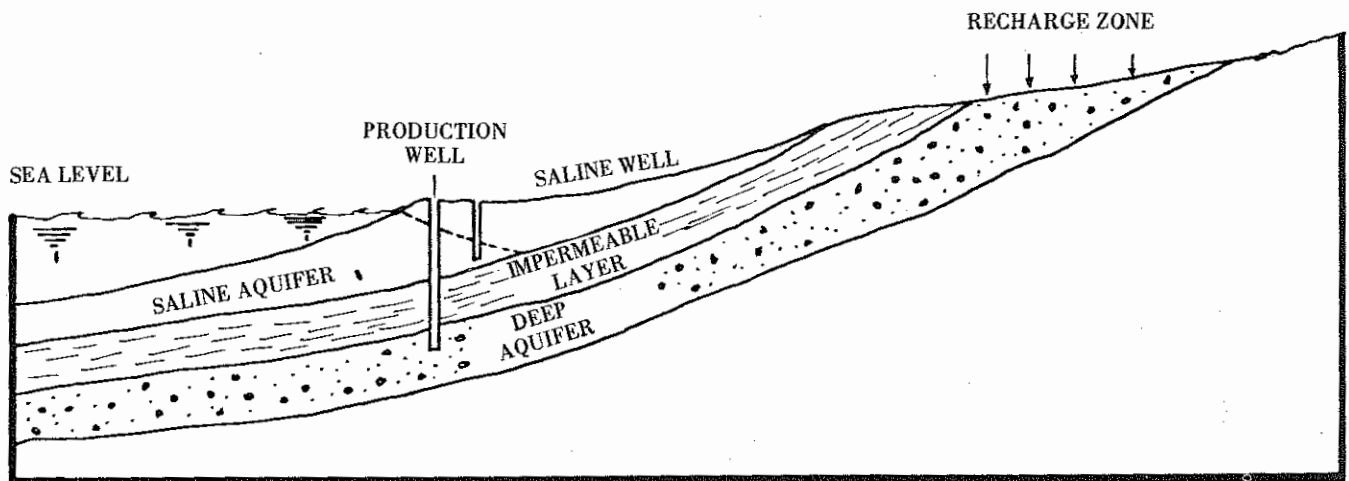


Figure 13 — Natural Geological Conditions (II)

In impermeable rocks such as the igneous ones in Figure 14a or the consolidated sandstones of Figure 14b, groundwater can be found only if they are intensively faulted or fractured. The thermal waters of many regions are usually associated with deep faults such as the one indicated in Figure 14b.

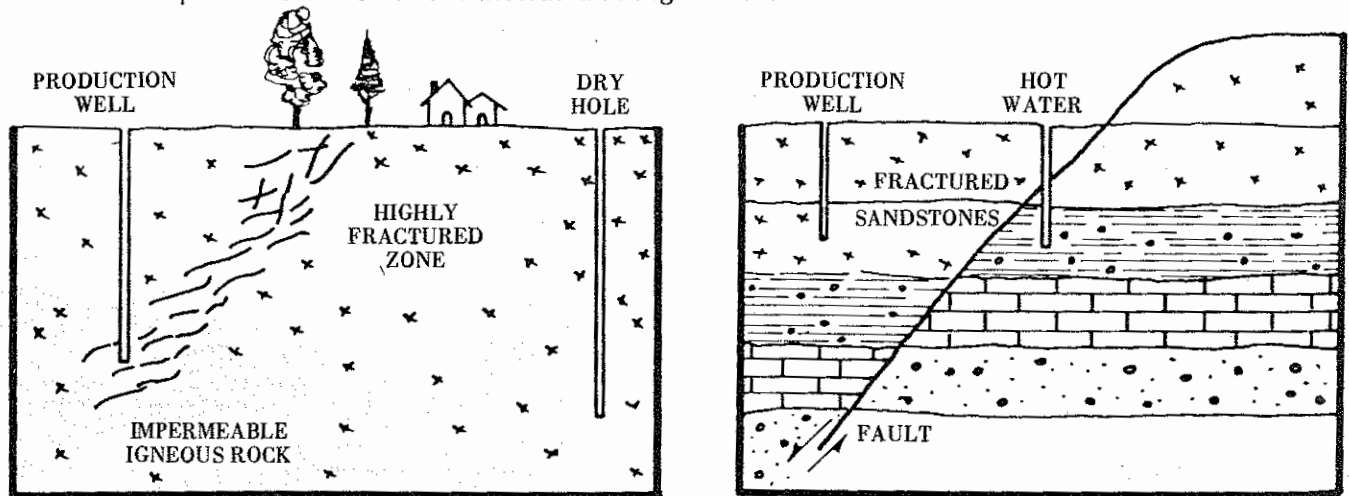


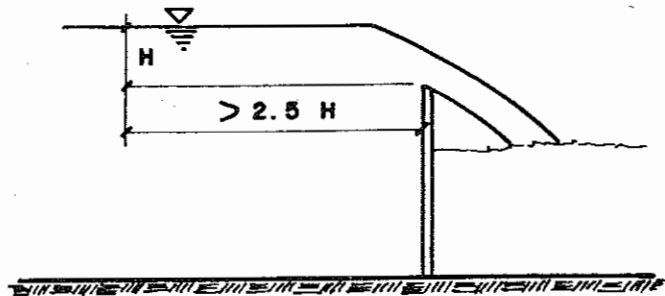
Figure 14 — Natural Geological Conditions (III)

The foregoing illustrations indicate 1) that it is necessary to bear in mind the geological, hydrological, and topographical aspects if it desired to clearly identify the hydrogeological model of the area under study and 2) that only thorough, correct reasoning will make it possible to establish conditions for storing groundwater and its possible utilization.

1.1.6 Flow Measurements of Surface Resources

1.1.6.1 Weir

The weir shown in Figure 15 is an obstruction in the canal which obliges the water to become stagnant and to flow over the same. By measuring the height of the water's surface, the flow can be determined; the weirs can have either thick walls or thin ones.



"H" is measured at a distance greater than 2.5H.

Figure 15 - Weir

The equation which is used for these measurements is as follows:

$$Q = C H^n$$

where:

- Q = water flow
- C = proportionality coefficient
- H = height of the water's surface
- n = exponent proper to each form of weir

Figure 16 illustrates several types of weirs.

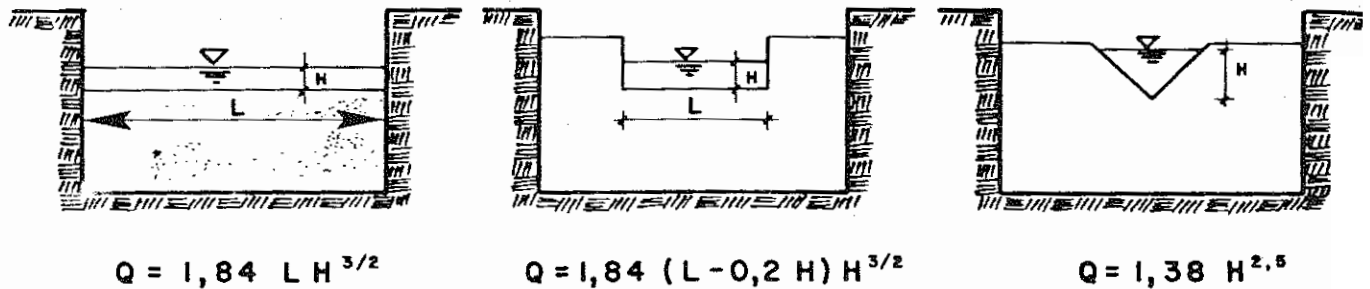


Figure 16 - Types of Weirs

1.1.6.2 Current Meter

Evaluations done with a current meter are based on the continuity equation:

$$Q = V \times A \quad (1-3)$$

where:

- Q = water flow
- V = velocity of the water flow
- A = area of the total transversal section of the water flow

A current meter is used to measure water velocity. This device takes the form of a propeller which permits the speed of the flow to be determined on the basis of the following equation:

$$V = a + b N \quad (1-4)$$

where:

- a and b = constants of each device, provided by the manufacturer
- N = the number of revolutions per second at which the propeller of the current meter turns, moved by the water.

In order to measure the water flow Q, the following procedure is used: the total area of the transversal section of the water flow is divided into small sections, as indicated in Figure 17; the area and average speed of each one is determined separately, with the limits being the water's surface, the bottom of the watercourse and two imaginary vertical lines which separate each one from the others. The partial canals

which flow through each one of the sections are determined on the basis of the following equation:

$$q = v \times a \quad (1 - 5)$$

in which:

- q = water flow in the transversal section
- v = velocity of the water flow in section (average value of 2 measurements at 0.2 and 0.8h)
- a = area of the small transversal section ($a < 0.1A$)

The total water flow Q is the sum of the canal sections:

$$Q = \Sigma q \quad (1 - 6)$$

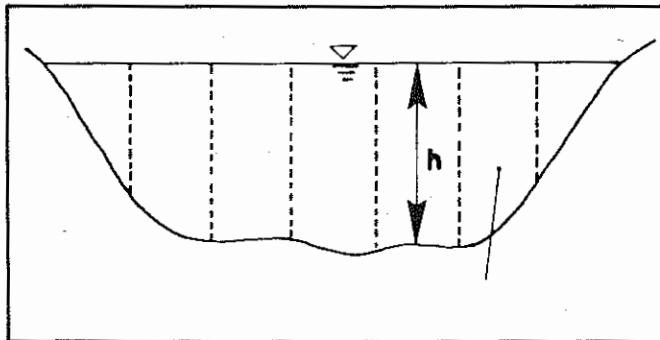


Figure 17 – Measurement of the Water Flow with a Current Meter

1.1.6.3 Orifice

This consists of a plate with a smaller diameter than that of the piping in which it is placed (see Figure 19). Its equation takes the following form:

$$Q = k \cdot \sqrt{A \cdot 2 \cdot g \cdot h} \quad (1 - 7)$$

where:

- Q = discharge flow (m^3/sec)
- K = rugosity factor
- g = acceleration of gravity ($9.81 m/sec^2$)
- h = piezometric height (m)
- A = area of the orifice (m^2)

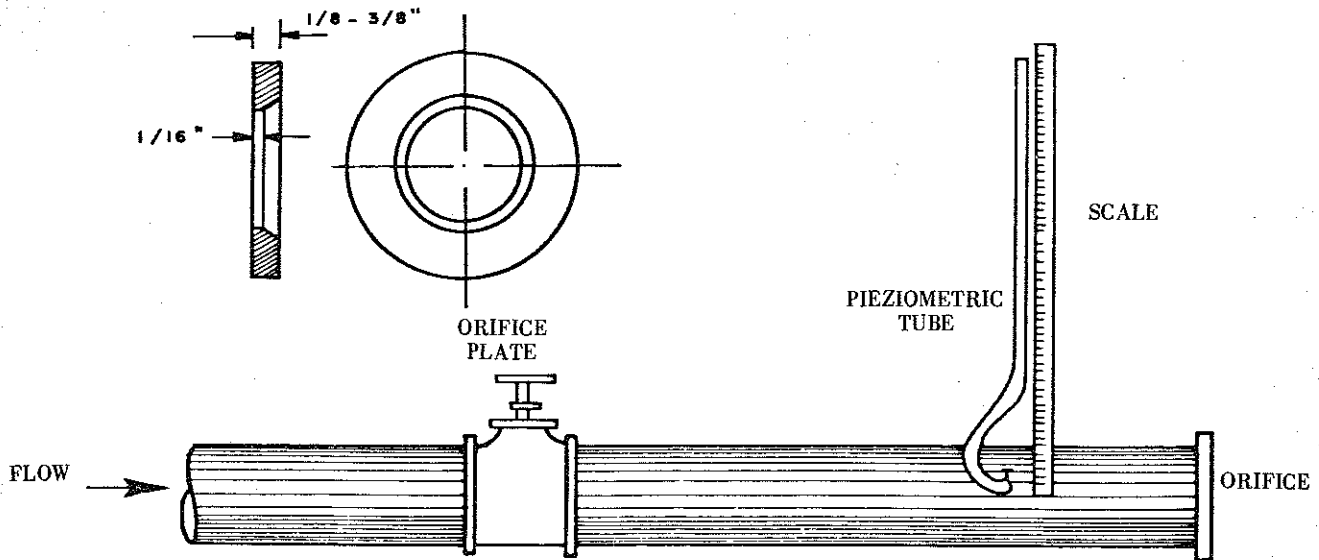


Figure 18 – Hydraulic Orifice to Measure the Water Flow Q

The value of K is obtained graphically when the relationship of the orifice and pipe diameters is known (Figure 20).

