

6153



CIR  
Centro Internacional  
de Agua y Saneamiento

Centro Colaborador de la OMS

2 0 1

8 8 S I

La Haya, Países Bajos

## Sistema de Abastecimiento de Agua para Pequeñas Comunidades

Tecnología de Pequeños Sistemas de  
Abastecimiento de Agua en  
Países en Desarrollo



Traducido al español y publicado por el  
CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA  
Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS)  
Programa de Salud Ambiental  
OPS/OMS



18

Serie Documentos Técnicos

201-OPSI-6153

El Centro Internacional de Agua y Saneamiento (CIR) fue creado a raíz de un acuerdo entre la Organización Mundial de la Salud y el Gobierno Neerlandés. El propósito general del CIR es dirigido a dar apoyo de información y tecnología a los países en desarrollo, en el campo de abastecimiento público de agua y saneamiento, y a promover la correspondiente cooperación internacional. Actuando como catalizador, el CIR trabaja a través de una red mundial de instituciones regionales y nacionales, así como también con agencias internacionales, donantes bilaterales, organizaciones no gubernamentales e individuales.

Cualquier solicitud de información sobre el CIR, o consultas sobre problemas específicos puede dirigirse al Centro Internacional de Agua y Saneamiento, P.O. Box 93190, 2509 AD, La Haya, Países Bajos.

Centro Internacional  
de Agua y Saneamiento

SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES

Preparado con contribuciones y bajo la supervisión conjunta de:

L. HUISMAN

Profesor de Ingeniería Sanitaria  
Universidad Tecnológica de Delft  
Holanda

J.M. DE AZEVEDO NETTO

Profesor de Ingeniería Sanitaria  
Universidad de Sao Paulo  
Brasil

B.B. SUNDARESAN

Director Nacional de Ingeniería Ambiental  
Instituto de Investigación  
India

J.N. LANOIX

Anteriormente: División de Salud Ambiental  
Organización Mundial de la Salud  
Ginebra

Recopilado y editado por:

E.H. HOFKES

Centro Internacional  
de Agua y Saneamiento  
Holanda

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE  
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION (IROS)  
P.O. Box 97190, 2509 AD The Hague  
Tel. (070) 314911 ext. 141/142

RN: ISN 6153  
LO: 201 8851

Documento Técnico 18  
noviembre 1988

## RESUMEN

### Sistemas de Abastecimiento de Agua para Pequeñas Comunidades, Agosto 1981

Manual/documento de consulta sobre tecnología de sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades. Temas: planeamiento y administración de pequeños sistemas de agua, cantidad y calidad del agua potable, fuentes de agua, recolección de agua pluvial, captación de aguas de manantial, extracción de agua subterránea, captación de aguas superficiales, recarga artificial, bombeo, tratamiento del agua (general), aeración del agua, coagulación, floculación, sedimentación, filtración lenta en arena, filtración rápida, desinfección, conducción y distribución del agua.

Referencias seleccionadas se añaden a cada capítulo.

Los anexos ofrecen información sobre: encuesta sanitaria, métodos de perforación de pozos, estudios experimentales para el diseño de plantas de tratamiento de agua, productos químicos empleados en el tratamiento del agua, y conversión de unidades de medición.

384 páginas; 244 figuras; 24 cuadros.

(c) Copyright 1981, edición ampliada 1983

Centro Internacional de Agua y Saneamiento

Casilla Postal 93190, 2509 AD, La Haya, Países Bajos

Holanda

Se puede, previa petición, obtener permiso para la reproducción del material de este manual.

Título de la edición original en inglés:

SMALL COMMUNITY WATER SUPPLIES - Technology of Small Water Supply Systems in Developing Countries

International Water and Sanitation Centre

(Technical Paper Series 18)

Traducción al español: Srta. Ana Labrín

Revisión técnica: Ing. Edmundo Elmore

Coordinación editorial: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), OPS/OMS

Este documento es publicado bajo la responsabilidad del Centro Internacional de Agua y Saneamiento de la OMS. No representa necesariamente las decisiones o la política oficial de la Organización Mundial de la Salud.

PREFACIO .....	vii
RECONOCIMIENTO .....	viii
1. INTRODUCCION	
1.1 El abastecimiento de agua y la salud humana .....	1
1.2 Abastecimiento de agua y desarrollo socioeconómico .....	5
1.3 Abastecimiento de agua a pequeñas comunidades en países en desarrollo .....	6
2. PLANEAMIENTO Y ADMINISTRACION	
2.1 Planeamiento .....	11
2.2 Administración y supervisión .....	15
2.3 Recursos de personal y capacitación .....	17
2.4 Compromiso y participación de la comunidad .....	18
2.5 Mantenimiento .....	21
2.6 Operación de emergencia .....	24
3. CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA	
3.1 Uso y consumo del agua .....	29
3.2 Calidad del agua .....	32
4. FUENTES DE AGUA	
4.1 Ocurrencia del agua e hidrología .....	41
4.2 Calidad de fuentes de agua .....	43
4.3 Selección de la fuente de agua .....	44
5. RECOLECCION DEL AGUA PLUVIAL	
5.1 Agua pluvial como fuente de abastecimiento de agua .....	49
5.2 Captación de agua en techos .....	49
5.3 Captación de agua en el suelo .....	52
5.4 Almacenamiento .....	54
5.5 Preservación de la calidad del agua .....	58
6. CAPTACION DE AGUAS DE MANANTIAL	
6.1 Introducción .....	63
6.2 Consideraciones básicas .....	67
6.3 Captación de manantiales de afloramiento de gravedad ....	67
6.4 Captación de manantiales artesianos .....	70
7. EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA	
7.1 Introducción .....	77
7.2 Ocurrencia y prospección del agua subterránea .....	78
7.3 Métodos de extracción de agua subterránea .....	84
7.4 Galerías de filtración .....	90
7.5 Pozos excavados .....	93
7.6 Pozos tubulares .....	103

8.	CAPTACION DE AGUA SUPERFICIAL	
8.1	Captación de agua de río .....	117
8.2	Captación de agua de lago .....	120
8.3	Construcciones típicas de captación .....	122
8.4	Represas pequeñas y reservorios de pequeñas comunidades .	123
8.5	Cribas .....	124
9.	RECARGA ARTIFICIAL	
9.1	Introducción .....	129
9.2	Filtración ribereña .....	130
9.3	Esparcimiento de agua .....	134
9.4	Represamientos de arena .....	137
10.	BOMBEO	
10.1	Introducción .....	141
10.2	Fuentes de energía para el bombeo .....	141
10.3	Tipos de bombas .....	145
10.4	Bombas reciprocantes .....	147
10.5	Bombas rotativas (desplazamiento positivo) .....	151
10.6	Bombas de flujo axial .....	153
10.7	Bombas centrífugas .....	154
10.8	Arreglos para el accionamiento de bombas .....	155
10.9	Bombas accionadas por aire .....	158
10.10	Ariete hidráulico .....	161
11.	TRATAMIENTO DEL AGUA	
11.1	Introducción .....	167
11.2	Calidad y tratamiento del agua subterránea .....	170
11.3	Calidad y tratamiento del agua superficial .....	171
12.	AERACION	
12.1	Introducción .....	175
12.2	Aeradores de cascadas .....	176
12.3	Aeradores de burbuja .....	180
13.	COAGULACION Y FLOCULACION	
13.1	Introducción .....	183
13.2	Coagulantes .....	184
13.3	Mezcla rápida .....	186
13.4	Floculación .....	190
13.5	Floculadores hidráulicos .....	191
14.	SEDIMENTACION	
14.1	Introducción .....	197
14.2	Diseño de tanques de sedimentación .....	198
14.3	Construcción .....	200
14.4	Plancha basculante y sedimentadores de tubo .....	203

15.	FILTRACION LENTA EN ARENA	
15.1	Introducción .....	209
15.2	Teoría de la filtración .....	211
15.3	Principios de operación .....	213
15.4	Consideración de diseño .....	216
15.5	Construcción .....	219
15.6	Limpieza .....	223
16.	FILTRACION RAPIDA	
16.1	Introducción .....	229
16.2	Aspectos teóricos .....	234
16.3	Operación y control del filtro rápido .....	234
16.4	Consideraciones de diseño .....	239
16.5	Construcción .....	247
16.6	Filtración rápida aplicada a pequeñas comunidades .....	250
16.7	Filtración gruesa .....	252
17.	DESINFECCION	
17.1	Introducción .....	255
17.2	Desinfección física .....	255
17.3	Desinfectantes químicos .....	256
17.4	Cloración .....	257
17.5	Tecnología de cloración para el abastecimiento rural de agua .....	259
17.6	Desinfección usando cloro gaseoso .....	263
17.7	Desinfección de tanques nuevos, tuberías y pozos .....	265
17.8	Desinfección del abastecimiento de agua en situaciones de emergencia .....	266
18.	CONDUCCION DEL AGUA	
18.1	Introducción .....	269
18.2	Tipos de conductos de agua .....	269
18.3	Consideraciones de diseño .....	272
18.4	Diseño hidráulico .....	274
18.5	Conducción de agua mediante bombeo .....	278
18.6	Material de tuberías .....	283
19.	DISTRIBUCION DE AGUA	
19.1	Introducción .....	289
19.2	Tipos de sistemas de distribución .....	289
19.3	Consideraciones de diseño .....	296
19.4	Diseño del sistema de distribución .....	304
19.5	Material de tubería .....	307

ANEXOS

1. Encuesta sanitaria
2. Métodos de perforación de pozos
3. Estudios experimentales para el diseño de una planta de tratamiento de agua
4. Productos químicos usados en el tratamiento de agua
5. Factores de conversión de medidas

## PREFACIO

Las Naciones Unidas han designado el período 1981 - 1990 como el Decenio Internacional del Abastecimiento de Agua Potable y del Saneamiento. Muchos esperan y confían que habrá vastos y crecientes esfuerzos para proveer adecuados servicios de abastecimiento de agua y saneamiento a todos aquellos que los necesiten.

Las necesidades son enormes. Cientos de millones de personas que viven en países en desarrollo carecen de un acceso razonable a un suministro adecuado de agua potable segura. Los problemas son particularmente agudos para innumerables pequeñas comunidades en áreas rurales, así como para áreas urbanas periféricas. Su situación en materia de suministro de agua a menudo es tremendamente inadecuada.

Cuando se provee de sistemas de abastecimiento de agua a pequeñas comunidades, factores tales como: organización, administración, compromiso y participación de la comunidad, y financiamiento, se constituyen frecuentemente en las principales restricciones, y no así las consideraciones técnicas. Sin embargo, la selección de una tecnología adecuada sigue siendo importante ya que otros problemas se agravan cuando se usa técnicas, métodos y equipo que no son compatibles con las condiciones y situaciones de las pequeñas comunidades.

Es un error considerar a los sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades como versiones "reducidas" de instalaciones urbanas, que requieren, en consecuencia, menos conocimientos de Ingeniería. El caso puede ser exactamente lo contrario. La simplicidad y la pequeñez no deben considerarse como algo retrasado o de segundo orden, sino como algo que es apropiado para el propósito que se persigue. Se debe seleccionar tecnologías que puedan integrarse dentro del enfoque de la voluntad de compromiso de la comunidad, que es tan esencial en los planes y sistemas de pequeña escala. Una mala aplicación de tecnologías puede ocurrir cuando el diseñador no comprende claramente los supuestos básicos implícitos en ellas. Esto, a menudo, dará como resultado diseños sobredimensionados y requerimientos de mano de obra, de operación y de mantenimiento que no son realistas.

Este manual ha sido diseñado para ofrecer una introducción de ancha base a la tecnología de abastecimiento de agua a pequeñas comunidades. Ofrece información y guía que debe usarse con facilidad y provechosamente por aquellos que tienen cierto respaldo técnico en ingeniería civil, salud pública o irrigación, pero que no tienen capacitación formal o experiencia en el suministro de agua. Debe servir de ayuda a los ingenieros e inspectores de salud pública llamados a asumir responsabilidad sin el diseño y/o mantenimiento de sistemas pequeños de abastecimiento de agua. Este grupo también incluye a ingenieros provinciales o municipales que tienen la responsabilidad, entre otras tareas, del abastecimiento de agua y saneamiento. Por lo tanto, esta obra no ha sido escrita como texto para estudiantes de ingeniería, ni como manual de diseño dirigido a los técnicos. Se ha incluido sí algunas explicaciones teóricas, pero se ha mantenido este material en un nivel mínimo. Para una información más profunda y detallada se hace referencia a monografías y textos.



## RECONOCIMIENTO

Este manual ha sido compilado y luego desarrollado más extensamente gracias a la contribución de muchas personas.

Las principales contribuciones han sido hechas por un grupo de autores que de manera individual proporcionaron capítulos seleccionados y que, en forma colectiva, supervisaron la preparación del manual. Estos autores son el Profesor L. Huisman (Holanda), el Profesor J.M. de Azevedo Netto (Brasil), el Doctor B.B. Sundaesan (India) y el Doctor J.N. Lanoix (OMS, Ginebra).

Además, se está en deuda con los señores L.G. Hutton y W. Moffat (Grupo WEDC, Universidad de Tecnología de Loughborough, Inglaterra), por el material que proporcionaron sobre la descripción y prospección del agua subterránea, y con el Sr. P.K. Cruse (George Stow & Cía. Ltda., Ingenieros de Pozos de Agua, Henley-on-Thames, Inglaterra) quien preparó la sección sobre métodos de perforación de pozos. El Sr. R. Trietsch (DHV Ingenieros Consultores, Amersfoot, Holanda) contribuyó preparando, a base de materiales reunidos anteriormente, un borrador preliminar para los capítulos sobre transporte y distribución de agua. El Doctor B.C.I. Zoeteman (Instituto Nacional para el Abastecimiento de Agua, Holanda) sugirió consejos sobre la presentación de los aspectos de calidad del agua y salud, así como las pautas para la calidad del agua potable.

Se hace una mención de gratitud a todos aquellos que ayudaron en la revisión del borrador manuscrito; sus comentarios fueron invaluable como base para las correcciones y mejoras. Se cree que las siguientes personas deben mencionarse en forma especial: Dr. G. Bachmann (OMS, Ginebra); Sr. Edwin Lee (OMS, ORPO, Manila); Sr. D.V. Subrahmanyam (OMS, ORSEA, Nueva Delhi); Ing. David Donaldson (OPS, Washington); Dr. F. E. Mc. Junkin (USAID, Washington) y el Dr. T. K. Tjiok (CIR, La Haya).

Al recopilar y editar las diferentes contribuciones y al procesar los numerosos comentarios hechos a los subsiguientes borradores, el Sr. E. M. Hofkes (CIR, La Haya) se encargó de la tarea de integrar, reorganizar, revisar y, en varias ocasiones, reescribir totalmente secciones e incluso capítulos enteros.

Al editar el material, el Sr. G. Bedard ofreció una importante ayuda. El Sr. Hanni Wolsink realizó un trabajo sobresaliente en el extenso procesamiento del texto y en la coordinación administrativa, sin los cuales no hubiera sido posible la preparación del manual.

Es probable que el presente documento requiera revisión en una etapa futura. Se tiene la intención de realizar esa labor cuando sea oportuno.

Serán muy bienvenidos los comentarios y sugerencias por parte de los lectores sobre cambios, correcciones y adiciones. Estos serán usados con mucho interés en la revisión futura del manual y serán debidamente reconocidos en el mismo. Las comunicaciones deben dirigirse a: CIR, Casilla Postal 93190, 2509 AD, La Haya, Holanda.

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 EL ABASTECIMIENTO DE AGUA Y LA SALUD HUMANA

El agua es esencial para el hombre, los animales y las plantas; sin agua no existiría vida sobre la tierra. Desde los inicios mismos de la civilización humana, la gente se ha establecido cerca de las fuentes de agua, a lo largo de ríos, al lado de lagos o cerca de manantiales naturales. En realidad, en los lugares donde vive la gente, se dispone normalmente de cierta cantidad de agua para bebida, uso doméstico y posiblemente para las necesidades de los animales. Sin embargo, este hecho no implica que la fuente disponible de agua sea conveniente y de capacidad suficiente, ni tampoco que el agua sea segura y de buena calidad. Por el contrario, en muchos países la gente vive en áreas en donde el agua es escasa. A menudo se la tiene que transportar a través de largas distancias, particularmente durante períodos de sequía. La escasez de agua también puede llevar a la gente al uso de fuentes contaminadas por heces humanas o de animales, y que, por lo tanto, son peligrosas para la salud.

Unos pocos litros de agua al día son suficientes para satisfacer los requerimientos básicos de bebida y de preparación de alimentos de una persona, dependiendo de la cantidad, del clima y del estilo de vida. Se necesita cantidades mucho mayores cuando se utiliza el agua para otros propósitos, tales como higiene personal, limpieza de utensilios de cocina, lavado de la ropa y limpieza de la casa. Los abastecimientos de agua seguros, adecuados y accesibles, conjuntamente con un saneamiento apropiado, son, sin duda, necesidades básicas y componentes esenciales de la atención primaria de la salud. Ellos pueden ayudar a reducir muchas de las enfermedades que afectan a las poblaciones menos privilegiadas, especialmente aquellas que viven en áreas rurales y urbano-marginales.

El agua potable segura es factor importante en el control de muchas enfermedades. Esto en particular ha quedado bien establecido si se trata de enfermedades tales como diarrea, cólera, fiebre tifoidea y paratifoidea, hepatitis infecciosa, disentería amebiana y bacilar. Se ha estimado que no menos del 80 por ciento de todas las enfermedades en el mundo se asocian con el agua no potable o de mala calidad. Esta asociación puede adoptar un número de diferentes formas, pudiéndose agrupar las enfermedades de acuerdo a ellas (Cuadro 1.1).

Las enfermedades transmitidas por el agua son aquellas transportadas por el agua contaminada con agentes infecciosos de origen animal o humano. Cuando se bebe el agua, se ingiere los agentes infecciosos y estos pueden causar enfermedades. El control de esas enfermedades requiere de una mejor calidad del agua de abastecimiento.

Cuadro 1.1

Enfermedades relacionadas con deficiencias en el abastecimiento de agua y/o en el saneamiento

GRUPO	ENFERMEDADES	
<p>• Enfermedades transmitidas a través del agua (enfermedades de origen hídrico) El agua actúa sólo como un vehículo pasivo para el agente infeccioso Todas estas enfermedades dependen también de un deficiente saneamiento</p>	<p>Cólera Tifoidea Disentería bacilar Hepatitis infecciosa Leptospirosis Giardiasis Gastroenteritis</p>	
<p>• Enfermedades debidas a la falta de agua (El uso continuo de agua ayudaría a evitar este tipo de enfermedades) La falta de una cantidad adecuada de agua y la pobre higiene personal crean condiciones favorables para su propagación. Las infecciones intestinales en este grupo también dependen de la falta de una adecuada eliminación de desechos humanos.</p>	<p>Escabiosis (sarna) Sepsis de la piel y úlcera Frambesia Lepra Tifus exantemático (piojos) Tracoma Conjuntivitis Disentería Bacilar Disentería Amebiana Salmonelosis Diarrea por enterovirus Fiebre paratifoidea Ascariasis Trichiuriasis Enterobiasis Anquilostomiasis</p>	
<p>• Enfermedades causadas por agentes infecciosos propagadas por contacto o por ingestión de agua. (enfermedades que tienen su brote en el agua) Una parte esencial del ciclo vital del agente infeccioso tiene lugar en un animal acuático. Algunos son también afectados por disposición de desechos.</p>	<p>Esquistosomiasis (urinaria y rectal) Ourtiasis (gusano de Guinea) Bilharzitosis Filariasis: Draconculosis Oncocercosis Treadworm</p>	
<p>• Enfermedades transmitidas por insectos que viven cerca del agua (vectores relacionados con el agua) Las infecciones son propagadas por mosquitos, moscas, insectos que se procrean en el agua o "pican" cerca de ella. Estos son especialmente activos y agresivos cerca de aguas estancadas al descubier-to. No afectados por los desechos.</p>	<p>Fiebre amarilla Fiebre hemorrágica del dengue + dengue Fiebre del Oeste del Nilo y del Valle Rift Arbovirus Encefalitis Filariasis Malaria Oncocercosis Enfermedad del sueño*</p>	<p>mosquito mosquito mosquito mosquito mosquito mosquito mosca Simulium mosca Tse-tse</p>
<p>• Enfermedades causadas por agentes infecciosos. Contraídas principalmente al comer pescado crudo y otros alimentos no cocidos. (Enfermedades de disposición de desechos fecales)</p>	<p>Clonorchiasis Difilobothriasis Fasciolopsiasis Paragonimiasis</p>	<p>Pescado Pescado Planta comestible Cangrejo de ríos</p>

\* Poco usual que el agua doméstica los afecte en mucho

Fuente: Saunders, J.; Watford, J., Abastecimiento de agua a poblados: Economía y Política en el mundo en desarrollo. Publicado para el Banco Mundial por el Departamento de Prensa de la Universidad Johns Hopkins, Baltimore, 1976

Las enfermedades debidas a la falta de agua tienden a ser un serio riesgo para la salud. Cuando la gente usa muy poca agua, ya sea por la escasez o porque se encuentra muy distante como para ser transportada en cantidad suficiente a la casa, hace imposible mantener una higiene personal razonable. Simplemente puede haber poca agua para lavarse en forma adecuada, o para la limpieza de los utensilios de cocina y de la ropa. Las infecciones de la piel y de los ojos son, por lo tanto, propensas a desarrollarse, y las infecciones intestinales pueden propagarse con mucha mayor facilidad de una persona a otra. Sin duda la prevención de estas enfermedades por el uso continuo del agua depende de la disponibilidad de abastecimientos adecuados de agua y de su acceso a ellos, y no depende de su calidad.



FOTO: OMS, A. S. Kochar

Figura 1.1  
El agua transportada a casa a través de largas distancias será usada en forma muy controlada

Las enfermedades que tienen su brote en el agua no se propagan directamente de persona a persona. Son causadas por agentes infecciosos que, durante una parte esencial de su ciclo vital, se desarrollan en animales acuáticos específicos, principalmente caracoles y crustáceos. En un período de días, o semanas, la larva o huevos del parásito maduran en estos huéspedes intermediarios, y luego son descargados en el agua. Las larvas maduras o los gusanos son infecciosos para la gente que bebe dicha agua o tiene contacto con ella.

En países tropicales los insectos picadores son comunes. La mayoría de éstos, sobre todo los mosquitos, crece en estanques o en otras aguas superficiales, y algunas veces incluso en recipientes caseros de agua. Las moscas Tse-tse son también activas cerca del agua. Esos agentes portadores relacionados con el agua, que llevan gérmenes patógenos dentro de ellos, pueden transmitir enfermedades.

Los riesgos para la salud también surgen de fuentes infecciosas diferentes al agua. Se puede propagar enfermedades a través del contacto directo (por ejemplo, con las manos sucias), o a través del alimento, particularmente pescado, verduras y fruta ingeridos sin cocer. Además del abastecimiento de agua segura, las medidas necesarias para controlar la enfermedad deberían, por lo tanto, incluir la higiene personal y la inspección de lugares de almacenamiento y venta de alimentos.

Es muy importante la provisión de servicios adecuados de saneamiento, incluyendo instalaciones sanitarias para la eliminación de desechos humanos. Todas las enfermedades transmitidas por el agua y muchas de las enfermedades que tienen su brote en el agua dependen, para su propagación, de agentes infecciosos provenientes de heces humanas que se introducen en el agua potable o en los alimentos. La cadena de transmisión de las enfermedades puede romperse en forma efectiva, tanto mediante una disposición sanitaria de las heces como por la provisión de abastecimientos seguros y adecuados de agua. Hay ciertos agentes, tales como los anquilostomas que, para la prevención de las enfermedades que causan, es más importante el saneamiento que el abastecimiento de agua, porque la transmisión se hace de las heces al suelo, primero, y luego por contacto directo y penetración a través de la piel humana.

Las mejoras en la calidad del abastecimiento de agua a la comunidad afectarán básicamente sólo a las enfermedades transmitidas por el agua; tales como disentería bacilar, cólera, tifoidea y posiblemente esquistosomiasis. Muchas de las enfermedades diarreicas probablemente se deben más a la falta de cantidad adecuada de agua. Ciertamente las infecciones a los ojos y piel se encuentran en este grupo de enfermedades relacionadas con el agua.