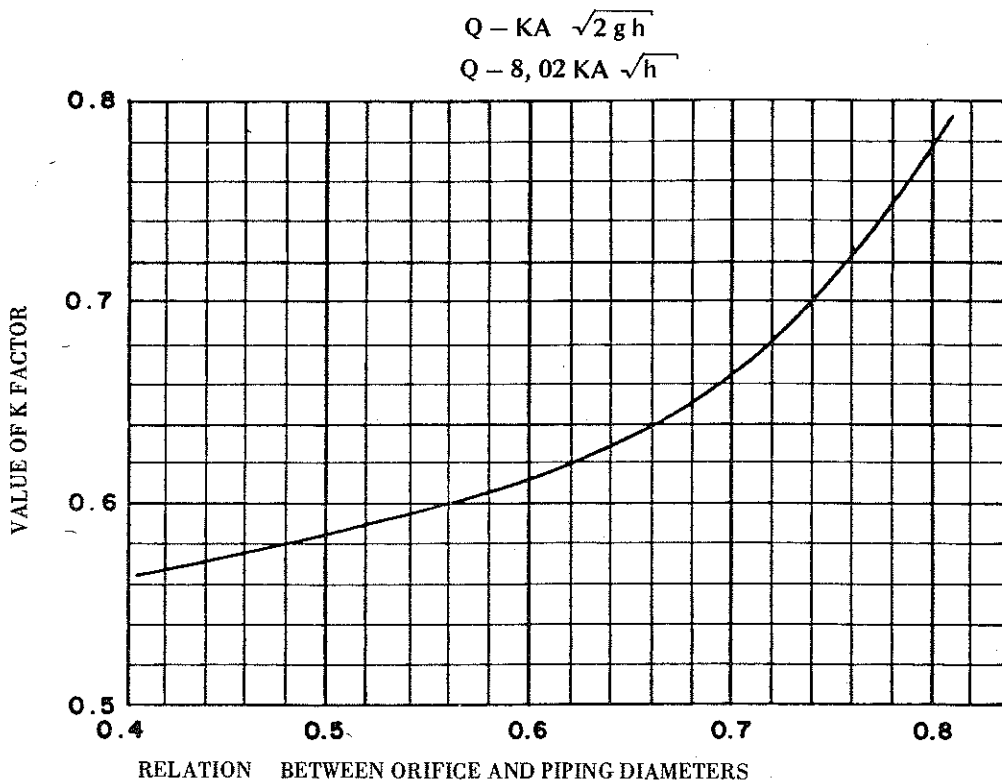


Figure 19 – Rugosity Factor (K)

1.1.7 Assessment of Underground Resources

The simplest method is to measure the amount of flow that falls during a given time period into a recipient set up for that purpose.

$$Q = \frac{\text{Volume}}{\text{Time}} \quad (1 - 8)$$

A slight variation is to weigh a given amount of liquid that fills a recipient in a pre-established time period.

$$Q = \frac{\text{Weight}}{\gamma \times \text{Time}} \quad (1 - 9)$$

where:

γ = Specific weight of the liquid.

Coordinates Method

The movement of the vein of liquid (Figure 20) is uniform horizontally and accelerated vertically. Combining the two movements, the following equation results:

$$V^2 = \frac{g}{2} \frac{x^2}{y} \quad (1 - 10)$$

where:

g = acceleration of gravity (9.81 m/sec²)

V = velocity of the outflow (m/sec)

A = area of the section of the pipe in the discharge (m²)

Taking the value of V from Equation (1 - 10):

$$V = 2.21 \frac{x}{\sqrt{y}} \quad (1 - 11)$$

Knowing the value of A , Q can be calculated by means of the continuity equation (1-3):

$$Q = V \times A = 2.21 A \frac{x}{y} \quad (1 - 12)$$

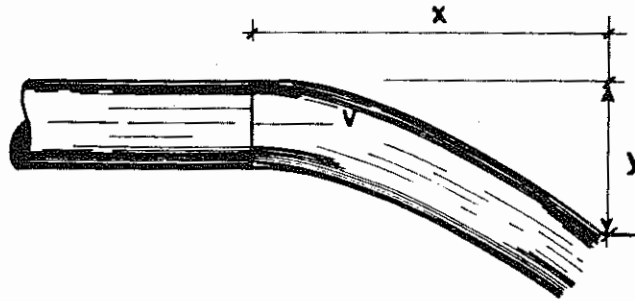


Figure 20 — Measurement of the Water Flow Q

1.2 BRIEF SUMMARY OF WELL CONSTRUCTION

1.2.1 Types of Wells

A water well is an opening, pit, shaft, or hole made in the earth in order to be able to take advantage of an underground water source.

Wells can be classified into five types, according to the construction methods used; they can be dug, bored, driven, wash bored, or drilled.

- a. Dug wells: when the excavation is done using picks, shovels, hoes, or digging equipment such as scoops or clamshell buckets.
- b. Bored wells: when the excavation is done by means of manual or mechanical drill bits.
- c. Driven wells: when the excavation is done by driving a pointed pipe (known as a wellpoint) into the earth, while casings are simultaneously added.
- d. Wash bored (jet drilled) wells: when the excavation is done using a high-pressure stream of water. In some regions of the Arctic, instead of a stream of water, vapor is used.
- e. Drilled wells: when the excavation is done using either percussion or rotary drills. The excavated material is extracted by means of a mud socket, bailer, sand pump, suction scoop, hollow bit, or hydraulic pressure.

1.2.1.1 Dug wells

These wells necessarily have to be shallow, and they are dug where the water table (phreatic level) is fairly close to the surface. The diameter ranges between 1 and 9 meters, and depths of between 3 and 12 meters are common.

Their main advantage is that they can be built with hand tools. Moreover, their large diameter provides a reasonably large reservoir within the well itself.

However, dug wells are exposed to contamination from the infiltration of surface material blown by the wind and from trash that falls inside them. They have a limited yield due to the fact that they usually do not enter the aquifer sand to an appreciable depth.

Dug wells are commonly built in circular form, using a pick and shovel. A casing is placed in the excavation before there is any danger of cave-ins because of the depth of the open hole.

Figures 21, 22, and 23 present details of the characteristics of dug wells.

1.2.1.2 Bored wells

Drilling begins by forcing the drill bit into the ground while the tool rotates. The bit will open a path in the earth at an average speed determined by the hardness of the soil.

Once the space within the drill lands is filled with material, the bit is removed from the hole and emptied. This operation is repeated until reaching the desired depth.

When building bored wells, one can run into small rocks or stones that impede penetration. If this occurs, the cutting bit is removed and a spiral bit is substituted; this tool is lowered into the hole and turned clockwise. The spiral portion will work its way into the rock so that it can be lifted to the surface.

Figure 24 illustrates different types of bits.

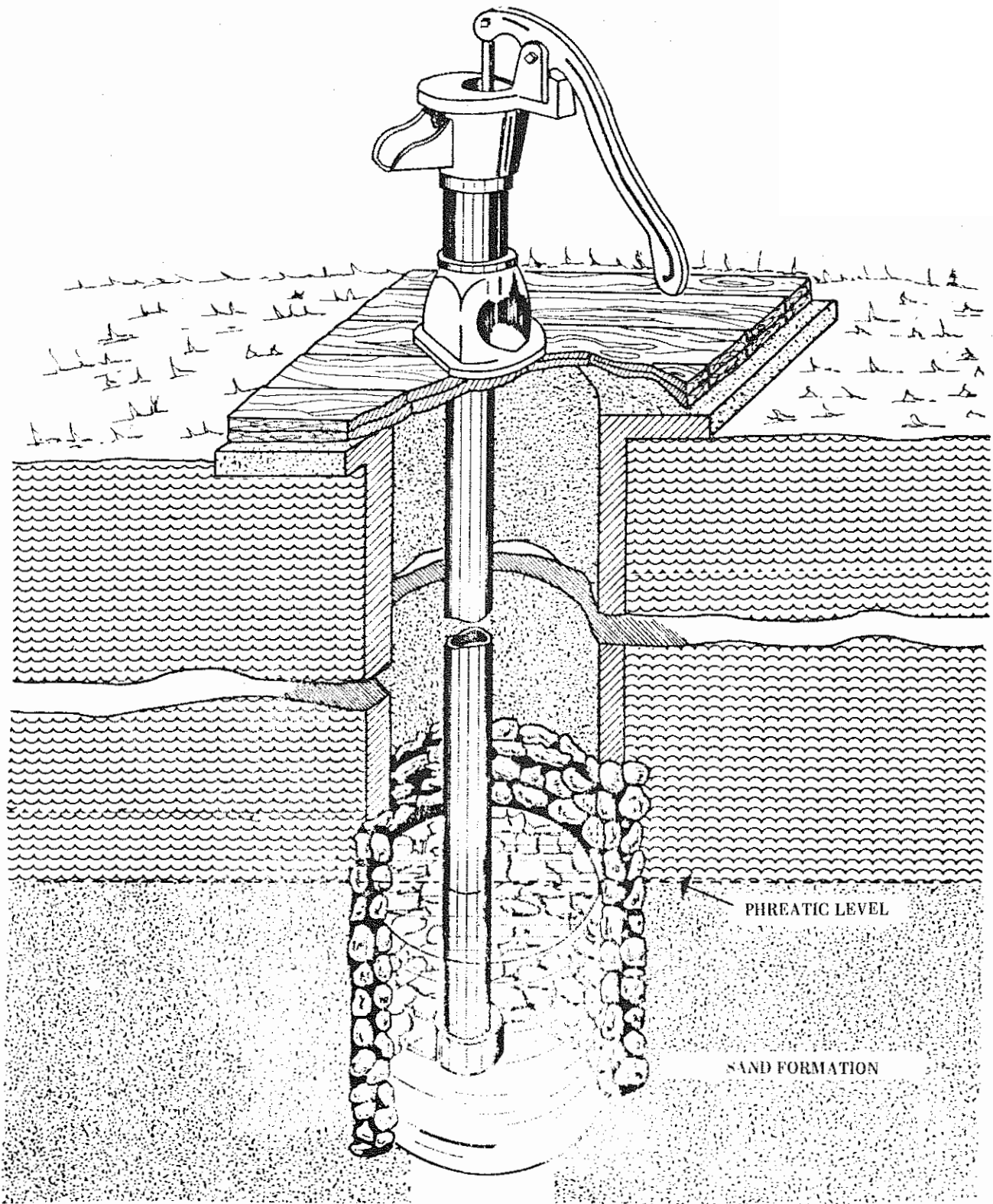
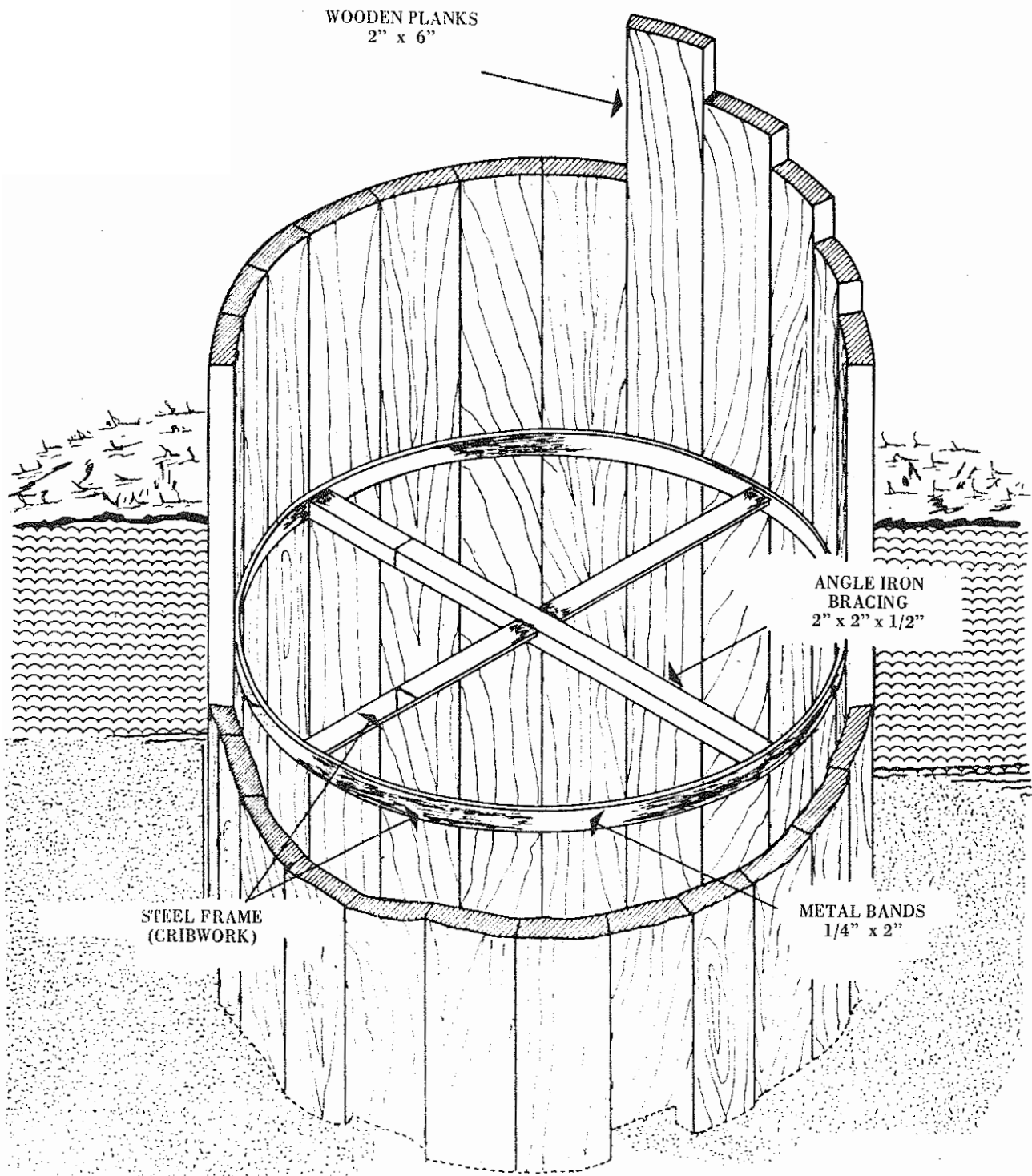