Se ha demostrado que la provisión de un grifo de agua, de una ducha o de alguna instalación de lavado similar, mejore la situación de salubridad del usuario. Sin embargo, aún no existe evidencia convincente de que una vez que cada familia cuenta con un grifo o ducha, nuevas mejoras en el abastecimiento de agua beneficiarán apreciablemente su salud. Cuando el desarrollo de abastecimientos de agua se realiza sin mejoras complementarias en la higiene personal, en la manipulación y preparación de alimentos y, en general, en el cuidado de la salud, es improbable que estas medidas produzcan los beneficios esperados para la salud.

## 1.2 ABASTECIMIENTO DE AGUA Y DESARROLLO SOCIOECONOMICO

En los países industrializados, los sistemas de abastecimiento de agua a la comunidad, o abastecimientos públicos, fueron dados en primer lugar a las ciudades más grandes. Les siguieron las ciudades más pequeñas y los pueblos. Los sistemas de abastecimiento de agua fueron construidos por el estado, autoridades distritales o municipales, o por compañías privadas. En las áreas rurales, los abastecimientos de agua a la comunidad fueron instalados mucho después, ya que las consideraciones sobre la salud pública no eran tan apremiantes como en las áreas urbanas. En la primera mitad del siglo XX, muchos gobiernos nacionales empezaron a proporcionar asistencia financiera y técnica a las comunidades pequeñas y entonces se aceleró grandemente la extensión de abastecimientos de agua a la población rural.

Un abastecimiento adecuado de agua segura es un prerequisite para el desarrollo socioeconómico de una comunidad. Factores tales como el tiempo y el ahorro de energía en la recolección de agua potable, y una reducción sustancial en la incidencia de enfermedades pueden contribuir positivamente al desarrollo, siempre y cuando el tiempo y la energía ganados sean utilizados económicamente.

El nuevo abastecimiento de agua podría ayudar al desarrollo de actividades tales como procesamiento de frutas y verduras, o conservación de pescado. El que los beneficios de la productividad potencial se materialicen o no depende de las circunstancias específicas. Un factor importante es cómo puede usarse de otra manera el tiempo y energía ahorrados en el acarreo del agua. En algunos poblados o aldeas la salud deficiente de la fuerza laboral afecta seriamente el desarrollo agrícola, mientras que en otros existe seria condición de subempleo y los beneficios que trae el abastecimiento de agua no pueden realizarse a menos que el proyecto de abastecimiento forme parte de un desarrollo rural integrado que ofrezca un creciente empleo. Un nuevo abastecimiento de agua puede dar lugar a oportunidades para manufacturas artesanales, conservación de ganado o cultivo de vegetales. Así cuando, se estimula el trabajo productivo y al mismo tiempo se mejora la higiene personal, el cuidado de la salud y la preparación de alimentos, se puede esperar que un abastecimiento de agua a la comunidad tenga un impacto positivo en el desarrollo socioeconómico.

Esto es particularmente cierto en regiones áridas o en áreas con una prolongada estación seca, en donde la provisión de cantidades suficientes de agua permiten su uso en el cuidado del ganado y en la irrigación de tierras de cultivo.

Es posible que los sistemas de abastecimiento de agua, conjuntamente con programas complementarios de salud y economía, pudieran disminuir la migración de las áreas rurales a las ciudades. Sin embargo, existe poca evidencia que sólo la provisión de abastecimientos de agua tenga un efecto sustancial en la migración. Es más probable que los sistemas de abastecimiento de agua puedan usarse para alentar, durante un período de tiempo, la agrupación de poblaciones dispersas en unidades pobladas o villas

de cierta extensión. Cuanto más concentrada esté la población a ser servida, es más probable que se pueda proveer un sistema de abastecimiento de agua financieramente viable y adecuadamente mantenido. Si el abastecimiento de agua permite y promueve la formación de asentamientos humanos de cierto tamaño, esto puede ayudar a mejorar el potencial para el desarrollo económico.

En la mayoría de los casos es imposible presentar una justificación económica rigurosa para proyectos de abastecimiento de agua en pequeñas comunidades. En lugar de esto, la justificación debe basarse en una evaluación cualitativa de los beneficios anticipados del abastecimiento de agua. Los beneficios directos más importantes al mejorar la calidad del abastecimiento de agua son una mejor higiene y salud, mayor conveniencia y beneficios para abreviar el ganado y para la irrigación de huertos de legumbres. Los beneficios indirectos que comúnmente se cita son una redistribución del poder de compra en favor de los campesinos pobres, un mejor nivel de vida y el desarrollo de instituciones de la comunidad.

### 1.3 ABASTECIMIENTO DE AGUA A PEQUEÑAS COMUNIDADES EN PAISES EN DESARROLLO

En los centros urbanos de los países en desarrollo, los sistemas públicos de abastecimiento de agua del tipo desarrollado en los países industrializados pueden ser convenientes, con adaptaciones apropiadas.

Debido a las economías de escala y al gran número de personas a ser servidas, la inversión per cápita y los costos de operación de los sistemas urbanos de abastecimiento de agua no tienen por qué ser necesariamente elevados. Cuando se conecta un número sustancial de casas al sistema de distribución de agua, y cuando se cobra las tarifas de agua regularmente, la tarea de abastecer agua puede convertirse en autofinanciable.

En la mayoría de los pueblos pequeños y de las comunidades rurales en los países en desarrollo, las condiciones de abastecimiento de agua existentes son muy diferentes a las condiciones de las instalaciones urbanas. Por lo general, el número de gente a ser servida por ese sistema de abastecimiento de agua es pequeño, y la baja densidad de población hace que la distribución del agua por tuberías sea costosa. A menudo la población rural es muy pobre, y particularmente en comunidades que subsisten de la agricultura, el dinero disponible es muy poco. Apenas se dispone de fondos para pagar la operación y el mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua, y es poco probable que las comunidades pequeñas puedan obtener el capital de inversión sin la ayuda del gobierno nacional o de agencias externas o entidades de préstamo.

Por lo general, en las pequeñas comunidades no se dispone de personal capacitado para la operación y el mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua.

Se puede obtener personal calificado para diseño y construcción a través de las fuentes externas que ayudan a que las instituciones nacionales a que se conviertan en autosuficientes. Sin embargo, seleccionar y capacitar al personal necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento de agua puede ser una tarea difícil.

Un factor importante es el requerimiento del uso de una tecnología que sea apropiada para las condiciones locales. Esta tecnología diferirá de la tecnología convencional, la cual fue desarrollada principalmente para aplicarse a los sistemas más grandes de abastecimiento de agua de ciudades y pueblos de países desarrollados.



Figura 1.2  
Situación típica de una pequeña comunidad

Para las pequeñas comunidades, los sistemas de abastecimiento de agua por medio de tuberías con conexiones domiciliarias, a menudo no son económicamente factibles. En tales casos, la opción realista es la de proporcionar un número de fuentes individuales o fuentes "puntuales": por ejemplo, un pozo protegido, equipado con una bomba de mano; una estructura de captación de un manantial; o quizás un sistema de captación y almacenamiento de agua pluvial. Para pueblos y localidades más grandes puede ser factible una pequeña planta de tratamiento de agua y la distribución de ésta a través de fuentes o "piletas" públicas. Cuando la comunidad a ser servida efectúa una contribución dirigida a sufragar parte de los costos de construcción del sistema de abastecimiento de agua, ya sea a través del pago de fondos o a través de la provisión de trabajo o materiales de construcción, el capital de inversión puede mantenerse bajo. Los costos periódicos por operación y mantenimiento presentan a menudo un problema, especialmente cuando es difícil o imposible cobrar las pensiones de agua.

Un sistema pequeño de abastecimiento de agua a la comunidad no necesariamente es difícil de diseñar y construir. El ingeniero debe seleccionar cuidadosamente una tecnología que sea simple, confiable y que se adapte a las habilidades técnicas u organizativas disponibles. Esto tampoco es fácil, pero estos problemas presentan un reto fascinante y un campo de trabajo muy provechoso.

Por mucho tiempo se ha construido sistemas de abastecimiento de agua para servir a pequeñas comunidades pero recientemente se han construido estos sistemas en número considerable. Algunas veces los abastecimientos pequeños de agua demostraron no ser adecuados para las condiciones bajo las cuales tenían que funcionar. Varios sistemas han sido completamente abandonados



después de unos años de su construcción. Las frecuentes fallas y paralizaciones de los sistemas no son poco comunes. Es necesario aprender de los errores pasados y reconocer las causas de las fallas. Basándose en esto se puede desarrollar pautas para el planeamiento, construcción, operación y mantenimiento de sistemas pequeños de abastecimiento de agua.

## INTRODUCCION

Ballance, R.C.

WATER SUPPLY, SANITATION AND TECHNOLOGY

Interdisciplinary Science Reviews, Vo. 3, No. 3, 1978

Beyer, M.

DRINKING WATER FOR EVERY VILLAGE: Choosing appropriate technologies

En: Assignment Children 1976, No. 34 (Abril-Junio)

Cairncross, S.; Feachem, R.G.

SMALL WATER SUPPLIES

Ross Institute, London 1978, 78 p. (Bulletin No. 10)

COMMUNITY WATER SUPPLY

World Health Organization, Ginebra, 1969, 21 p.

(Technical Report Series No. 420)

Environmental Protection Agency

MANUAL OF INDIVIDUAL WATER SUPPLY SYSTEMS

U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1973,  
155 p.

Feachem, R.G.; McGarry, M.G.; Mara, D. (eds.)

WATER: WASTES AND HEALTH IN HOT CLIMATES

John Wiley, London, 1977

Feachem, R.G.; Burns, E.; Cairncross, S. et al

WATER, HEALTH AND DEVELOPMENT: AN INTERDISCIPLINARY EVALUATION

Tri-Med Books, London, 1978, 267 p.

Johnson, C.R.

VILLAGE WATER SYSTEMS

UNICEF, Nepal, 1977, 107 p.

Mann, H.T.; Williamson, D.

WATER TREATMENT AND SANITATION: A HANDBOOK OF SIMPLE METHODS FOR RURAL AREAS

Intermediate Technology Publication Ltd. London, 1976, 90 p.

Pacey, A. (ed.)

WATER FOR THE THOUSAND MILLION

Pergamon Press, Oxford, 1977

PEOPLE, WATER AND SANITATION

En: Assignment Children No. 45/46

UNICEF, Ginebra, 1976

Pineo, C.S.; Subrahmanyam, D.V.

COMMUNITY WATER SUPPLY AND EXCRETA DISPOSAL SITUATION IN THE DEVELOPING COUNTRIES: A COMMENTARY

World Health Organization, Ginebra, 1980, 11 p.

Saunders, R.J.; Warford, J.J.  
VILLAGE WATER SUPPLY: ECONOMICS AND POLICY IN THE DEVELOPING WORLD  
World Bank Research Publication  
Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1976, 279 p.

Secretariat des Missions d'Urbanisme et d'Habitat (S.M.U.H.)  
ALIMENTATION EN EAU  
Ministère de la Coopération  
Fonds d'Aide et de Coopération (F.A.C.), Paris, 1977

Wagner, E.C.; Lanoix, J.N.  
WATER SUPPLY FOR RURAL AREAS AND SMALL COMMUNITIES  
World Health Organization, Geneva, 1959, 337 p.  
(Monograph Series No. 42)

White, A.U.; Seviour, C.  
RURAL WATER SUPPLY AND SANITATION IN LESS-DEVELOPED COUNTRIES  
International Development Research Centre, Ottawa, 1974, 81 p.

White, G.F.; Bradley, D.J.; White, A.U.  
DRAWERS OF WATER: Domestic Water Use in East Africa  
University of Chicago Press, Chicago, 1972

## 2. PLANEAMIENTO Y ADMINISTRACION

### 2.1 PLANEAMIENTO

En muchos países la provisión de sistemas de abastecimiento de agua para la comunidad constituye un elemento principal en el programa de salud ambiental y frecuentemente esos sistemas se planifican en este contexto. Sin embargo, la verdadera responsabilidad de las autoridades de salud ambiental a menudo está limitada a la vigilancia de la calidad del agua potable que se distribuye a la comunidad, algunas veces unida al control de instalaciones sanitarias. En algunos países, las autoridades de salud han asumido una responsabilidad directa en el abastecimiento de agua a pequeñas comunidades y el saneamiento en áreas rurales.