Figure 21 — Typical Dug Well, with a Suction Pump



NOTE: CRIBWORK PLACED 5 FEET AWAY FROM
NORMAL LAND FORMATIONS

Figure 22 — Dug Well, Lined with Wood

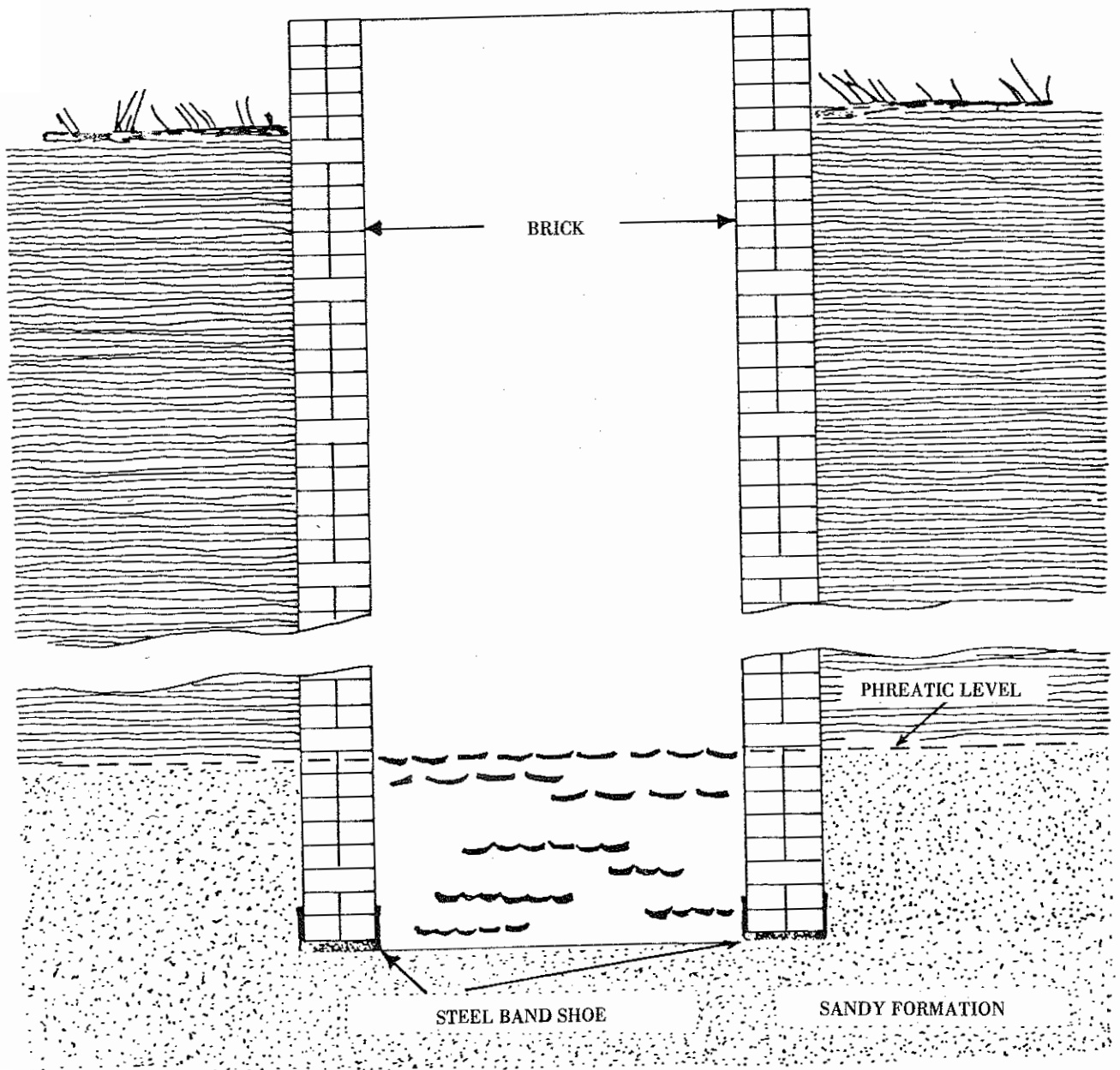
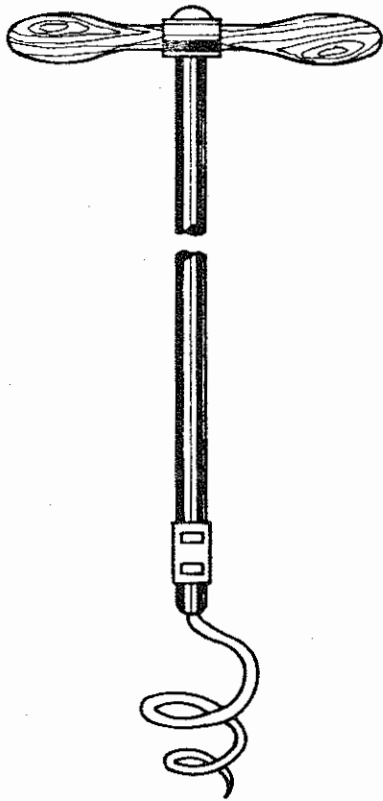
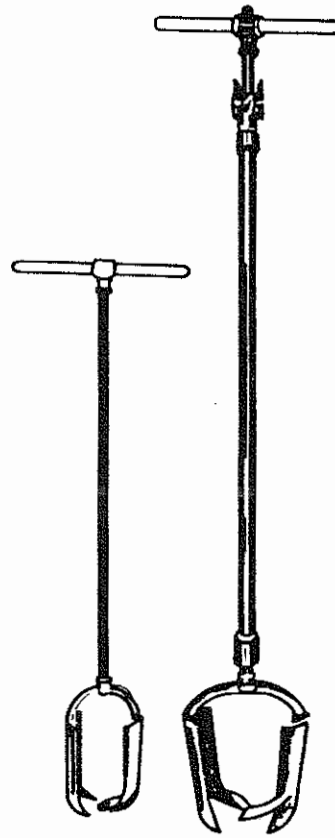


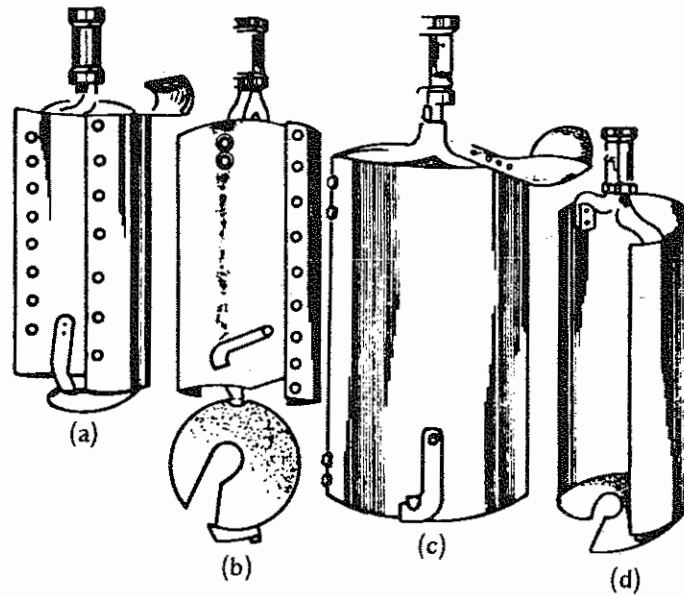
Figure 23 – Cross-section of a Dug Well with a Brick Casing



SHEEPSKIN
SPIRAL BIT



HAND BITS



- (a) Bit with non-adjustable reamer
- (b) Bit with open bottom for emptying
- (c) Bit with adjustable reamer
- (d) Bit with half shank

Figure 24 — Bits for Well Drilling

1.2.1.3 Driven Wells

The driven wells, or small-diameter percussion wells, are built by driving into the ground a wellpoint which is attached to the lower end of firmly-connected casing sections (Figure 25).

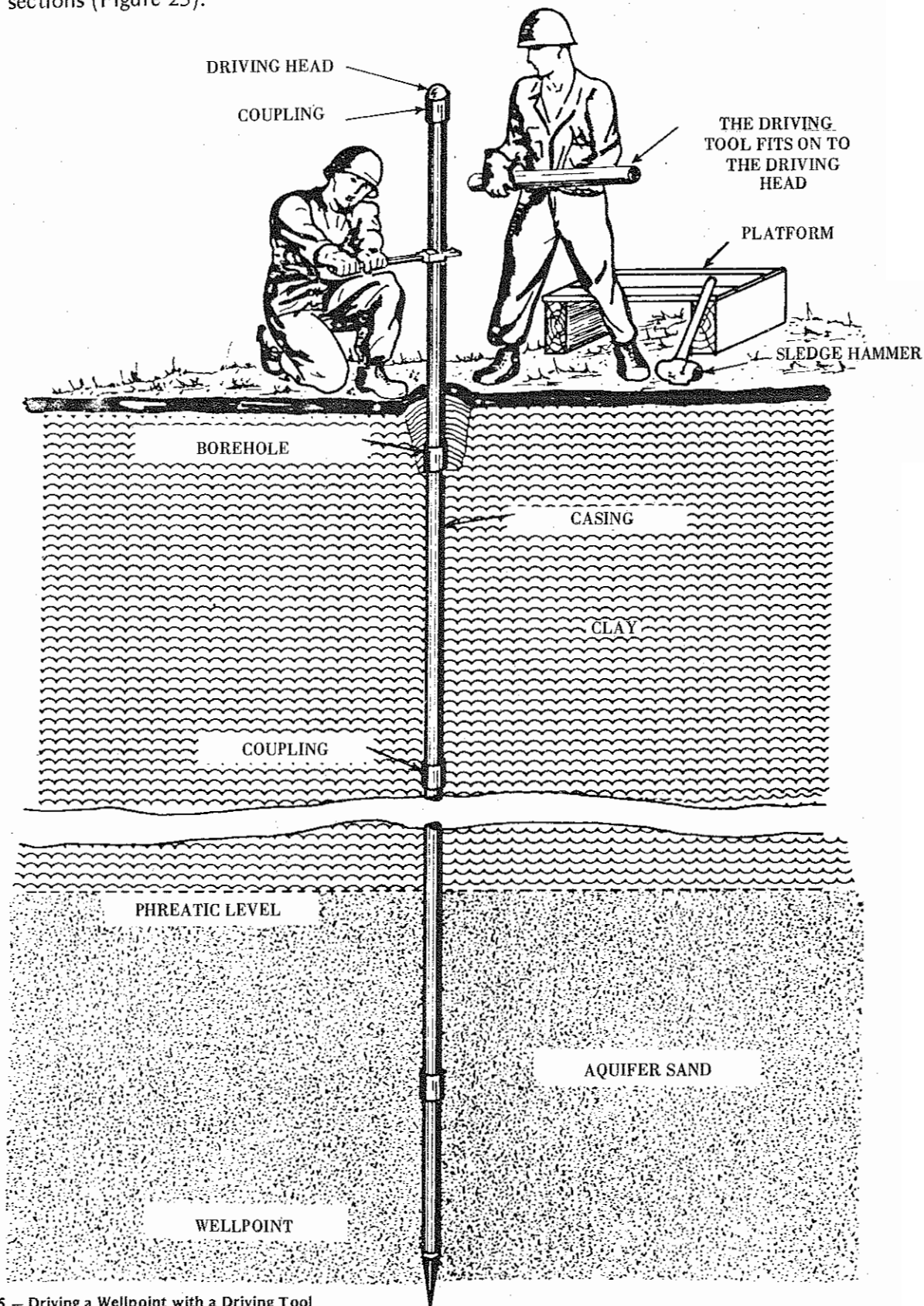


Figure 25 – Driving a Wellpoint with a Driving Tool

The wellpoint shown in Figure 26 consists of a casing inserted with a steel tip in its lower end to open a path through gravel beds or fine layers of hard material. The wellpoint should be introduced fairly deep so that it will penetrate the aquifer formation below the water table. For shallow wells, this should not exceed a depth of 25 feet.