La función de control con respecto a los abastecimientos de agua e instalaciones sanitarias implicaría una participación activa en el planeamiento, administración y mantenimiento de todos los sistemas. Pero puede ser que las autoridades de salud no tengan el personal suficiente o no estén lo suficientemente equipadas para afrontar las demandas que ello implicaría. Por lo general, son las unidades de ingeniería de otros departamentos gubernamentales las que realizan la mayor parte del planeamiento y la construcción de los sistemas de abastecimiento de agua. Es probable que esas unidades concentren sus esfuerzos en los aspectos de ingeniería y costo, y puedan tender a descuidar los aspectos de salud y las implicancias de carácter social que van aparejados con los abastecimientos de agua.

#### Programas en vez de proyectos

A menudo se enfoca el planeamiento y el diseño del sistema de abastecimiento de agua de una ciudad grande como un proyecto. Aquí se usa el término "proyecto" para describir todos los detalles preparatorios que hay que desarrollar para la construcción de un solo sistema de abastecimiento de agua. Se aborda cada uno de estos sistemas grandes de abastecimiento de agua como un proyecto separado. Sin embargo, cuando se planea sistemas de abastecimiento de agua para un gran número de pequeñas comunidades rurales, el enfoque debe ser el de un programa, en lugar de una serie de proyectos individuales. Se entiende aquí por programa a un grupo integrado de actividades continuas dirigidas hacia la implementación de un número considerable de sistemas similares de abastecimiento de agua. Es probable que los problemas clave sean menos cuestión de técnica y más cuestión organizativa y administrativa. Los aspectos de compromiso de la comunidad tomarán un significado mucho mayor.

Bajo la égida de un programa, las decisiones técnicas a menudo tienen que estar subordinadas a otras consideraciones. Por ejemplo, el número de tipos o modelos diferentes de bombas usadas en un programa debería mantenerse en un mínimo para reducir problemas de logística y mantenimiento. En el enfoque de proyecto, en cambio, se seleccionará una bomba para satisfacer una especificación técnica, y entonces el sistema de mantenimiento tendrá que adaptarse a las características de la bomba y sus requerimientos de servicio.

Otra diferencia básica es la forma cómo los usuarios perciben su relación con el abastecimiento de agua y su costo y beneficios. El habitante urbano rara vez tiene una fuente alternativa de agua y mayormente comprende y se da cuenta de los beneficios generales de los servicios de abastecimiento de agua. Así, se requiere poco esfuerzo y tiempo para convencerlo de la necesidad de mayor cantidad de agua o de agua más segura. En una comunidad rural pequeña, por lo general no existe un equivalente a esta "demanda" urbana de agua. Las familias rurales frecuentemente pueden escoger entre fuentes alternativas de agua y la gente ha desarrollado sus criterios para escoger entre ellas. A menudo se ve al agua como un bien gratuito. Las consideraciones de salud desempeñan un papel de menor importancia. Las cantidades de agua usada son pequeñas, con la excepción quizás de la usada para abreviar el ganado e irrigar lotes pequeños. Inicialmente sólo existirá entonces una fuerte demanda de agua de buena calidad en situaciones de severa escasez o de una fuerte contaminación de las fuentes.

Por lo tanto, es de esperarse que una demanda de agua de tipo urbano no se llegue a desarrollar en pequeñas comunidades rurales, sin que se produzca algún cambio en las profundamente arraigadas costumbres del uso del agua. Un esfuerzo educativo deberá estar unido al programa rural de abastecimiento de agua y deberá desarrollarse con sutileza y conocimiento de los hábitos locales.

#### Consideraciones financieras

Los habitantes de áreas urbanas, por lo general, han aceptado el principio, o por lo menos están familiarizados con la exigencia de que deben pagar por el agua o, más bien, por la conveniencia de tener agua segura suministrada cerca al lugar de uso. En las pequeñas comunidades rurales el principio de pagar por el agua no es, por lo general, ampliamente aceptado. La gente piensa que el agua, al igual que el aire, es un don natural. También es un hecho que aquellos que viven en comunidades pequeñas a menudo tienen poca capacidad para pagar. Así, será difícil y tomará tiempo desarrollar sistemas de financiación, y se requerirá tener un claro conocimiento de las costumbres locales. Por ejemplo, las cuentas de pago pueda que tengan que cobrarse en la época de cosecha local.

Para cualquier programa rural de abastecimiento de agua es necesario establecer un arreglo de financiamiento a largo plazo. Las pequeñas comunidades frecuentemente encuentran difícil obtener el capital para construcción, aun cuando se integran en un programa nacional o provincial. Por lo tanto, la iniciativa para organizar y financiar estos programas debe venir por lo general del gobierno central o provincial.

Los fondos rotativos ofrecen un método excelente de financiamiento debido a su flexibilidad y adaptabilidad a las necesidades y condiciones locales. Un fondo rotativo es un fondo establecido centralmente que financia proyectos nuevos usando reembolsos de préstamos anteriores. Para empezar el proceso,

es necesario que los fondos se establezcan a nivel nacional o provincial. Las comunidades beneficiarias contribuyen con trabajo y materiales locales de construcción (por ejemplo, por lo general en América Latina hasta el 20% de los costos de construcción). Luego, pagan una tarifa de agua que, como regla, cubre la operación local y gastos menores de reparación. Para respaldar esos esfuerzos locales, el programa nacional deberá organizar, a nivel distrital o provincial, un sistema para reparaciones mayores y mantenimiento. Conforme ingresen los pagos por préstamos anteriores, el fondo rotativo estará listo para financiar otros sistemas.

Es importante recalcar que, al financiar un sistema urbano, básicamente todos los fondos requeridos provienen de la misma comunidad en forma de ingresos por el consumo del agua. Por el contrario, para las pequeñas comunidades rurales, cerca del 80% de los costos de construcción provendrían del exterior en forma de préstamos, donaciones, etc., y sólo el 20% restante estaría constituido por contribuciones directas de la comunidad, tales como materiales de construcción y trabajo.

Estudios recientes en América Latina indican que los esquemas de reembolso tienden a promover acciones de organización efectiva a nivel local. Para esto, es esencial que se produzca la ayuda de los administradores locales. Las comunidades se acostumbran al financiamiento comunitario de los servicios de abastecimiento de agua y uno de los principales beneficios que se logra es el de un mayor compromiso y participación de la comunidad.

#### Diseños típicos y estandarización

Conforme uno examina los miles de sistemas pequeños de abastecimientos de agua que se requiere, uno se siente sorprendido por el número de elementos repetitivos: pozos, estructuras de captación, tanques de agua, casas de bombas, etc. Puede lograrse ahorros sustanciales en el costo si se usa diseños y técnicas de construcción estándares. Además, también se puede reducir los costos usando técnicos a los que se capacite en los sistemas repetitivos, limitando así el número de ingenieros necesarios.

En América Latina se ha desarrollado un enfoque ventajoso. Dentro de este enfoque se divide el programa en sus partes componentes - promoción comunal, diseño técnico, financiamiento del programa, etc. - y a cada componente se le considera por sus efectos sobre los otros. Se desarrolla un programa que incorpora estos elementos en la solución de menor costo que utilizará mejor los recursos del programa (mano de obra, fondos, tecnología y administración). Debido a que un programa rural de abastecimiento de agua debe repetir muchas tareas en miles de poblados - en algunos países en decenas de miles de poblados - es obvio que el desarrollo de diseños estándares se convierta en una necesidad.

Estos diseños deben tener en cuenta técnicas de construcción rápidas y efectivas, a través del trabajo repetitivo de artesanos relativamente no especializados, con equipo e instalaciones estándares. El *diseño de unidad*

constituye una característica esencial. Los ahorros en los costos de planeamiento y supervisión ciertamente compensarán la ligera deficiencia técnica de tal diseño. Es posible idear una forma muy simple de investigación que permitirá a un técnico o inspector sanitario obtener en un día la información suficiente acerca de un proyecto pequeño de agua y para apoyar su calificación para un cierto tipo de diseño.

Se debe seleccionar criterios uniformes de diseño, y se debe preparar listas de equipo uniforme y elementos prediseñados (tanques, casas de bombas, etc.). Una vez que un ingeniero ha revisado el diseño de un sistema particular se reunirá los materiales en un patio, taller o almacén central y se enviarán a la comunidad en su totalidad, junto con todas las herramientas y artículos necesarios que sean difíciles de conseguir en la localidad. Los profesionales también desarrollarían técnicas y estrategias para lograr el compromiso de la comunidad. Estas técnicas y estrategias se formalizan como módulos de trabajo para cada fase, y se usan en la capacitación del personal asignado para implementarlas a nivel local. El diseño del módulo técnico y el diseño del módulo de compromiso de la comunidad se determinan dentro del contexto del programa en conjunto.



Foto OMS

Figura 2.1  
Agua, salud y desarrollo

## 2.2 ADMINISTRACION Y SUPERVISION

El siguiente cuadro delinea las principales funciones realizadas a nivel nacional, provincial y local. En algunos países, se establecen programas provinciales para operar en forma autónoma pero estos están unidos al programa nacional por medio de criterios, diseños y ayuda financiera estandarizados.

Cuadro 2.1

División funcional sobre niveles de gobierno diferentes

<u>Nivel</u>	<u>Funciones</u>
<u>Nacional</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>. Planeamiento a largo plazo.</li><li>. Establecimiento de políticas (técnicas y administrativas) y normas.</li><li>. Administración de fondos nacionales ajustándolos en paralelo a las contribuciones locales.</li><li>. Supervisión de la ejecución del plan nacional.</li><li>. Supervisión de programas provinciales.</li><li>. Control financiero general.</li><li>. Provisión de asistencia técnica.</li><li>. Capacitación.</li></ul>
<u>Provincial</u> <u>(y distrital)</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>. Implementación del programa.</li><li>. Diseño.</li><li>. Construcción y administración de proyectos.</li><li>. Promoción de participación de la comunidad.</li></ul>
<u>Local</u>	<ul style="list-style-type: none"><li>. Administración de sistemas de abastecimientos de agua en la comunidad.</li><li>. Operación y mantenimiento.</li><li>. Cobro de las pensiones de agua.</li></ul>

No será posible incluir, en forma inmediata, a todas las comunidades pequeñas y rurales existentes en el programa nacional o provincial de abastecimiento de agua. Se tendrá que hacer una selección, la cual será corregida y actualizada periódicamente. Los criterios de selección y el orden de prioridad para la construcción de sistemas serán determinados a nivel provincial o nacional tomando en consideración todos los factores importantes.



El objetivo de todo programa rural de abastecimientos de agua debería ser lo más específico posible. Por ejemplo: 'Dentro de 8 años, todas las comunidades de 500 o más personas, y el 50% de las comunidades más pequeñas tendrán un abastecimiento de agua segura dentro de una distancia que no exceda los 500 metros desde cada casa individual'. O 'La meta es proveer de agua potable al 90% de las comunidades rurales en los distritos A y B dentro de 22 meses'. Por el contrario, resulta vago e impreciso establecer el objetivo de la siguiente manera: 'Mejora del abastecimiento de agua de comunidades pequeñas'.

Es esencial que, a nivel de la política nacional, exista compromiso con el programa para que éste pueda funcionar sobre una base de largo plazo. A menudo es necesario proporcionar subsidios por algún tiempo, hasta que las comunidades servidas por los nuevos sistemas aprecien los beneficios de un abastecimiento adecuado de agua segura. Una vez que la gente comprenda esto, el proceso se convierte en uno de mejoramiento continuo del servicio básico hasta que, con optimismo, alcanzará un nivel donde estará firmemente respaldado por la comunidad y será financieramente autosuficiente.

La administración, operación y mantenimiento de un sistema de abastecimiento de agua es un asunto que los niveles de decisión y los ingenieros de diseño deben tener en mente desde la primera etapa de planificación. La siguiente afirmación resume esto en forma elocuente (Wagner & Lanoix, 1959):

'El ingeniero que realiza las investigaciones preliminares de campo y los primeros diseños, puede, por las decisiones que toma, facilitar o complicar los futuros problemas de operación y mantenimiento. Esto dependerá de si está buscando simplemente una solución o si está buscando la mejor solución posible. A menudo, como resultado de la precipitación, estos estudios se vuelven menos completos de lo que deberían ser. El ingeniero a cargo de las investigaciones de campo y del diseño controla una de las fases más importantes del proyecto, la cual se relaciona fuertemente con el futuro funcionamiento del mismo'.

'Si debido a un trabajo diligente el proyectista, puede eliminar una bomba, una máquina, la otra pieza del equipo, o un proceso de tratamiento, entonces estará eliminando un posible obstáculo a una operación eficiente. La comprensión de los problemas de operación de sistemas pequeños de abastecimiento de agua, la perseverancia en la búsqueda de soluciones simples y el cuidado en la aprobación de proyectos, son las mejores medidas posibles para facilitar la operación y mantenimiento de estos sistemas y, así, asegurar el cumplimiento de su función'.