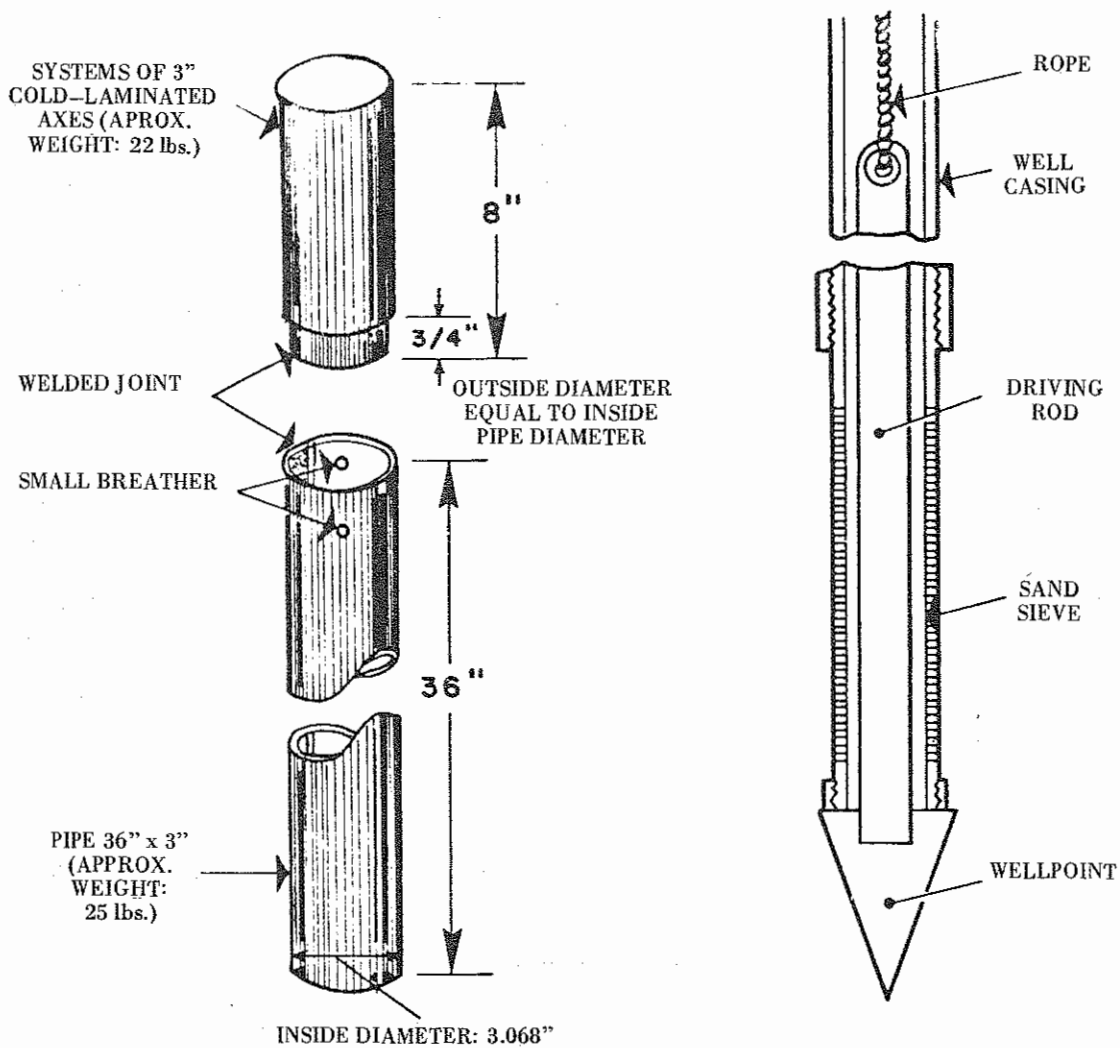
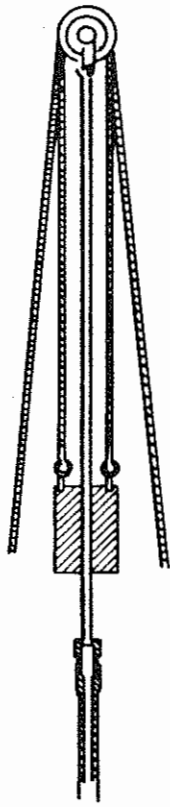
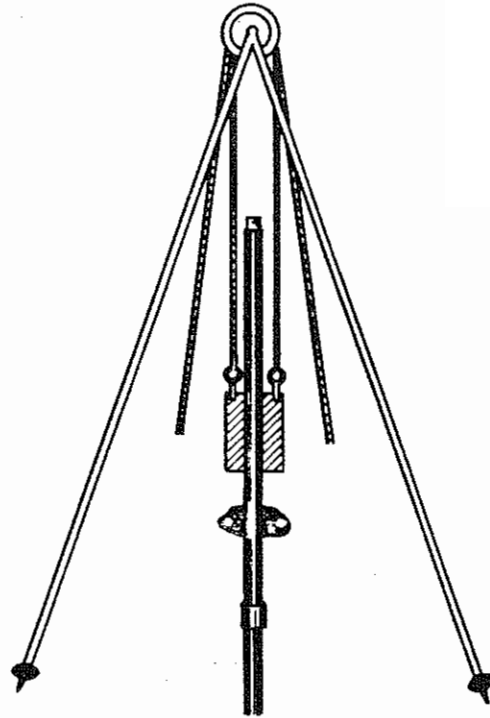


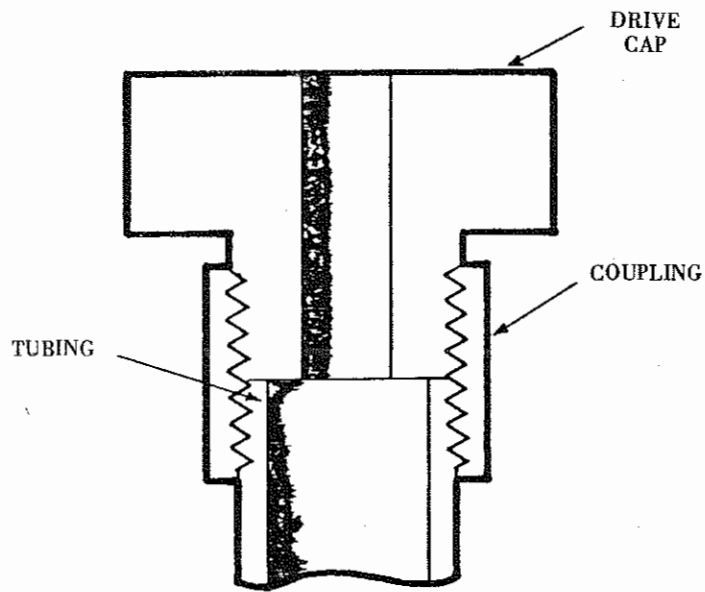
Figure 26 — Driving Tools



WEIGHT AND PULLEY



TRIPOD



DRIVE CAP CROSS SECTION

Figure 27 — Placement of the Drop Hammer

Generally, casing sections 5 to 6 feet long are used to form the system of pipes that will serve as the casing for the completed well. The driven wells usually have a diameter of between 1 1/4 and 2 inches; but larger wells, with diameters of up to 4 inches, can also be built.

The small –diameter casings required for these wells are light and easy to carry and place by hand. The largest casing used in these wells, even though it is heavier and more difficult to drive, has the advantage that it permits the pumps for deep wells to be installed in the casing, at a depth of 25 feet or more below the earth's surface.

The principal use of driven wells for supplying water is the construction of emergency wells where the water table is close to the earth's surface. If it is necessary to pump with a type of pump that collects water in buckets or with a centrifugal pump (used in shallow wells), the level of the pumped water should not exceed 25 feet.

Driven wells generally begin in a hole drilled with a hand drill. The diameter of the hole should be a little larger than that of the wellpoint and the hole should not be very deep, only as far down as a drill bit can work.

Figure 28 illustrates a driven well already outfitted for the production of water by means of a suction pump.

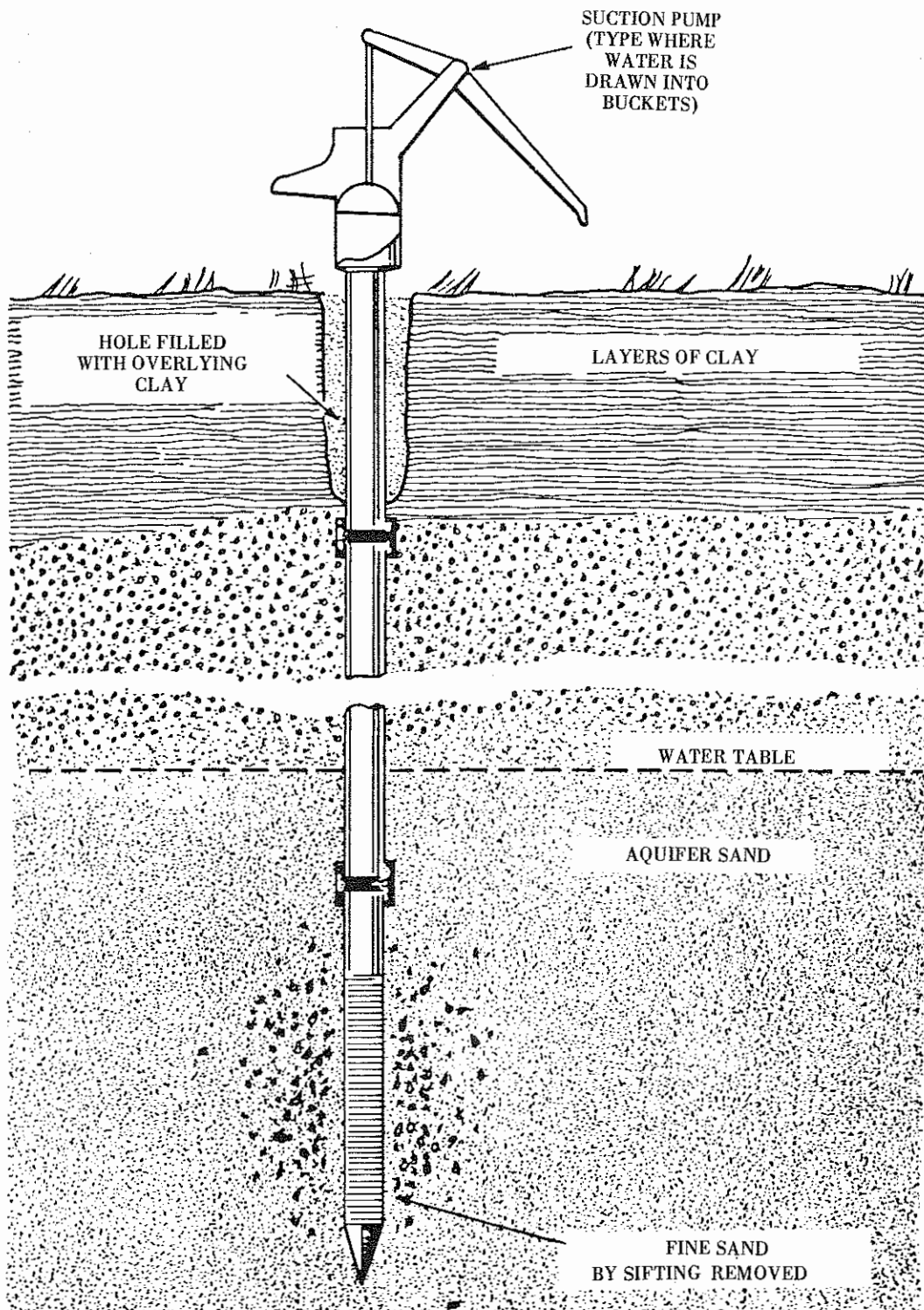


Figure 28 -- Driven Well Equipped with a Suction Pump

1.2.1.4 Wells Drilled with Streams of Water

1.2.1.4.1 Description

The construction method used for jet drilling (wash boring) consists of making a hole in the earth using the force of a high-pressure stream of water. This stream loosens the material that it hits and carries the finest particles up and out of the hole.