'Desde el punto de vista administrativo, la adecuada administración de un sistema de abastecimiento de agua, no importa cuán pequeño sea, requiere de fondos de operación, de personal y de servicios de organización. Debido a que estos elementos están bajo el control de las autoridades locales, se debería realizar negociaciones y tratos anticipados y se debería alcanzar un grado considerable de acuerdo, antes de que el proyecto ingrese a la etapa de construcción. Estas negociaciones no siempre son fáciles, ya que algunos funcionarios, bien sea seleccionados o nombrados, mantendrán celosamente toda su autoridad, aunque pudiera ser que no hayan tenido ninguna experiencia previa en administrar abastecimientos de agua'.

### 2.3 RECURSOS DE PERSONAL Y CAPACITACION

El personal necesario para administrar y operar un pequeño abastecimiento de agua depende mayormente del tipo de sistema de distribución, si existe alguno, y si se cuentan o no con planta de tratamiento de agua y/o estación de bombeo. No se debe esperar encontrar personal calificado en pueblos pequeños y aldeas. Sin embargo, a menudo será posible seleccionar y capacitar personal potencialmente buenos, tanto para las funciones administrativas como para la operación. Uno de los métodos que ha demostrado tener éxito consiste en usar el período de construcción para seleccionar y capacitar el personal clave que, posteriormente, será responsable de las tareas de operación. Durante esta fase tienen oportunidad de conocer y aprender cómo se integra y funciona el sistema. De este modo, pueden comprender y realizar mejor el trabajo de mantenimiento que se espera de ellos.

La verdadera selección de estos hombres puede ser, en ciertos casos, un asunto delicado en vista de que sus empleos y nombramientos pueden ser función normal del gobierno local. Sin embargo, con tacto y comprensión será posible encontrar candidatos aceptables para las autoridades locales y que posean las calificaciones mínimas requeridas.

El reto, en realidad, radica en el uso de personal subprofesional. Mientras los administradores e ingenieros experimentados en sistemas de la comunidad, deben administrar el programa, su tarea es tan enorme (y por lo general ellos son tan pocos) que tendrán que dedicar su tiempo a dirigir, planificar, revisar y supervisar el programa. Se debería capacitar a un grupo especial de subprofesionales, técnicos y/o inspectores sanitarios, para una estrecha cooperación con las comunidades, recolección de datos de campo, búsqueda e investigación de fuentes de agua, preparación de los diseños repetitivos, así como para las visitas de inspección de los sistemas terminados y en operación.

En empresas pequeñas, cada persona en un puesto de supervisión tiene que ejercer un cierto número de funciones y sin una capacitación adecuada es seguro que no será eficiente en cualquiera de las funciones individuales. Por lo tanto, la capacitación es particularmente importante para el personal que trabaja en sistemas de abastecimientos de agua para comunidades pequeñas.

La capacitación debería poner énfasis en los aspectos prácticos de las materias cubiertas y debería incluir sólo un mínimo de conferencias formales. El programa de capacitación puede estar acompañado, cuando las circunstancias lo permitan, por un programa de examen y certificación de técnicos y operadores de sistemas de agua, estableciéndose varios grados para cada categoría de personal. Dicho programa, que puede realizarse con la colaboración de las autoridades educativas locales, ayudará a crear un incentivo en el personal de abastecimiento de agua para su desarrollo técnico y su progreso hacia posiciones más responsables.

No se puede nunca dejar de enfatizar la necesidad de grabar en la mente de todos los funcionarios de servicios de agua, ya sea empleados de oficina o de campo, el concepto de "servicio a la comunidad". Tanto la administración como la parte operativa de un sistema de agua, sea éste grande o pequeño, deberían estar preparadas para proveer un servicio satisfactorio al consumidor. En muchas áreas rurales, esto constituirá una idea nueva. A menudo la gente que vive en áreas de poblados pequeños, no piensa en los servicios públicos como entidades de las cuales puedan esperar o demandar servicios. Para ellos, se puede pensar en el servicio de abastecimiento de agua en términos del servicio de correos: pobre e intermitente. Su actitud es generalmente la de complacencia. La entidad responsable deberá realizar muchos esfuerzos para asegurar que ni la gente servida ni los empleados del servicio de abastecimiento de agua alberguen y desarrollen este tipo de actitud. El objetivo debería ser que los empleados comprendan la importancia de ofrecer un servicio satisfactorio a los consumidores, y su papel y responsabilidad en cumplir este objetivo. Por otro lado, la población local necesita desarrollar un sentido de propiedad y orgullo en el sistema de abastecimiento de agua, y comprender que tiene derecho a demandar el servicio. Esos procesos no son ni sencillos ni rápidos. Sin embargo, una vez establecidos, el concepto de servicio crecerá y será aceptado en forma más general. El período crítico está en la etapa inicial.

#### 2.4 COMPROMISO Y PARTICIPACION DE LA COMUNIDAD

La aceptación por parte de una comunidad de un pequeño sistema de abastecimiento de agua no es de ninguna manera cosa que deba darse por segura. Puede ser que los usuarios no estén satisfechos por el abastecimiento provisto si éste no llena sus expectativas. El esperar en largas colas para recolectar agua, el servicio intermitente, y el insuficiente abastecimiento durante algunas o muchas horas al día, son problemas comunes.

Los ingenieros y técnicos algunas veces visitan las comunidades pequeñas, instalan sistemas de abastecimiento de agua y dan por sentado que los pobladores los van a usar con cuidado durante largos períodos de tiempo. Muy a menudo, no se consulta a la gente que se va a beneficiar con el sistema de abastecimiento de agua, sobre materias como diseño, construcción, uso y mantenimiento de las instalaciones. Es difícil, si no imposible, lograr el funcionamiento continuo de un pequeño sistema de abastecimiento de agua sin cierto grado de compromiso y participación de la comunidad. Si las instalaciones no son aceptadas y apoyadas por la comunidad, es probable que sufran por mal uso, robo o incluso vandalismo. Por el contrario, repetidas veces se ha visto que, con una consulta y dirección adecuadas, se puede motivar a la gente para que ayude en el planeamiento, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua para sus comunidades.

El papel positivo de la participación de la comunidad en el desarrollo de abastecimientos de agua puede ilustrarse con la experiencia de Malawi. Allí, la participación de la gente local fue la clave del éxito en la provisión de agua por medio de tuberías a más de 150,000 pobladores en áreas con escasez crónica de agua, a un costo aproximado de sólo US\$ 3 por

persona. Los pobladores cavaron todas las zanjas, colocaron las tuberías (proporcionadas por el gobierno y entidades de ayuda) y construyeron losas de concreto y fosas de percolación. Inicialmente se efectuaron demostraciones piloto a pequeña escala, que condujeron a grandes asambleas públicas donde había oportunidad de discutir sobre todos los aspectos del nuevo sistema. Conforme evolucionó el proyecto, se introdujo el concepto de "asistente del proyecto"; se llevaron a cabo cursos de capacitación de tres semanas para personas que habían sido seleccionadas cuidadosamente por las comunidades y a quienes se les encargó la responsabilidad por los sistemas locales.

Un análisis de los sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades ha demostrado que la participación en las primeras etapas de diseño contribuye grandemente al éxito de un proyecto. La elección de la fuente de agua, el nivel de servicio y la localización de las instalaciones de abastecimiento de agua son, en particular, decisiones en las cuales la comunidad puede participar ventajosamente. Una segunda consideración para una mayor participación de la comunidad en la etapa de diseño, como es la defensa de los intereses de los sectores menos fuertes de la comunidad, es la más difícil de llevar a cabo. Sin embargo, muchas de las decisiones que se toman en esta fase pueden llevar a un empeoramiento de la posición de los grupos de condición más desfavorable. Los problemas sociales perjudican el acceso al abastecimiento; la pérdida del empleo, la pérdida de los contactos sociales para las mujeres y la dominación de las élites locales en la organización del agua son todas consecuencias posibles de un nuevo sistema de abastecimiento de agua.



Foto UNICEF/OMS por Matheson

Figura 2.2  
Participación de la comunidad en la construcción

La participación de la comunidad en la construcción de pequeños sistemas de abastecimiento de agua puede tomar nuevas formas. Contribuciones locales en efectivo, trabajo, materiales, servicios y organización reducirán el capital de inversión requerido, estimularán los sentimientos de orgullo local y obligación, desarrollarán las capacidades locales y presentarán oportunidades para la selección y capacitación de personal idóneo para el mantenimiento del sistema. También promoverán el uso correcto del sistema de abastecimiento por parte de la gente. Pero ese compromiso y participación de la comunidad puede algunas veces ser una exigencia demasiado grande para los recursos y tiempo disponibles, dando como resultado un nivel pobre de construcción, atrasos en la entrega de obras; dificultades en la inscripción de personal requerido y conflictos locales. Generalmente, cierta participación de la comunidad en la construcción del abastecimiento de agua es vista como necesaria, pero la utilidad del trabajo local depende en gran parte del tipo de tecnología adoptada, de las condiciones locales y de la disponibilidad de supervisiones técnicas.

La delegación de las tareas de operación y mantenimiento a la comunidad es más común hoy en día de lo que fue hace algunos años. Estas responsabilidades delegadas varían considerablemente, desde cierta verificación e información o mantenimiento básico de rutina, hasta la capacitación de guardianes y operadores. Existe una considerable gama de posibilidades de organización local y arreglos administrativos.

Se puede distinguir tres enfoques: a) un enfoque estándar, b) arreglos individuales y c) una combinación de compromiso. En América Latina se ha utilizado un enfoque estándar con procedimientos fijos de selección, y delegación formal de responsabilidades y autoridad, procedimientos que se complementan con acciones de capacitación y supervisión. En otros lugares, más bien son comunes los arreglos individuales, los cuales se adaptan a la organización existente de la comunidad. Sin embargo, estos arreglos carecen de base legal y a menudo su efectividad está limitada. En forma de compromiso, se puede proporcionar cierta flexibilidad al enfoque estándar para que esté de acuerdo con el patrón local, social y cultural. Esto se relaciona a hechos tales como procedimientos de selección, propósitos de organización de la comunidad y división de responsabilidades y autoridad.

Para que la cooperación entre la comunidad y la autoridad de abastecimiento de agua o departamento de salud sea efectiva, ambas partes deberán ser partícipes en un intercambio completo de información y puntos de vista. La autoridad de agua necesita establecer y dar a conocer las metas deseadas del sistema de abastecimiento de agua de la comunidad. La educación sanitaria puede ser parte de la motivación que sustenta el proyecto de agua y debe iniciarse lo más pronto posible. Por otro lado, las condiciones locales, expectativas y restricciones, también desempeñarán un papel importante. Por lo tanto, la autoridad de agua necesita recibir información suficiente sobre el fondo socioeconómico y cultural de la comunidad.

La información sobre el proyecto y una educación sanitaria general durante la fase de planeamiento puede estar seguido por esfuerzos educacionales más específicos, tales como la capacitación para poder ejecutar bien tareas delegadas. Se puede iniciar un programa de educación para usuarios antes

que se complete la instalación del servicio. Se puede continuar la educación sanitaria como un programa más específico sobre higiene personal, casera y pública, y otros aspectos relacionados con la salud. Ya se ha puesto énfasis en la integración de la educación sanitaria como parte de cualquier proyecto de abastecimiento de agua. La provisión y el uso de agua segura no serán suficientes por sí mismos para lograr una rápida mejora en la salud. Por lo general, también serán necesarias mejoras en los aspectos de eliminación de desechos, nutrición, higiene animal, viviendas, control de insectos y roedores e higiene en los alimentos. En algunos países, los proyectos de agua forman parte del programa de atención primaria de salud, o están ligados a los proyectos de nutrición. Sin embargo, aún cuando se planifican e implementan los abastecimientos de agua en forma independiente, los ingenieros deben discutir con la comunidad el papel que el agua puede desempeñar en el desarrollo local y deben alentar a otras entidades a unir sus programas al proyecto de agua.



Foto OMS por D. Deriaz

Figura 2.3  
Educando a la gente sobre el agua (Irán)

## 2.5 MANTENIMIENTO

La experiencia muestra que los sistemas de abastecimiento de agua a pequeñas comunidades son a menudo más difíciles de administrar y mantener que de construir. Generalmente se reconoce la necesidad de mantenimiento pero frecuentemente se descuida el verdadero trabajo de mantenimiento. Un principio básico en el planeamiento de cualquier abastecimiento de agua para pequeñas comunidades debería ser que el diseño técnico tenga en cuenta los requerimientos de mantenimiento de las instalaciones y el equipo. El esquema de mantenimiento debe ser factible, así como el diseño técnico debe ser efectivo en cuanto al costo y debe adaptarse a las condiciones locales.

Dos factores contribuyen a la mayoría de fallas en sistemas de agua de pequeñas comunidades:

- (a) Se usa el equipo y los materiales en condiciones para las cuales no se les ha diseñado.
- (b) Los operadores, debido a su ignorancia o desinterés, no se dan cuenta de ciertas cosas que ocurren y que son "avisos" que preceden a las averías y paralizaciones.

El operador típico de una planta pequeña de tratamiento de agua también supervisa o en el que ejecuta las conexiones de servicio de agua, lee medidores, responde a los reclamos y ordena repuestos y equipo necesarios. El también debe discutir sus problemas y planes ante la junta municipal, jefe de poblado o comité de agua. Tiene suerte si recibe la mitad de la paga que merece. Los operadores de plantas pequeñas de abastecimiento de agua disponen de recursos limitados y frecuentemente se les solicita para realizar tareas que absorben gran parte de su tiempo. A menudo reciben poco apoyo y aprecio. Sin embargo, tienen que realizar su trabajo en forma eficiente.

Mediante una revisión cuidadosa de la planta, de su diseño y de sus especificaciones, la autoridad de agua puede prevenir o eliminar la mayoría de dificultades de orden mecánico. Es bastante más difícil lograr la reducción de problemas causados por el elemento humano. Pero se puede hacer mucho, como se indicó anteriormente, a través de la capacitación del personal de campo, la asistencia técnica y la supervisión.

Las siguientes razones hacen que la preparación previa para la operación adecuada y el mantenimiento sea particularmente importante.

El efecto que un inadecuado abastecimiento de agua tiene en la salud de los usuarios. Esto puede ser difícil de cuantificar pero muchos estudios y encuestas han demostrado que la incidencia de enfermedades intestinales se relaciona con el uso de agua contaminada. Las mejoras en la situación de la salud que pueden resultar del abastecimiento de agua segura, se pierden cuando se descompone el abastecimiento de agua.

En las pequeñas comunidades rurales y en asentamientos urbanos marginales, en donde la provisión de agua segura es lo más importante, la instalación de un nuevo sistema de abastecimiento de agua es a menudo un evento de gran significado e importancia. Frecuentemente este evento también forma parte de una campaña de educación sanitaria hacia el uso higiénico del agua. Si el abastecimiento de agua se vuelve inoperante, se perderán por meses o por años las oportunidades de mejorar las prácticas higiénicas en la comunidad. Más aún, si se construyó el sistema de abastecimiento de agua con contribuciones de la comunidad, ya sea en especies o en dinero, probablemente la gente verá la falla en el abastecimiento como evidencia de que su contribución ha sido desperdiciada. Es probable que ellos no estén dispuestos a cooperar nuevamente con la autoridad de agua o con el gobierno.

Los factores mencionados son difíciles de analizar desde un punto de vista estrictamente económico. Sin embargo, una evaluación tentativa del impacto económico es como sigue:

Un país puede tener 10,000 abastecimientos de agua para pequeñas comunidades, lo que representa una inversión promedio de aproximadamente US\$ 30,000 cada uno. Si sólo funciona el 75% de estos sistemas, entonces 2,500 de ellos están fuera de operación al mismo tiempo. Si un sistema mejorado de mantenimiento asegura la operación continua de 2,500 sistemas, ¡Esto sería equivalente a un capital de inversión de US\$ 45 millones! Más aún, la experiencia muestra que es probable que las instalaciones que permanecen fuera de funcionamiento por más de unos pocos días, sufran de robos y vandalismo. No es inusual que se robe equipo íntegro de ellas. Por lo tanto, no sólo debería considerarse la inconveniencia y riesgos para la salud por pequeños abastecimientos de agua inoperantes ("parados"), sino también la pérdida de equipo, repuestos y materiales de construcción.

La responsabilidad primaria para el funcionamiento continuo y mantenimiento de un pequeño sistema de abastecimiento de agua está en la comunidad, a nivel local, respaldada por el apoyo distrital y el programa nacional de abastecimiento de agua. Un buen ejemplo de esto proviene del estado de Tamil Nadu, en India, donde se introdujo un sistema de mantenimiento de tres niveles. Desde 1971, se instaló aproximadamente 15,000 bombas de mano para pozos profundos y aproximadamente el mismo número de bombas de mano para pozos superficiales que servían a poblados en áreas rurales del estado. Se trató que el sistema de tres niveles ofrezca mantenimiento para estos pozos y bombas.

El sistema de mantenimiento de tres niveles comprende el siguiente personal de servicio:

1) Cuidador a nivel de poblado

Se escoge un voluntario interesado y capaz entre los pobladores, quien por lo general vive cerca de la bomba de mano. Este puede ser un agricultor, tendero, artesano o trabajador social. Se le ofrece un curso de orientación de dos días sobre la importancia del abastecimiento del agua potable y del mecanismo, operación y servicio de las bombas de mano. Se le capacita para que realice reparaciones menores y se le proporciona herramientas básicas. También se le proporciona tarjetas postales preselladas y membretadas en el idioma local. Cuando se produce una avería, el cuidador trata de repararla. Si no lo puede realizar, especifica el tipo de reparaciones necesarias en dos tarjetas postales, una de las cuales envía al "operario" a nivel de grupo y la otra al equipo móvil del distrito. Hasta ahora, se ha capacitado a unos 2,000 guardianes en el Estado de Tamil Nadu.



## 2) "Operario" a nivel de grupo

Se designa un "operario" (mecánico de servicio), para cada 100 bombas de mano, a nivel de grupo. Este está bajo la supervisión del funcionario de desarrollo de grupo. Cuando recibe una petición del cuidador, el operario se dirige al poblado y atiende las reparaciones si el problema se localiza en la parte superior del mecanismo.

## 3) Equipo móvil a nivel distrital

En el caso en que se necesite reparaciones mayores, es el equipo móvil a nivel distrital el que se dirige al poblado al recibir la tarjeta postal. Hay un equipo de estos por cada 1,000 bombas de mano y, por lo tanto, a menudo esto implica una demora de una semana o más. Para reducir esta espera, el Gobierno de Tamil Nadu recomienda ahora uno de esos equipos por cada 500 bombas de mano. Todos los gastos en los que se incurre son compartidos por el gobierno y los "gran panchayats" (concejo de población).

Algunas averías en una planta de abastecimiento de agua y en los equipos son inevitables a pesar de las mejores medidas de mantenimiento adoptadas. Para enfrentar estas averías en forma eficiente y con un retraso mínimo, se debe disponer de las siguientes instalaciones:

- Almacén
- Existencia suficiente de repuestos necesarios, etc.
- Personal técnico
- Medios de comunicación
- Listado de direcciones y nombres de firmas y abastecedores
- Programa de capacitación.

## 2.6 OPERACION DE EMERGENCIA

Todo sistema público de abastecimiento de agua, ya sea grande o pequeño, debe tener ciertos procedimientos de emergencia que puedan entrar en funcionamiento en situaciones tales como terremotos, inundaciones o destrozo de guerra. Se debe reconocer que en tales circunstancias, el agua es probablemente la necesidad más urgente de la población, que usará cualquier fuente disponible, contaminada o no, a menos que se tome provisiones rápidamente para dar un abastecimiento de agua segura. Se recomienda que, poco después de la instalación de un nuevo sistema de agua, o incluso antes, se realice un inventario realista que cubra todas las fuentes disponibles de agua, públicas o privadas. Este inventario debe incluir los recursos de personal y el equipo de emergencia de abastecimiento de agua disponible, bombas de mano y a motor, camiones cisterna, accesorios de tubería, unidades de filtro móviles o portátiles, herramientas y repuestos, y sustancias químicas (especialmente aquellas para propósito de desinfección del agua).

Durante emergencias, en aquellos lugares temporales de refugio se debe ofrecer diariamente un mínimo de 2 litros de agua potable por persona y 3 litros para otros propósitos. En campos con carpas, se debe ofrecer un mínimo de 10 litros por persona. Se debe duplicar esta cantidad para el abastecimiento de hospitales temporales y estaciones de primeros auxilios. En tanto no se pueda considerar como seguros los abastecimientos de agua subterránea de pozos adecuadamente contruidos, las galerías de filtración y las estructuras de manantial, toda el agua superficial debe ser considerada como de calidad dudosa. Se le debe desinfectar mediante el hervido, la cloración o desinfección con compuestos de yodo. El cloro libre residual en agua razonablemente cristalina en épocas de emergencia no debe ser inferior a 0.5 mg/l después de 30 minutos de contacto en agua que no ha sido filtrada.



PLANEAMIENTO Y ADMINISTRACION

Bainbridge, M.; Sapirie, S.

HEALTH PROJECT MANAGEMENT

A Manual of Procedures for Formulating and Implementing Health Projects.

World Health Organization, Ginebra, 1974

(WHO Offset Publication No. 12)

Barker, H.W.

ASSESSMENT OF MANPOWER NEEDS AND TRAINING PROGRAMMES

En: International Training Seminar on Community Water Supply in Developing Countries

International Reference Centre for Community Water Supply, La Haya, 1980, 175 p. (Technical Paper Series No. 15)

Campbell, S.; Lehr, H.

RURAL WATER SYSTEMS PLANNING AND ENGINEERING GUIDE

National Water Well Association, Nueva York, 1973

Donaldson, D.

PLANNING WATER AND SANITATION SYSTEMS FOR SMALL COMMUNITIES

En: International Training Seminar on Community Water Supply in developing Countries. (Amsterdam, 1976)

International Reference Centre for Community Water Supply, La Haya, 1977 (Bulletin No. 10, pp. 71-105).

También presentado como:

LA PLANIFICACION DE SISTEMAS DE AGUA Y SANEAMIENTO PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES

En: Curso Corto de Planificación y Programación de Saneamiento Básico Rural, (Managua, Nicaragua, Noviembre 1977)

Panamerican Health Organization, Washington, D.C., 1978

Imboden, N.

PLANNING AND DESIGN OF RURAL DRINKING WATER PROJECTS

OECD Development Centre, París, 1977, 51 p.

(Occasional Paper No. 2)

Kantor, Y.

RESEARCH, TRAINING AND TECHNOLOGY ASPECTS OF RURAL WATER SUPPLY AND SANITATION IN DEVELOPING COUNTRIES

World Bank, 85 p.

Pacey, A. (Ed.)

TECHNOLOGY IS NOT ENOUGH: THE PROVISION AND MAINTENANCE OF APPROPRIATE WATER SUPPLIES

En: Water Supply & Management, Vol. 1 (1977), No. 1, pp. 1-58

Wijk-Sijbesma, C. van

PARTICIPATION AND EDUCATION IN COMMUNITY WATER SUPPLY AND SANITATION PROGRAMMES (2 volumes)

International Reference Centre for Community Water supply, La Haya, 1979, 1980.

- A selected and Annotated Bibliography, 238 p.

(Bulletin Series No. 13, 1980)

- A literature Review, 204 p. (Technical Paper No. 12, 1979)

Pisharoti, K.A.  
GUIDE TO THE INTEGRATION OF HEALTH EDUCATION IN ENVIRONMENTAL HEALTH PROGRAMMES

World Health Organization, Ginebra, 1975

Schaefer, M.

THE ADMINISTRATION OF ENVIRONMENTAL HEALTH PROGRAMMES: A SYSTEMS VIEW

World Health Organization, Ginebra, 1974

(Public Health Paper No. 59)

Stanley, S.

BETTER PLANNING IS THE KEY

En: Reports, 6(1977)3

International Development Research Centre, Ottawa, 1977

Wagner, E.G.; Lanoix, J.N.

WATER SUPPLY FOR RURAL AREAS AND SMALL COMMUNITIES

World Health Organization, Ginebra, 1959, 337 p.

(Monograph Series No. 42)

WATER AND COMMUNITY DEVELOPMENT

En: Assignment Children 1976, No. 34, (Abril-Junio)

UNICEF, Ginebra

White, G.F.