This method of well construction is particularly useful in sandy areas where the water table is close to the surface. It is a simple and reliable method that can be carried out entirely with hand tools, and its success does not depend on bulky drilling equipment which is difficult to transport.

In general, two construction techniques can be used: a casing can be buried by the stream of water or a self-sorted wellpoint can be inserted. In addition, the drilling can be used to analyze the general nature of a formation through the examination of the cuts (chips) of residues brought to the surface by the return stream.

1.2.1.4.2 Drilling Equipment for Wash Boring

The equipment that is essential to wash boring includes a hoist, a stream pump with a hose, a hydraulic rotary arrangement, an adequate supply of drilling fluids, a driving weight, and a set of tools for heavy casings.

a. Hoist: this refers to a winch used to handle the drilling casings. Equipment operated by hand can be used, as in the case of a tripod with a lead block. If available, it is convenient to use percussion-type drilling equipment with a mechanical hoist.

b. Pump: it is appropriate to use a pump with an adequate hose connection and capable of extracting 50–100 gallons of water per minute at a pressure of 50 pounds per square inch. The amount of water required to excavate a well using a stream of water will vary according to the type of sediment that is being penetrated.

Sandy areas require much more water and high pressure is necessary, but a nozzle pressure of 40 lbs. per square inch is suitable in most cases.

Clay and compacted clay require less water, but they do not loosen easily unless a small stream of high-pressure water penetrates them. With small nozzles located in the bit, it is possible to attain a pressure of up to 200 pounds.

c. Swivel joint: The hydraulic swivel joint must be able to withstand the weight of the drilling rod and resist the maximum pressure discharged by the pump.

d. Drilling fluids: Water is commonly used when wells are jet drilled; however, a stream of heavier, more viscous fluids can be prepared by mixing clay or a commercial

bentonite with the water. This thick fluid tends to seal the wall of the well and avoid the loss of water within the formation being penetrated. In addition, the stream of fluid is conducted from the hole to a bed of sedimentation where the drill chips or cuttings (the material removed from the hole) settle to the bottom. The jet drilling pump can recover the fluid and have it circulate again.

Figures 29 and 30 illustrate the equipment needed for jet drilling and a typical jet-drilled well, respectively.

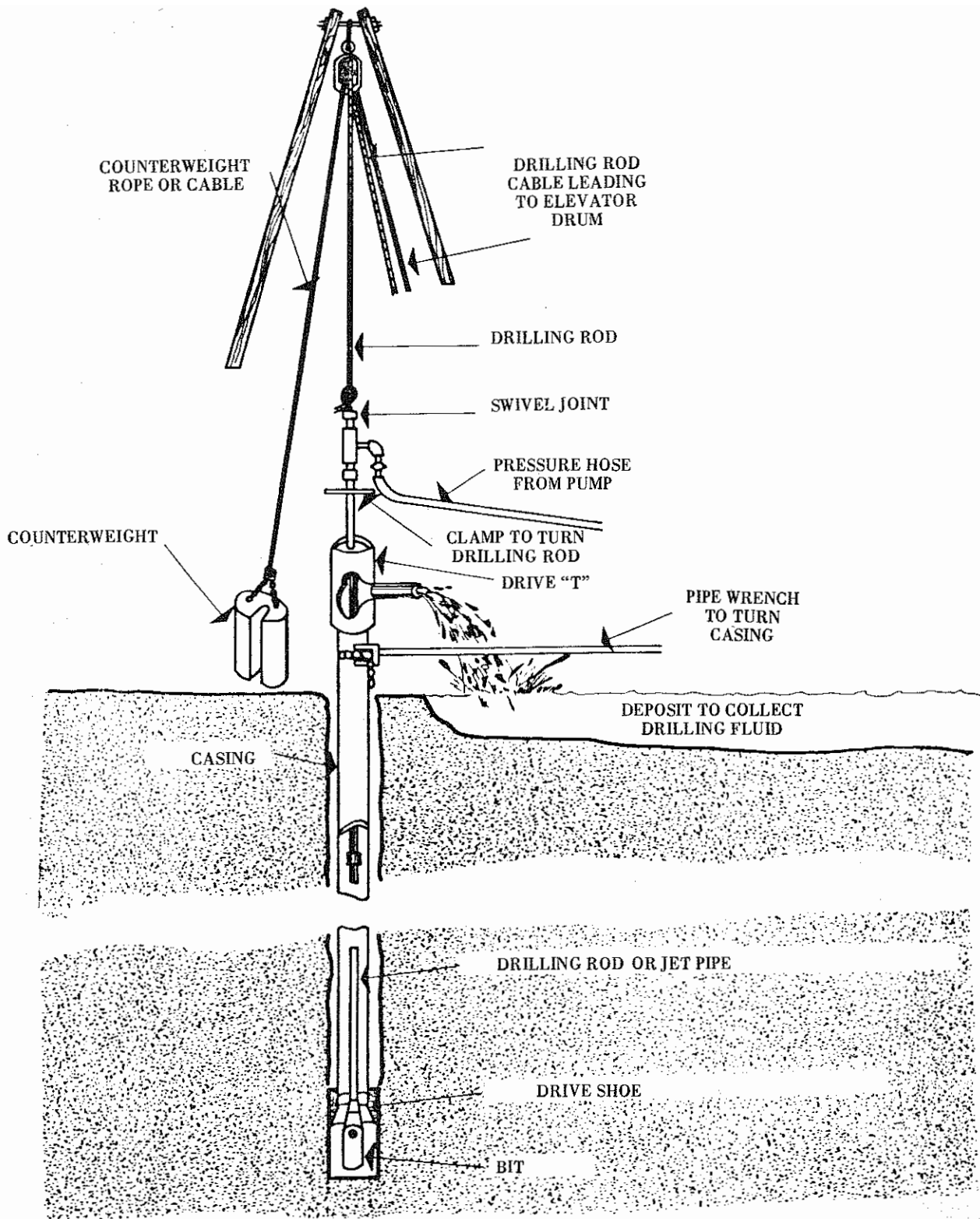


FIGURE 29.- Simple Jet Drilling Equipment

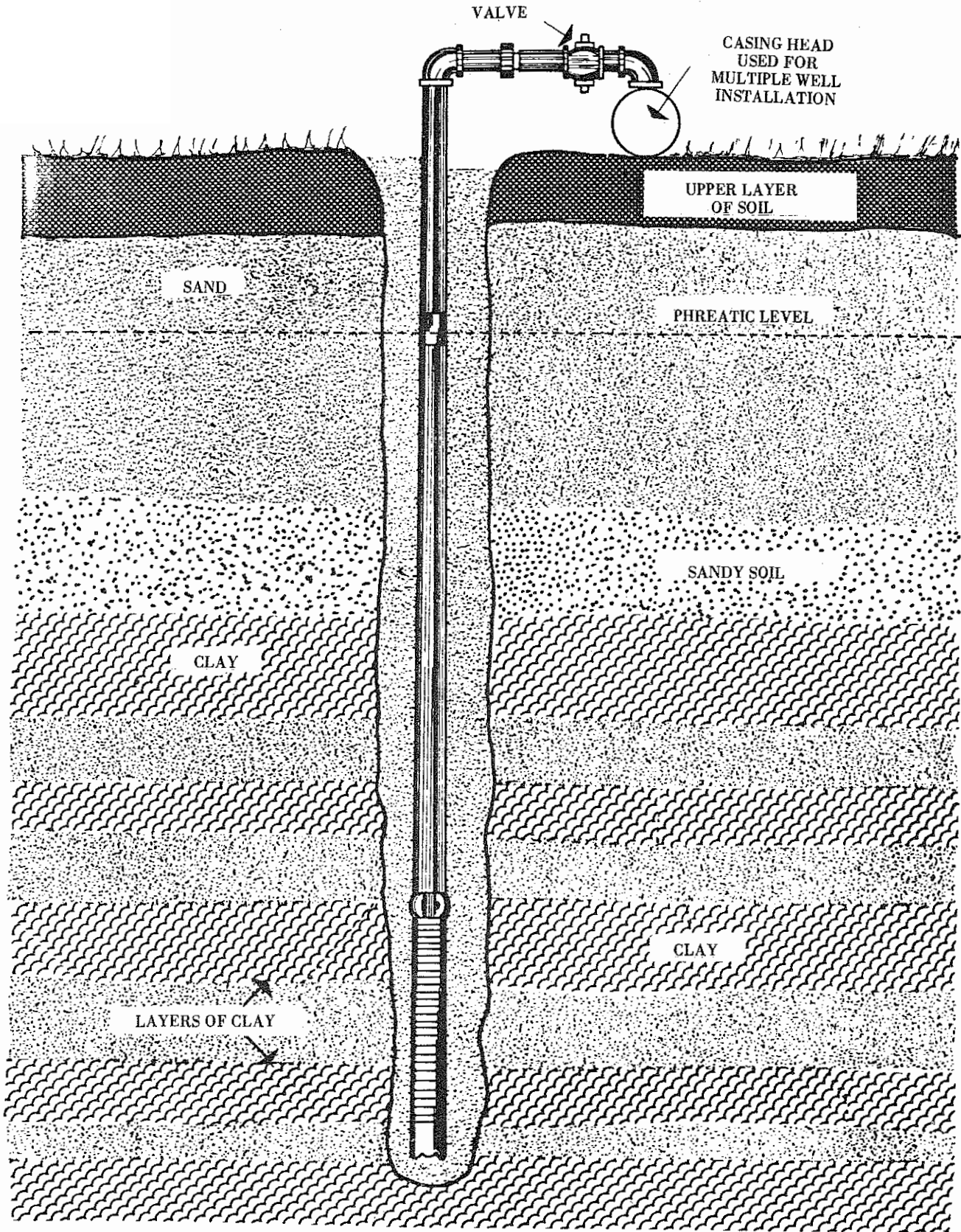


FIGURE 30.- Cross-section of a Jed-drilled Well

1.2.1.5 Drilled Wells

In drilling wells for water production, basically the same equipment and materials that are needed for oil well drilling are used.

The literature on oil well drilling is quite extensive and, therefore, we feel that a more in-depth analysis is not required here. We will only illustrate the two systems of fluid circulation that can be used:

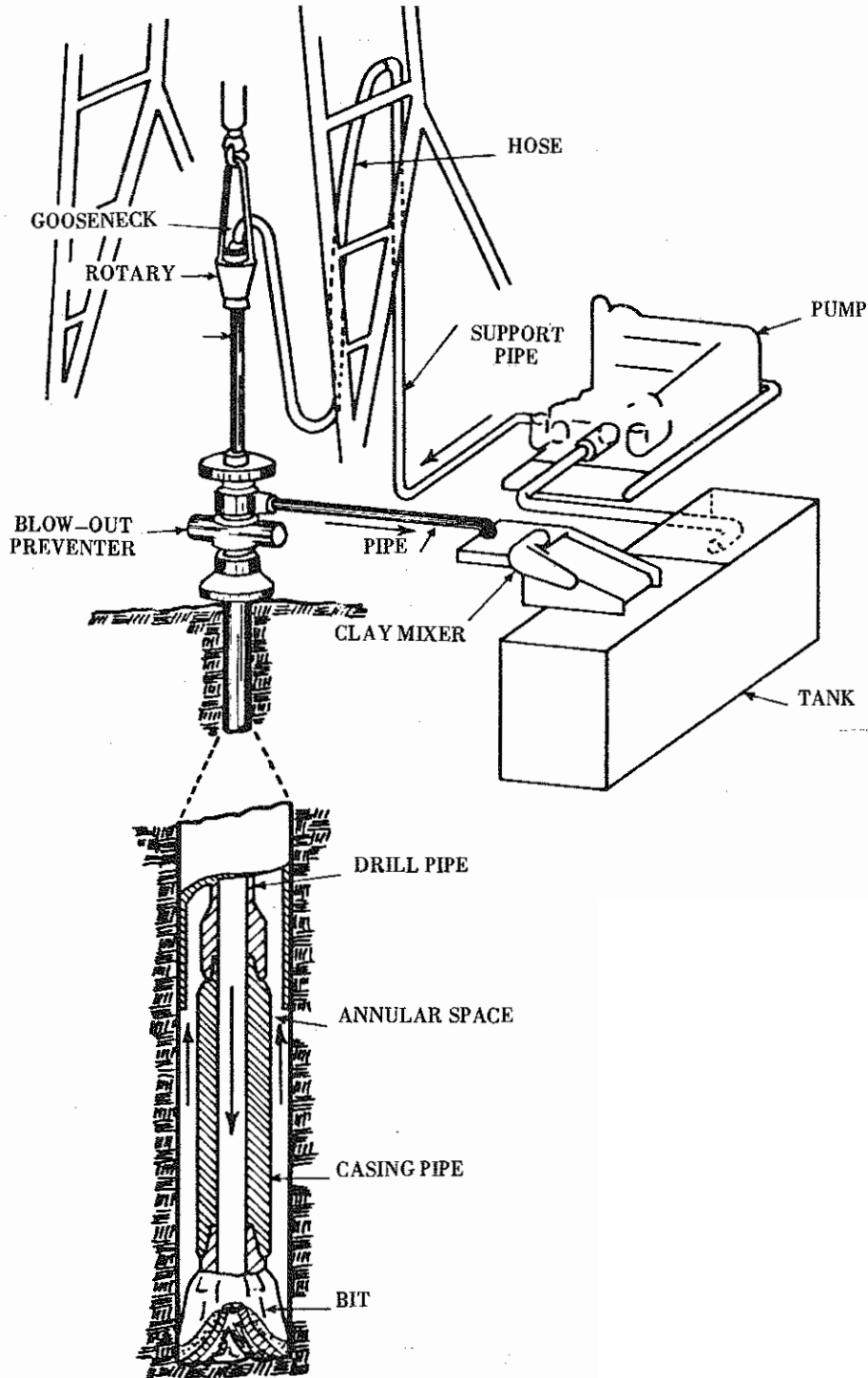


Figure 31 — Direct Circulation System

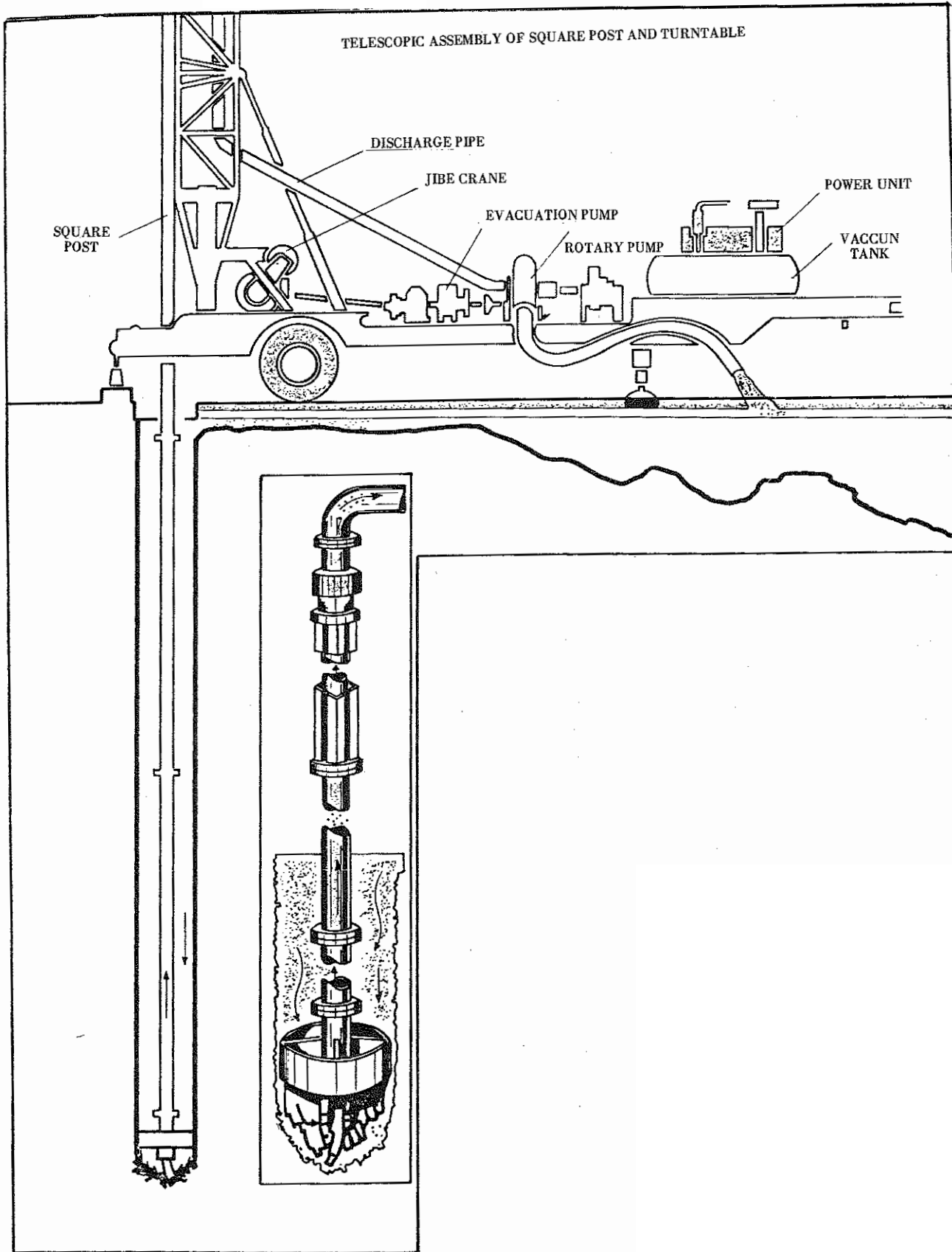


Figure 32 — Reverse Circulation System

1.3 AQUIFER BEHAVIOR

To extract groundwater artificially, vertical wells in any of their variations (dug, bored, driven, excavated, drilled) or horizontal collectors can be used. In the former, the grid area in contact with the aquifer is limited because of its vertical position. In the case of horizontal collectors, the area of contact can be somewhat larger, with the casings drilled where the water enters in a horizontal position.

In drilling a well in a valley, the water within the well will reach either the level of the water table, if the perforated aquifer is a free aquifer (Figure 33a), or a level given by the piezometric level of the point corresponding to the aquifer that it is desired to exploit (Figure 33b).

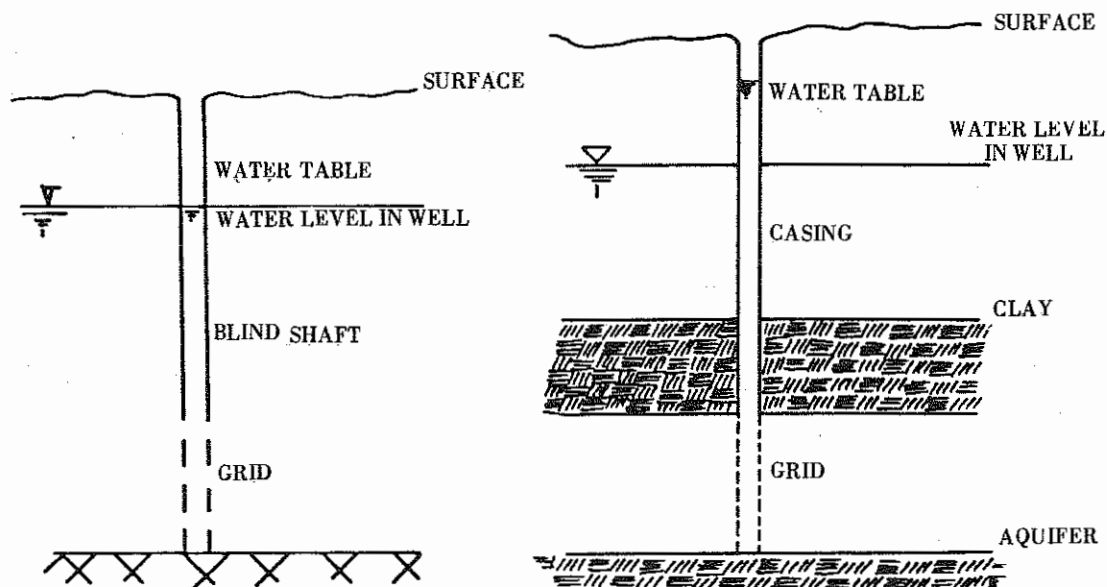


Figure 33 – Static Level of Water in the Well in Two Examples of Aquifers

If we artificially lower the well's static level (by using pumping equipment to extract a water flow Q), a disequilibrium is established between this point and the other points of the aquifer, which remain at a higher piezometric level. Water thus begins to flow from all directions of the formation towards the well, in a radial and generally symmetrical manner, as illustrated in Figure 34.

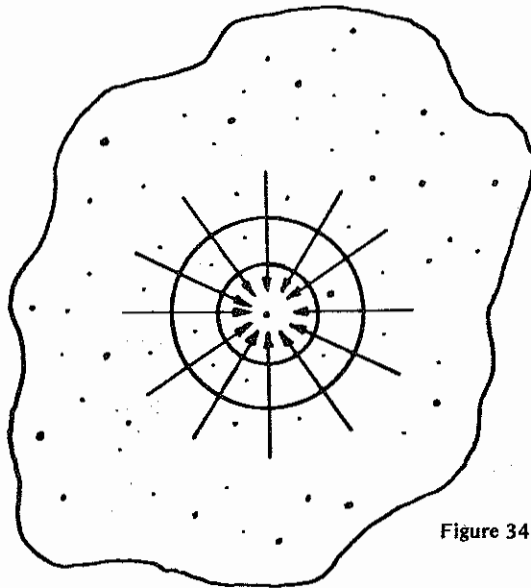


Figure 34 — Water Flow in a Production Well

The drawdown that is produced in the well is as large as possible and diminishes as distance increases (Figure 35). With time, the volume of water that is extracted from the aquifer is ($Q_0 \cdot t$), which means that little by little the area affected by the drawdown increases until an equilibrium is reached.

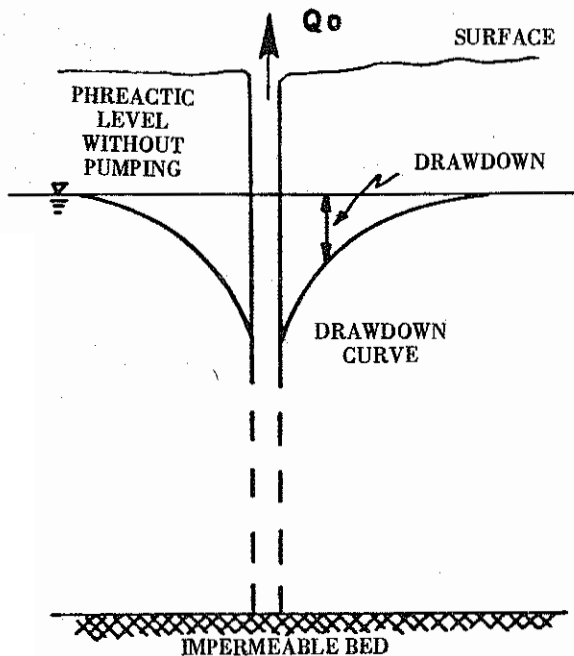


Figure 35 — Classification Diagram for Irrigation Water

The equation for the drawdown curve is as follows:

$$S = \frac{Q_0}{4\pi t} W(u) \quad (1-13)$$

where u is a function of time t : (1-14)

and where:

- s = drawdown observed at a given point (m)
- Q_0 = water extracted from the well (m^3/day)
- T, S = properties of aquifer material
- r = distance from the well in which the drawdown is observed (m)
- t = time from which pumping is started (days)
- $W(u)$ = logarithmic integral

$$W(u) \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy = \ln \frac{0.56146}{u} + u - \frac{U^2}{2 \times 2!} + \frac{U^3}{3 \times 3!} - \frac{U^4}{4 \times 4!} + \dots$$

1.4 NEEDS AND QUALITIES OF WATER

1.4.1 Water Quality Criteria

The criteria for water quality depend directly on the use that it will be given. Many of the physical, chemical, and bacteriological characteristics required for a given use are adopted for general purposes.

Thus, for example, it is generally accepted that in a public water supply for domestic and industrial use, water should have an acceptable taste and a reasonable temperature; and it should be neither corrosive nor incrustating, but clean, free of minerals that produce undesirable biological effects and lacking in pathogenic organisms (pathogens).

Different terms are used to describe water quality, and it is useful to clarify their individual meanings in order to avoid confusions.

“Pollution” is a broad term referring to the introduction of undesirable conditions into water, making it offensive in terms of taste or smell and unsatisfactory for domestic and industrial uses. One specific type of pollution would be contamination, which implies the introduction into the water of toxic materials, bacteria, or other harmful substances that would make this source completely unfit for consumption.

The limitations imposed on the water quality standards by many of its constituents are based on a knowledge of their properties and effects or, in some cases, simply on limitations imposed by economic conditions and experience.

Aluminum: from the point of view of public health, this mineral does not represent any problem.