DOMESTIC WATER SUPPLY IN THE THIRD WORLD

A paper presented at the IAWPR Symposium:

"Engineering, Science and Medicine in the Prevention of tropical Water Related Diseases"; London, Diciembre 1978.

En: Progress in Water Technology, Vol. 2 (1978)

Nos. 1 and 2, pp. 13-19

Whyte, A.

TOWARDS A USER-CHOICE PHILOSOPHY IN RURAL WATER SUPPLY PROGRAMMES

Assignment Children 1976, No. 34 (Abril-Junio)

UNICEF, Ginebra

### 3. CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA

#### 3.1 USO Y CONSUMO DEL AGUA

Dependiendo del clima y de la carga de trabajo, el cuerpo humano necesita aproximadamente de 3 a 10 litros de agua por día para su normal funcionamiento. Parte de esta agua proviene de los alimentos. El uso del agua para la preparación de alimentos y para cocinar es relativamente constante. La cantidad de agua usada para otros propósitos varía ampliamente y es grandemente influenciada por el tipo y disponibilidad del abastecimiento de agua. Los factores que influyen en el uso del agua son los hábitos culturales, el patrón y nivel de vida, si es que se cobra el agua, y el costo y calidad de la misma.

El uso del agua para fines domésticos puede subdividirse en varias categorías:

- bebida
- preparación de alimentos y cocina
- limpieza, lavado e higiene personal
- uso del agua para huertos
- abrevadero del ganado
- otros usos, incluyendo eliminación de desechos

Las conexiones domiciliarias individuales ofrecen un nivel mayor de servicio que un grifo colocado en el patio de la casa ("conexión de patio"), el que, a su vez, es generalmente preferido a un punto de agua comunal, tal como lo es un pozo en el poblado o una fuente pública. Por lo general, los recursos financieros son un factor importante en la selección del tipo de sistema de abastecimiento de agua, y la elección también depende de la ubicación y tamaño de la comunidad, las condiciones geográficas y la disponibilidad de fuentes de agua.

Los datos sobre el uso y consumo del agua se expresan frecuentemente en litros per cápita (cabeza) por día (l.c.d.)\*. Aunque tales datos no toman en cuenta el hecho de que en una casa una parte considerable del uso del agua es compartido por todos los miembros de una familia (por ejemplo, cocina, limpieza), los datos sobre el uso diario del agua per cápita son útiles para realizar estimados que se aproximen a la demanda de agua de una comunidad.

En el Cuadro 3.1 se presenta una lista de los datos del uso típico del agua doméstica para diferentes tipos de sistemas de abastecimiento.

---

(\*) Antiguamente era común expresar los datos del uso del agua per cápita en galones por día.

## Cuadro 3.1

## Uso típico del agua doméstica

Tipo de abastecimiento de agua	Consumo típico de agua (litros/cabeza/día)	Escala (litros/cabeza/día)
Punto de agua comunal (por ejemplo, pozo de poblado, fuente pública)		
- a distancia considerable ( 1,000 m)	7	5 - 10
- a distancia media (500 - 1000 m)	12	10 - 15
Pozo de poblado		
- distancia a pie 250 m	20	15 - 25
Fuente pública comunal		
- distancia a pie 250 m	30	20 - 50
Conexión de patio (grifo colocado en el patio de la casa)		
	40	20 - 80
Conexión de casa		
- grifo simple	50	30 - 60
- grifo múltiple	120	70 - 250

Algunas veces es más fácil determinar el número de casas (familias) en una comunidad que determinar el número de individuos, y por lo tanto el uso doméstico del agua puede calcularse usando un tamaño promedio estimado de familia.

Por lo general, el agua de abastecimiento de agua para la comunidad también se utiliza en otros usos que no son domésticos, y en tales casos se deben proveer cantidades adicionales de agua para estas categorías. El Cuadro 3.2 proporciona datos indicativos.

Todos los requerimientos de agua mencionados deben ser usados sólo para el planeamiento preliminar y para propósitos de diseño. Pueden servir como una guía aproximativa. Para el diseño final, se necesita de criterios que sean específicos para el país o área considerada. Los estudios de sistemas existentes de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades en la misma área pueden proporcionar datos muy útiles del uso del agua. Se deben tomar mediciones del uso del agua en el terreno cuando sea posible.

Es muy difícil estimar con precisión la demanda futura de agua de una comunidad y el ingeniero de diseño debe ejercer juicio considerable cuando haga sus análisis.

Cuadro 3.2  
Diversos requerimientos de agua

Categoría	Uso típico del agua
- Escuelas	
. Escuelas diurnas	15 - 30 l/día por alumno
. Internados	90 - 140 l/día por alumno
- Hospitales	
(con instalaciones de lavandería)	220 - 300 l/día por cama
- Hosterías	80 - 120 l/día por residente
- Restaurantes	65 - 90 l/día por sitio
- Mezquitas	25 - 40 l/día por visitante
- Cines	10 - 15 l/día por sitio
- Oficinas	25 - 40 l/día por persona
- Estaciones de ferrocarril y de ómnibus	15 - 20 l/día por usuario
- Ganado	
. Ganado vacuno	25 - 35 l/día por cabeza
. Caballos y mulas	20 - 25 l/día por cabeza
. Ovejas	15 - 25 l/día por cabeza
. Cerdos	10 - 15 l/día por cabeza
- Aves de corral	
. Pollos	15 - 25 l/día por 100

Las cifras del uso de agua proporcionadas anteriormente incluyen aproximadamente un 20% de tolerancia por pérdidas de agua y por derroches. Si hay fugas o extracciones no autorizadas del agua del sistema de distribución en medida considerable, el abastecimiento requerido de agua obviamente será mayor. En algunos casos, estas pérdidas de agua pueden llegar al 30-50% del abastecimiento.

Como un estimado tentativo, un sistema de abastecimiento de agua para un asentamiento comunal más o menos centralizado necesitaría tener una capacidad de:

- . aproximadamente 0.3 l/seg. por 1000 personas cuando se distribuye el agua principalmente por medio de fuentes públicas.
- . aproximadamente 1.5 l/seg (o más) por 1000 personas cuando predominan conexiones de patio o domiciliarias.

Para tener en cuenta el futuro crecimiento de la población y un mayor uso del agua por persona (o por casa), un sistema de abastecimiento de agua a la comunidad debería tener una capacidad adicional suficiente. El diseño se basa típicamente en:



- la demanda diaria de agua estimada para el fin de un período específico (el "período de diseño"), por ejemplo, 10 años;
- o
- la demanda actual de agua más el 50%;
- o
- la demanda calculada sobre la base del crecimiento estimado de población.

Se puede leer el "factor de crecimiento de la población" en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3  
Factor de crecimiento de la población

Período de diseño (años)	Tasa de crecimiento anual			
	2%	3%	4%	5%
10	1.22	1.34	1.48	1.63
15	1.35	1.56	1.80	2.08
20	1.49	1.81	2.19	2.65

Un sistema de abastecimiento público de agua también debería ser capaz de abastecer la demanda máxima horaria (o demanda "pico") que ocurra en el día (ver: Capítulo 18 "Transmisión del agua" y 19 "Distribución del agua").

### 3.2 CALIDAD DEL AGUA

La relación entre la calidad del agua y los efectos en la salud ha sido estudiada para cada una de las muchas características de la calidad del agua. Un examen de la calidad del agua es básicamente una determinación de los organismos y de los compuestos minerales y orgánicos contenidos en el agua.

Los requerimientos básicos para el agua potable establecen que ésta debería ser:

- Libre de organismos patógenos (causantes de enfermedades).
- No contener compuestos que tengan un efecto adverso, agudo o crónico sobre la salud humana.
- Aceptablemente clara (por ejemplo, baja turbiedad; poco color).
- No salina (salobre).
- Que no contenga compuestos que causen sabor u olor desagradables.
- Que no cause corrosión o incrustaciones en el sistema de abastecimiento de agua, ni que manche la ropa lavada con ella.

Para su rápida aplicación en la práctica de ingeniería, los resultados de los estudios e investigaciones sobre la calidad del agua de bebida deben ser presentados bajo la forma de guías prácticas. Por lo general, esto toma la forma de un cuadro que da para un número seleccionado de parámetros de calidad del agua, el nivel deseable más elevado y el nivel máximo permisible. Se debe considerar tales valores sólo como indicativos y no se les debería tomar como estándares absolutos.

El parámetro más importante de la calidad del agua de bebida (agua potable) es la calidad bacteriológica, por ejemplo, el contenido de bacterias y virus. No es factible examinar el agua para todos los organismos que posiblemente pudiera contener. En lugar de esto, se examina el agua para descubrir la presencia de un tipo específico de bacterias que se originan en grandes números de la excreta animal y humana y cuya presencia en el agua es indicativa de contaminación fecal. Tales bacterias indicativas deben ser específicamente fecales y no de vida libre fuera de las heces. Las bacterias fecales pertenecen a un grupo mucho mayor de bacterias, las coliformes. Muchos tipos de bacterias coliformes están presentes en el suelo. Aquellos coliformes conocidos como Escherichia-coli (E-coli) y Streptococo fecal son bacterias indicadoras adecuadas de contaminación fecal. Tienen la capacidad de una fácil multiplicación. Cuando se encuentra estas bacterias en el agua, ello indica una contaminación fecal bastante fresca y, sobre esta base, que exista entonces la posibilidad de la presencia de bacterias patógenas y virus. Una de estas, las bacterias coliformes y las estreptocócicas, o ambas, pueden ser usadas como organismos indicadores.

Es probable que se encuentre bacterias fecales en casi todos los sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades. No tendría sentido condenar todos los sistemas que contengan cierta contaminación fecal, especialmente cuando la fuente alternativa de agua está mucho más contaminada. En lugar de esto, un examen de la calidad bacteriológica del agua debería determinar el nivel de contaminación fecal y el grado de contaminación de cualquier fuente alternativa.

Se debería recolectar muestras de agua en botellas estériles de acuerdo a un procedimiento estándar. Se deberá poner estas muestras a la sombra y mantenerlas lo más frescas posibles. Es necesario realizar el análisis bacteriológico de las muestras dentro de pocas horas después de su recolección; de lo contrario, los resultados serán poco confiables.

Hay dos métodos para llevar a cabo análisis sobre los niveles de coli fecal y estreptococo fecal en el agua: el método de tubo múltiple para establecer el número más probable (N.M.P.) y el método de filtración por membrana (o de membrana filtrante).

En el método de tubo múltiple, se incuban pequeñas cantidades medidas de la muestra de agua en 5 ó 10 frascos pequeños que contengan un caldo nutriente selectivo. Se puede estimar el número más probable (N.M.P.) de bacterias en la muestra sobre la base del número de frascos que manifiesten signos de crecimiento bacteriano.

En el método de filtración por membrana se filtra el agua a través de una membrana de papel especial que retiene las bacterias. Luego, se coloca la membrana en un medio nutriente selectivo y se le incuba. Las bacterias se multiplican formando colonias visibles que pueden ser contadas. El resultado se expresa como número de bacterias por 100 ml de agua. Se puede hacer recuentos directos de coli fecal y de estreptococo fecal en 24 y 48 horas respectivamente. No hay necesidad de pruebas confirmativas para verificar las especies de bacterias como en el método de tubo múltiple.

El equipo y materiales necesarios para el método de tubo múltiple para el coli fecal son más baratos y generalmente se dispone de ellos con mayor facilidad en países en desarrollo, que el caso del método de filtración por membrana. El problema de usar el método de tubo múltiple para estreptococo fecal es que el tiempo de incubación requerido de 5 días no es tan práctico. El método de filtración por membrana es aplicable tanto para el coli fecal como para el estreptococo fecal. Ofrece resultados rápidos que son fáciles de interpretar y bastante precisos. Las pruebas de la membrana se pueden realizar en el sitio, en la parte trasera del vehículo. El equipo de tubo múltiple es frágil y requiere de provisiones especiales durante el transporte. Tomando en consideración todos los factores, el método de filtración por membrana es el más recomendable.

En cualquiera de los métodos, las instalaciones para la incubación constituyen la restricción principal. La dificultad radica en el control exacto de la temperatura. Para el coli fecal, la incubación debería estar a una temperatura exacta controlada de  $44.5^{\circ} \text{C} \pm 0.2^{\circ} \text{C}$ . Este grado de control de la temperatura no es fácil de lograr en una incubadora bajo condiciones de campo, pero comercialmente se dispone de incubadoras portátiles especiales que pueden mantener la temperatura dentro del estrecho margen requerido. Ellas son relativamente caras (varios cientos de dólares, o más) y necesitan de una fuente de energía, tal como la batería del carro, para operar. Si no es posible la incubación con un control exacto de la temperatura, la práctica recomendable es que sólo se debería hacer el recuento del estreptococo fecal. Para este recuento se requiere una incubación de  $35 - 37^{\circ} \text{C}$  que se puede obtener con mayor facilidad.