Borum: in small amounts, this element is of great importance for plant life; but above 30 mg/lt, it has physiological effects.

Arsenic: this is notably toxic for human beings. The ingestion of 100 mg. results in severe poisoning and 130 mg. have been proven to be fatal. Its effect is cumulative, and its elimination overly slow.

Calcium: the content of this mineral is always below that required by human nutrition (0.7-1.0 grams per day).

OH: caustic alkalinity exists in waters softened with lime—soda; in water with more than 50—100 mg/lt, an acrid taste is found. To avoid overtreatment, it is recommended that the following condition be fulfilled:

$$\text{Alkalinity} < \text{Hardness} + 35$$

For chemically—treated water:

$$(\text{alkalinity at phenolphthaleine}) < \text{Total alkalinity} \times 0.4 + 15$$

Chlorides: amounts less than 250 mg/lt. are recommended. Depending on individual sensitivity, some people detect a salty taste with lower concentrations, while others do not.

Chlorine: information is not clear or definitive. The limit should be evaluated in accordance with the specific economic and environmental conditions of each site.

Chromium: although trivalent chromium is not offensive, the hexavalent chromium salts are irritating. The adopted limit is 0.05 mg/lt.

Copper: physiological effects present themselves when consumption exceeds 100 mg/day.

The effects are not serious: irritation of the intestinal tract, nausea and vomiting.

To avoid undesirable metallic tastes and astringent effects, the maximum amount is 3.0 mg/lt.

Flouride: to provide additional protection against dental cavities, 0.6 -1.5 mg/lit. are the recommended values; larger doses can cause dental fluorosis and other undesirable effects, even death.

Iodine: to avoid goiters, water can be iodized with a dosis of 0.1 mg of iodine/person/day. The most economical method, however, is iodized salt.

Iron: iron plus manganese \leq 0.3 mg/lit.

The limit is given by considerations such as the appearance of a red color and the staining characteristics.

Lead: This is not found in natural water unless it has been introduced through contamination by lead arsenate and other salts.

The United States Public Health Service has established a limit of 0.1 mg/lit; however, in Holland, 0.3 mg/lit. are considered acceptable. The poisoning effect of lead is cumulative; and although no cases have been reported, this should be kept in mind.

Magnesium: this is subject to a maximum concentration of 125 mg/lit due to its laxative effect. Nevertheless, there do exist organisms that can resist high doses without suffering such effects.

Manganese: iron plus manganese \leq 0.3 mg/lit.

This standard is based on the staining characteristics of this kind of water and the fact that manganese is a nutrient for species of undesirable organisms in filters and distribution systems.

Nitrates: in addition to serving as indicators of the sanitary quality of water, a maximum level of 40 mg/lit or 10 mg/lit $\text{NO}_3\text{-N}$ is recommended; since above that value, cases of methemoglobinemia can present themselves among the infant population.

Phenol: this is present in natural water as the result of pollution with industrial residues. When chlorine is applied to such water to disinfect it, problems with undesirable odors and tastes present themselves. For that reason, the maximum permissible concentration is 0.001 mg/lit.

Phosphates: these are important nutrients for micro-organisms and therefore they stimulate undesirable growth.

Radium: studies undertaken in the United States indicate that 2810 gallons of

the water having the greatest existing radium concentration would have to be consumed per day , per person, in order to equal the minimal medicinal dosis.

Therefore, it is not an important factor in the quality of water for human consumption.

Selenium: to avoid toxic effects, the limit is 0.05 mg/lit.

Silver: this element is not abundant in natural water; and even in concentrations of 0.2 mg/lit., it has no harmful effects for human consumption.

Sodium: the permissible percentage is determined according to the following formula:

$$\text{o/oNa} = \frac{(\text{Na} + \text{K})}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \times 100 \quad (1 - 15)$$

in which the concentrations are expressed in milligram equivalents. This is an important value in water used for agriculture since the maintenance of soil permeability depends on it. In general, a maximum value of 60 o/o is recommended.

Sulfates: generally, the sulfate ion is associated with cations having a laxative effect; for this reason, a limit of 250 mg/lit is recommended.

Tin: it has not been demonstrated that this mineral can have harmful effects.

Total solids:the standards recommend a limit of 500 mg/lit. while in regions with highly—mineralized water, values of up to 1000 mg/lit are acceptable. The standard is based on the conditions of adaptability to the water supply to avoid the physiological effects noted in consumers not accustomed to water with a high mineral content.

Zinc: the standards recommend a limit of 15 mg/lit, but for reasons of taste, not because of any physiological effects.

Mercury: the United States Public Health Service has tentatively proposed a limit of 0.005 mg/lit. of mercury in water for human consumption. The reasons for establishing such a low standard arise from the serious risk involved for human health in the ingestion of larger amounts, or in the chronic ingestion of organic and inorganic mercury.

There are clinical studies that demonstrate irreversible effects on the liver, kidneys, and central nervous system caused by the ingestion of small amounts of mercury. It should be noted that the same standard has been adopted in the Soviet Union.

1.4.2.1 Water Quality Standards for Human Consumption

The standards for the quality of water destined to human consumption which are listed below are those adopted by the United States Public Health Service in 1962.

Physical Characteristics: the turbidity of the water should not exceed 5 units (silica scale); the color, 15 units (platinum-cobalt scale). The water should not have an objectionable odor or taste.

Chemical Characteristics: The water should not contain impurities in concentrations that could imply health hazards for the consumers. It should not be excessively corrosive. Nor should it contain excessive amounts of any of the chemical substances used in its treatment. Any substance that can have harmful physiological effects or whose effects are as yet unknown should not be introduced into the water system if their inclusion could eventually affect the consumer.

Table 4 shows the chemical substances that should not be present in a water supply in amounts larger than those specified.

TABLE 4
CHEMICAL SUBSTANCES THAT CAN BE NOXIOUS WHEN FOUND IN EXCESSIVE AMOUNTS IN A WATER SUPPLY

Substance	Maximum Permissible Concentration mg/lt
Alkylbenzene sulfonate (ABS)	0.5
Arsenic (As)	0.01
Chlorides (Cl)	250
Copper (Cu)	1
Chloroform extract (CCE)	0.2
Cyanide (CN)	0.01
Iron (Fe)	0.3
Manganese (Mn)	0.05
Nitrates (NO ₃)	45
Phenols	0.001
Sulfates (SO ₄)	250
Total dissolved solids	500
Zinc	5

Table 5 presents the chemical substances that, in excess of the amounts indicated, are cause for the water supply to be rejected.

TABLE 5
CHEMICAL SUBSTANCES AN EXCESS OF WHICH IS REASON
FOR REJECTING A WATER SUPPLY

Substance	Concentration in mg/lt
Arsenic (As)	0.05
Barium (Ba)	1.0
Cadmium (Cd)	0.-1
Chromium (Cr ⁶⁺)	0.05
Cyanide (CN)	0.2
Lead (Pb)	0.05
Selenium (Se)	0.01
Silver (Ag)	0.05

The average fluoride concentration should be maintained within the upper and lower limits given in Table 6. The presence of flourides in concentrations greater than twice the optimum value constitutes cause for the water supply to be considered unfit.

TABLE 6

Average annual maximum daily ambient temperature (°C)*			Recommended control limits Fluoride concentrations in mg/lt		
			Lower	Optimal	Upper
10.0	—	12.0	0.9	1.2	1.7
12.1	—	14.6	0.8	1.1	1.5
14.7	—	17.6	0.8	1.0	1.3
17.7	—	21.4	0.7	0.9	1.2
21.5	—	26.5	0.7	0.8	1.0
26.6	—	32.5	0.6	0.7	0.8

* Based on temperature data obtained for a minimum of 5 years.

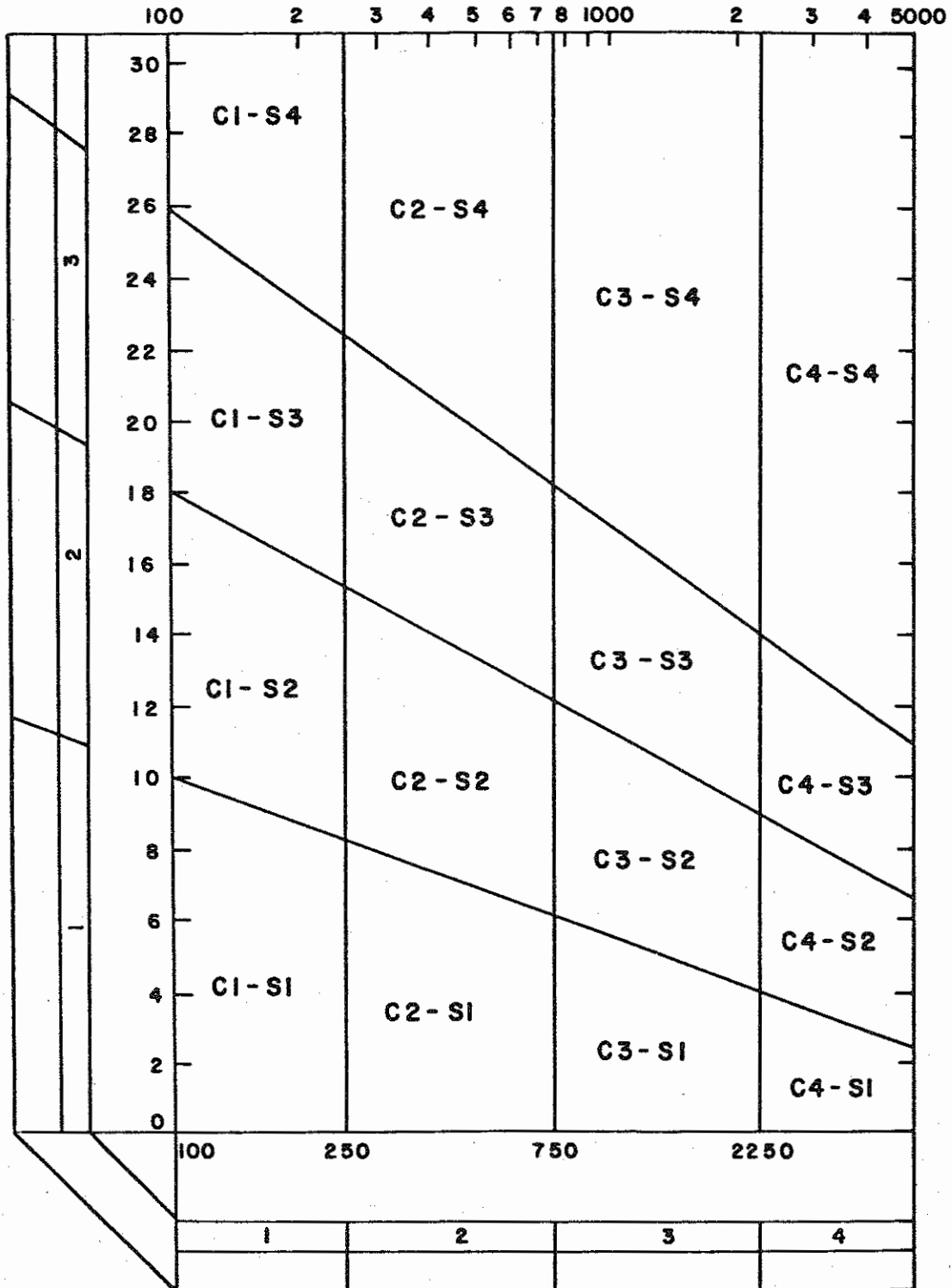


Figure 36 — Classification of Irrigation Water Quality

1.4.2.2 Water Quality Standards for Agricultural Use

Most of the water used for agricultural purposes is constituted by irrigation water, whose quality is mainly influenced by the following characteristics:

- a) Total concentration of soluble salts.
- b) Relative proportion of sodium as opposed to other cations.
- c) Concentration of boron and other elements that can be toxic.
- d) In some cases, the relation between the concentration of bicarbonates and water hardness.

The United States Department of Agriculture used to express the concentration of soluble salts in meq/lit (milliequivalents per liter) and the total of soluble salts in terms of water conductivity, in microhms/cm. According to the same Department of Agriculture, at 25°C the ratio of dissolved solids in mg/lit to the conductivity in microhms/cm is 0.64. Experience has shown, however, that this ratio can average as low as 0.55 and as high as 0.9.

In accordance with Manual No. 60 of the United States Department of Agriculture, water having a conductivity of less than 75 microhms per centimeter is satisfactory for irrigation purposes in terms of its total salt content. Nevertheless, some crops that are sensitive to the total salt content can be affected adversely by said waters if the drainage and percolation conditions of the soil are not appropriate.

Water in the range of 750 to 2250 microhms per centimeter is widely used with satisfactory results for growing crops when there is good drainage and well-administered irrigation. However, saline conditions can develop if drainage and percolation are inadequate.

If the sodium content in irrigation water is high compared to the calcium and magnesium contents, the sodium is absorbed by the soil, replacing the calcium and magnesium. Since the interchangeable sodium content is thereby increased, the ground becomes more sodium-laden and adverse physical and chemical conditions are created, thus limiting or impeding plant growth.

The sodium soils are therefore characterized by an excess of interchangeable sodium and by low permeability. The recovery of a sodium soil entails the replacement of the interchangeable sodium by calcium or magnesium and the removal of sodium by percolation. The replacement is commonly accomplished by adding lime to the soil or water.

The danger of water sodification, or the sodium index, is measured by the sodium

absorption ratio (SAR), expressed by the following formula:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) / 2}} \quad (1 - 16)$$

where Na^+ , Ca^{++} and Mg^{++} represent the concentrations of their respective ions in milliequivalents per liter. For irrigation purposes, water having an SAR up to and including 26 can be used if the mineral content is low; but if the mineral content is high, the SAR value should be less than 10.

Figure 36 contains the classification of irrigation water based on salinity and the sodium adsorption ratio, taken from Manual No. 60 of the United States Department of Agriculture. In said classification, water is divided into four types, on the basis of its conductivity, with the dividing points being the values 250, 750, and 2250 microhms/cm. Likewise, water is divided into four types according to the sodium adsorption ratio.

The following comments about the different types are taken from Manual No. 60 of the United States Department of Agriculture.

a. Types of Conductivity

Low-saline water (C1): can be used to irrigate most crops in almost any kind of soil, with little likelihood of salinity development. Some washing is needed, but this can be accomplished under normal irrigation conditions— except in soils having a very low permeability.

Medium-saline water (C2): can be used as long as there is a moderate degree of washing. Plants that are moderately tolerant of salts can be cultivated in almost all cases, and without need for special salinity control practices.

Highly-saline water (C3): cannot be used in soils with deficient drainage. Even with adequate drainage, special salinity control practices may be necessary, requiring the selection of only those plant species which are very tolerant of salts.

Very highly-saline water (C4): is not appropriate for irrigation purposes under ordinary conditions but can be used occasionally in very special circumstances. The soils must be permeable, drainage adequate and an excess of water must be applied in order to have a good wash; in this case, species very tolerant of salts should be selected.

b. Types according to sodium content

Low-sodium water (S1): can be used to irrigate most soils with little likelihood that dangerous levels of interchangeable sodium will be reached. Nevertheless, the crops that are sensitive, as in the cases of fruits and avocados, can accumulate harmful amounts of sodium.

Medium-sodium water (S2): in soils having a fine texture, sodium represents a considerable danger, and even more so when those soils have a high capacity for exchanging cations— especially under conditions of deficient wash, unless the soil contains gypsum.

This type of water can only be used in soils with a coarse texture or in organic soils having good permeability.

High-sodium water (S3): can produce toxic levels of interchangeable sodium in most soils, so that this requires special handling practices — good drainage, easy wash, and the addition of organic material. The soils rich in gypsum may not develop harmful levels of interchangeable sodium when they are irrigated with this type of water. It may be necessary to use chemical improvers to substitute the interchangeable sodium; however, such additives will not be economical when used in highly-alkaline water.

Very highly-sodium water (S4): is inappropriate for irrigation purposes, except when its salinity is low or medium and when the dissolution of the soil's calcium and/or the application of gypsum and other improvers does not make the use of this type of water uneconomical.

c. Borum

Borum, in small concentrations, is essential for plant development. Nevertheless, it is toxic for certain plant species; and the concentrations that affect some species are almost the same as those needed by others for their normal development. The toxic concentrations of borum that are found in some waters used for irrigation oblige it to be kept in mind when water quality is being established. Table 7 provides the limits given by Scofield:

TABLE 7

PERMISSIBLE LIMITS OF BORUM IN IRRIGATION WATERS

Type of Borum	Sensitive Crops (mg/lt)	Semi-tolerant Crops (mg/lt)	Tolerant Crops (mg/lt)
1	< 0.33	< 0.67	< 1.0
2	0.33 – 0.67	0.67 – 1.33	1.0 – 2.0
3	0.67 – 1.0	1.33 – 2.0	2.0 – 3.0
4	1.0 – 1.25	2.0 – 2.5	3.0 – 3.75
5	> 1.25	> 2.5	> 3.75

TABLE 8

PLANT TOLERANCE TO BORUM

Tolerant	Semi-tolerant	Sensitive
Athel (<i>tamarix aphylla</i>)	Sunflower (native)	Nuts
Asparagus	Potato	Black walnuts
Palm (<i>phoenix canaiensis</i>)	Acala Cotton	Persian walnuts
Datyl palm (<i>palma dactylifera</i>)	Pima cotton	American elm
Sugar beets	Tomato	Plums
Alfalfa	Radish	Pears
Gladiola	Olive tree	Apples
Beans	Barley	Grapes
Onions	Wheat	Kadota figs
Turnips	Corn	Medlar tress
Cabbage	Sorghum	Cherries
Lettuce	Oats	Peaches
Carrots	Zinnias	Oranges
	Squash	Avocados
	Lima beans	Lemons/limes

(In each group, the species listed above are considered to be the most tolerant and those below, the most sensitive.)

d. Bicarbonates

When water rich in bicarbonate ions is used for irrigation, there is a tendency for the calcium and magnesium to precipitate as carbonates to the degree that the soil solution becomes more concentrated. Thus, the calcium and magnesium concentrations are reduced and the relative sodium concentration increased. The excess of bicarbonates is measured by the residual sodium carbonate relation, which is defined as the concentration of carbonate and bicarbonate minus the concentration of calcium and magnesium, expressed in milliequivalents per liter.

In other words:

$$\text{Residual sodium carbonate} = (\text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

Water with more than 2.5 meq/lit of residual sodium carbonate is not good for irrigation. Water that contains between 1.25 and 2.5 meq/lit is questionable and those that contain less than 1.25 meq/lit are definitely good. Nevertheless, these conclusions are based on very limited data and are, therefore, only of a provisional nature.

Table 9 shows the quality criteria for irrigation water, according to C.S. Scofield:

TABLE 9
IRRIGATION WATER QUALITY

Constituent	Classification		
	Type I	Type II	Type III
Total Dissolved Solids	0 – 700 mg/lit	700 – 2000 mg/lit	2000 mg/lit
Chlorides	0 – 150 mg/lit	150 – 500 mg/lit	500 mg/lit
Borum o/o Na	0 – 0.5 mg/lit 60	0.5 – 2.5 mg/lit 60 – 75	2.5 mg/lit 75

Type I: Water safe for irrigation under normal conditions of climate, soil and sensitive crops.

Type II: Intermediate water that can be safe for certain conditions and certain crops, but unsafe for others.

Type III: Water unsafe in most cases.

1.4.3 Protection of Groundwater

The public health authorities should have the legal and human tools necessary for suitably protecting groundwater. It is necessary to impede the discharge of domestic and industrial wastewaters or any poisonous, harmful, or polluting material into any groundwater stratum.

The owner of a well should be alert, to observe carefully any change in the appearance or taste of the well water. At any rate, all the water used for consumption and cooking of food should be boiled or disinfected with a dosis of chlorine double to that normally used. A laboratory examination will indicate the existence of pollution if it exists and the measures that should be taken in order to detect and eliminate the cause of the problem.

1.4.3.1 Locating the well

The safe distance of a well from a system of wastewater disposal depends on many variables, including the hydrology and geology of the area and the chemical, physical, and biological processes. In general, the well should be located at a higher elevation than that of any nearby source of pollution and in an area not exposed to flooding. The land should not slope in the direction of the well. The well should not be accessible to any kind of insect, rodent, or animal.

One cannot generalize and definitely pinpoint the distance that should exist between the well and a wastewater disposal system, since organic pollution prevails only for short distances when traveling across sand, silt or clay, but can remain for long distances when traveling across thick gravel, fissured rock, fractured dry clay or natural underground channels. However, the following minimum distances between the water and residual water units should be used, as suggested by the New York State Department of Health (Table 10).

TABLE 10

MINIMUM DISTANCES BETWEEN WATER AND WASTEWATER DISPOSAL UNITS

Unit	Minimum distance between the well or suction pipe
Septic tank	15 meters
Sewers to the septic tank and disposal system	15 meters
Distribution box for the disposal system	30 meters
Subsurface disposal field	30 meters
Infiltration well or black well	45 meters
Letrine	30 meters
Barnyards, silos	30 meters

When a well is pumped, the groundwater located near the well is directed towards it. Since the pumping level of the well will be approximately between 15 and 45 meters below the water table level, the well will exercise an attraction on the groundwater up to a distance of 150 to 300 meters, despite the elevation of the well platform. In other words, the distances and elevations of the wastewater disposal systems should be considered in relation to the level of the water in the well while it is being pumped.

A disposal field located 30 meters from a ground well can still be found 15 meters above the level of the water in the well. Therefore, it is always useful to take into account the hydrogeological data available in order to make an adequate selection of the well location. However, the minimum distances given before can be used as a guide as a guide.

1.4.3.2 Casings

Every well should have an impermeable casing or jacket. The casing should be new, protected against corrosion inside and out, and sufficiently long. In dug wells, the casing can also be made with brick, concrete or impermeable rock. It should reach a minimum depth of 3.5 meters and should have a height of 30-50 cms. aboveground.

In drilled wells, the casing should reach at least as far as one impermeable stratum above the water bed and should be provided with a hermetic seal between the casing and the impermeable stratum. If there is no impermeable stratum, the lower part of the casing is extended below the level of the well water and is provided with a grid or strainer of an appropriate quality and length, to permit the passage of the calculated volume of water under normal pumping conditions.

1.4.3.3 Outside protection

Every well should be covered with a sheet of concrete with a minimum thickness of 10 cm., prolonged at least 30 cm. around the well walls. The plate should have an outward slope of 2 o/o in order to facilitate water drainage. The land that surrounds the plate should be packed and sloped outwards.

1.4.3.4 Well disinfection

Every new, modified, reconstructed, or repaired well, including its pumping equipment, should be disinfected before entering into operation. The well will be used after a bacteriological analysis shows negative results for the chloroform group.

For the disinfection of wells, chlorine compounds are preferably used, such as calcium hypochlorite or "perchloron" (H - T - H), with a 7 o/o concentration of

available chlorine. Chlorated lime is also used (25 o/o of available chlorine), liquid perchloron (11 o/o of available chlorine) and other commercial compounds.

TABLE 11
STANDARDS FOR PERCHLORON IN A DISINFECTANT SOLUTION

Well capacity in liters	Grams of perchloron	Liters of water used to prepare the solution
200	15	20
400	30	20
800	60	20
1200	90	20
1600	120	20
2000	150	20
4000	300	40
8000	600	60
12000	900	80

Table 12 indicates the amounts of chlorated lime necessary to disinfect a well (20 o/o available chlorine).

TABLE 12
STANDARDS OF CHLORATED LIME FOR WELL DISINFECTION

Well capacity in liters	Grams of chlorated lime	Liters of water used to prepare the solution
200	45	20
400	90	20
800	180	20
1200	270	20
1600	360	20
2000	450	20
4000	900	40
8000	1800	60
12000	2700	80

No matter what the chlorine product used, disinfection should be done so as to guarantee a residual 50 mg/lit of free chlorine in the water during a minimum period of at least 24 hours.

The chlorine solution is preferably prepared in glass or asbestos—cement containers.

Table 11 indicates the amounts of perchloron (H — T — H) necessary to prepare the solution that will be used to disinfect, in order to supply a concentration of 50 mg/lit of available chlorine, as a function of well capacity.

The procedure to be followed in order to disinfect a drilled or driven well is as follows:

- a. Once the well capacity has been determined, with a provisionally installed pump, the water is pumped until obtaining water as clear and free of turbidity as possible.
- b. A suitable perchloron or chlorated lime solution is prepared.
- c. The provisionally—installed pumping equipment is removed and the prepared solution is slowly added to the well.
- d. The outside of the pumping system is washed (and the inside if possible) before it is placed in the well.
- e. After the pump is installed, the pumping system is operated until a strong chlorine odor appears. This is done two or three times intermittently, at one—hour intervals, in order to mix the solution inside the well and to wash out the inside of the pump.
- f. The solution is left in the well for at least 10 hours.
- g. After that time, the pump is operated until the water is free of any chlorine odor.
- h. The necessary samples are taken for the bacteriological analysis.

It should be remembered that the foregoing process only eliminates the pathogenous bacteria present at the moment of disinfecting; thus, if there is an outside source of contamination, the problem will only have been resolved temporarily.