Donde esto sea posible, se debería hacer un examen tanto para el coli fecal como para el estreptococo fecal. Esto proporcionará una verificación importante sobre la validez de los resultados. También da una base para calcular la proporción en la que están presentes las dos especies de bacteria, de lo cual se puede obtener una conclusión tentativa de si la contaminación fecal es de origen animal o humano.

Los siguientes criterios de calidad bacteriológica son, por lo general, aplicables a pequeños abastecimientos de agua de bebida:

.Coliformes (número promedio presente en el agua de bebida muestreada)	-	- inferior a 10 por 100 ml*
.E. coli	-	- inferior a 2.5 por 100 ml*

Hay casos en que el agua de un abastecimiento público es bacteriológicamente aceptable, aunque no sea adecuada como agua potable debido a excesivo contenido de compuestos orgánicos o minerales. Los principales problemas los causan el hierro y el manganeso, el fluoruro, el nitrato, la turbiedad y el color.

El Cuadro 3.4 ofrece guías de referencia sobre algunos de estos y otros parámetros de calidad del agua.

Estas guías o pautas sobre la calidad del agua deberían aplicarse siempre con sentido común, particularmente en abastecimientos de agua para pequeñas comunidades y en abastecimientos rurales de agua, en donde la alternativa de la fuente y las oportunidades para el tratamiento son limitadas. Los criterios en sí no deberían ser la base para el rechazo de una fuente de agua subterránea que tenga valores algo más altos para el hierro, manganeso, sulfatos o nitratos que los que muestra el cuadro. Se debe tener cuidado, respecto a sustancias tóxicas tales como metales pesados. Se debería aceptar estas sustancias sólo después que se haya obtenido la opinión experta de las autoridades de salud.

Muchos países en desarrollo tienen como meta en su actual práctica de abastecimiento de agua, cumplir, en tanto les sea posible, las pautas anteriores que se derivan de las recomendaciones formuladas por la Organización Mundial de la Salud.

---

(\*) Determinado estadísticamente como número más probable (N.M.P.) o medidas por recuento de membrana.

Cuadro 3.4  
Pautas para la calidad del agua de bebida

Parámetro de la calidad del agua	Medido como	Mayor nivel deseable	Máximo nivel permisible
Total de sólidos disueltos*	mg/l	500	2000
Turbiedad	UHT	5	25
Color	mg Pt/l	5	50
Hierro	mg Fe <sup>+</sup> /l	0.1	1.0
Manganeso	mg Mn <sup>++</sup> /l	0.05	0.5
Nitrato	mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	50	100
Nitrito	mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	1	2
Sulfato	mg SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> /l	200	400
Fluoruro	mg F <sup>-</sup> /l	1.0	2.0
Sodio	mg Na <sup>+</sup> /l	120	400
Arsénico	mg As <sup>+</sup> /l	0.05	0.1
Cromo (hexavalente)	mg Cr <sup>6+</sup> /l	0.05	0.1
Cianuro	mg CN <sup>-</sup> /l	0.1	0.2
Plomo	mg Pb/l	0.05	0.10
Mercurio	mg Hg/l	0.001	0.005
Cadmio	mg Cd/l	0.005	0.010

(\*) Esto incluye las principales sales o aniones y cationes disueltos tales como SO<sub>4</sub><sup>--</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> y Na<sup>+</sup>. Los niveles indicados dependen del clima, tipo de alimento y carga de trabajo del usuario del agua. En algunos casos registrados, la gente ha vivido por meses con agua que tenía un contenido total de sólidos disueltos en exceso de 5000 mg/l.

Aunque la autoridad de agua puede tomar a su cargo la realización de los análisis de calidad del agua sobre una base regular y sistemática, las autoridades de salud deberían dar la aprobación final y controlar la calidad del agua en última instancia.



Foto Naciones Unidas

Figura 3.1  
Muestreo del agua (Gabon)

Para los abastecimientos pequeños que frecuentemente provienen de pozos individuales, pozos excavados o manantiales, los criterios de calidad del agua dados anteriormente puede que tengan que ser suavizados. Obviamente, en todos los casos debe hacerse todo lo posible por limitar los riesgos de contaminación del agua. Usando medidas relativamente simples, tales como el revestimiento y cobertura de un pozo, sería posible reducir el contenido bacterial del agua (medido como recuento de coliformes) a menos de 10 por

100 ml, aun para el agua de un pozo superficial. El continuo fracaso en alcanzar este índice, y en especial si el E. coli se encuentra repetidamente, llevaría como regla general a la clausura del abastecimiento.\*

Es esencial que se realice una inspección sanitaria para la interpretación adecuada de los análisis químicos y bacteriológicos de los abastecimientos de agua de bebida. Se puede detectar muchos riesgos potenciales mediante una visita y estudio cuidadoso de la fuente de agua, de las instalaciones de tratamiento y del sistema de distribución. No se puede sustituir ninguna prueba bacteriológica o química si se desea tener un conocimiento completo del sistema de abastecimiento de agua y las condiciones bajo las cuales tiene que operar. Las muestras representan un instante fijo en el tiempo, e incluso cuando se toman y analizan muestras regularmente, puede ser que no revelen la contaminación, especialmente cuando ésta es intermitente, estacional y casual.

En el Anexo 1 se proporciona pautas para exámenes sanitarios y en él se enumeran factores esenciales que se deben investigar o considerar.

---

(\*) Estándares Internacionales para el Agua Potable (III Edición)  
Organización Mundial de la Salud, Ginebra, 1971.

CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA

Camp, T.R.  
WATER AND ITS IMPURITIES  
Reinhold Book Corp., Nueva York, 1968

Chalapatiroa, U.  
PUBLIC HEALTH ASPECTS OF VIRUSES IN WATER  
En: Journal of the Indian Water Works Association, 1975, No. 1, pp. 1-7

Giroult, E.  
ENSURING THE QUALITY OF DRINKING WATER  
En: WHO Chronicle, 1977, No. 8, pp. 316-320

INTERNATIONAL STANDARDS FOR DRINKING WATER  
World Health Organization, Ginebra, 3rd revised edition, 1971, 70 p.

LES VIRUS HUMAIN DANS L'EAU, LES EAUX USEES ET LE SOL  
Organisation Mondiale de la Santé, Ginebra, 1979  
(Rapport Technique 639)

Pescod, M.D.; Hanif, M.  
WATER QUALITY CRITERIA FOR TROPICAL DEVELOPING COUNTRIES  
Asian Institute of Technology, Bangkok, 1972, 11 p.

Ponghis, G.  
MINIMUM REQUIREMENTS FOR BASIC SANITARY SERVICES IN HUMAN SETTLEMENTS IN  
DEVELOPING COUNTRIES  
World Health Organization, Ginebra, 1972

Rajagopalan, S.; Shiffman, M.A.  
GUIDE ON SIMPLE SANITARY MEASURES FOR THE CONTROL OF ENTERIC DISEASES  
World Health Organization, Ginebra, 1974

SIMPLIFIED PROCEDURES FOR WATER EXAMINATION - A LABORATORY MANUAL  
American Water Works association, Nueva York, 1975, 158 p.  
(supplement published in 1977)

SURVEILLANCE OF DRINKING WATER QUALITY  
World Health Organization, Ginebra, 1976, 135 p.  
WHO Monograph Series No. 63)

Tebbutt, T.H.Y.  
PRINCIPLES OF WATER QUALITY CONTROL (2nd Edition)  
Pergamon Press, 1977

White, J.F.; Bradley, D.J.; White, A.U.  
DRAWERS OF WATER: Domestic water use in East Africa  
The University of Chicago Press, Chicago, 1972





## 4. FUENTES DE AGUA

### 4.1 OCURRENCIA DEL AGUA E HIDROLOGIA

El primer paso en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua es seleccionar un fuente adecuada o una combinación de fuentes de agua. La fuente debe ser capaz de abastecer agua en cantidad suficiente a la comunidad. De lo contrario, se requerirá otra fuente o quizás varias.

El agua de la tierra, ya sea como vapor de agua en la atmósfera, como agua de superficie en los ríos, arroyos, lagos, mares y océanos, o como agua subterránea en los estratos subsuperficiales, no se halla en la mayoría de los casos inmóvil, sino en un estado de movimiento continuo de recirculación. A esto se le llama el ciclo hidrológico (Fig. 4.1).

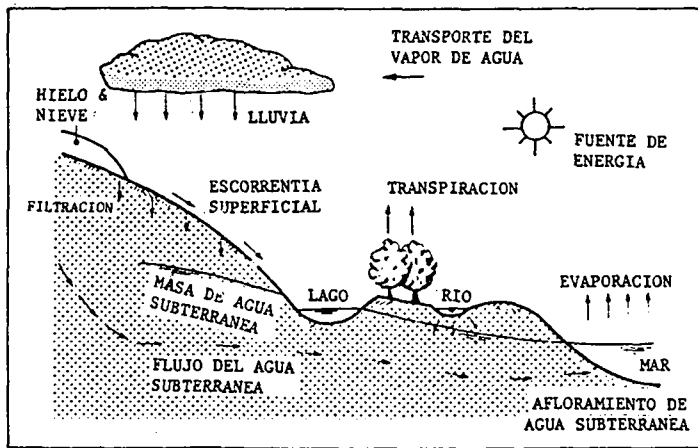


Figura 4.1  
Ciclo hidrológico

Las fuerzas determinantes de este ciclo son la energía solar y la gravedad de la tierra. El agua de la atmósfera precipita en forma de lluvia, granizo, escarcha y nieve o se condensa en el suelo o en la vegetación. No toda esta agua se suma a los recursos de superficie o de agua subterránea, ya que parte de ella se evapora o regresa directamente a la atmósfera. Otra parte es interceptada por la vegetación o es retenida en el suelo, humedeciendo la capa vegetal superior.

El agua que se acumula en la superficie del suelo en forma de estanques y pantanos está expuesta a la evaporación\*. Parte del agua acumulada fluye en forma de escorrentía superficial hacia las corrientes, ríos y lagos. Otra parte se filtra en el suelo. Esta agua puede fluir ya sea a poca profundidad bajo el suelo hacia los cursos abiertos de agua, o puede

(\*) La evaporación sucede en cualquier superficie de agua. La transpiración es la pérdida de agua de las plantas. Todas las plantas toman agua a través de sus raíces y la exudan a través de la transpiración de sus hojas.

filtrarse más hacia abajo para llegar a los estratos más profundos de agua subterránea. Ni el agua subterránea superficial ni el agua subterránea profunda están estancadas; fluyen subterráneamente en dirección de la inclinación de la masa de agua subterránea. Tarde o temprano el agua emerge otra vez a la superficie, ya sea en forma de un manantial o como efusión de agua subterránea en un río o lago. El agua es devuelta a la atmósfera desde los arroyos, ríos, lagos, mares y océanos a través de la evaporación. Se inicia entonces nuevamente todo el proceso de recirculación.

Evidentemente, la mayor parte del agua de la tierra se encuentra en los océanos y mares. Sin embargo, esta agua es salina. La cantidad de agua dulce (o fresca) es inferior al 3%, aproximadamente dos tercios de la cual está bloqueada en capas de hielo y glaciares. El agua dulce contenida en el subsuelo y en todos los lagos, ríos, corrientes, arroyos, estanques y ciénagas, totaliza menos del 1% de la existencia de agua en el mundo.

La mayor parte de esta agua dulce líquida se encuentra en el subsuelo, un estimado de 6'000,000 km<sup>3</sup> de ésta se encuentra dentro de los 50 m de profundidad y 2'000,000 km<sup>3</sup> se hallan a una profundidad mayor. En contra de la creencia popular, la cantidad de agua fresca en lagos, ríos y corrientes es pequeña, aproximadamente 200,000 km<sup>3</sup> de agua. La atmósfera contiene únicamente 13,000 km<sup>3</sup> de agua. El Cuadro 4.1 ofrece una vista general de las tasas promedio de precipitación y evaporación para los diferentes continentes.

Sin embargo, los datos hidrológicos globales y continentales son de poca utilidad para el ingeniero de abastecimiento de agua, aparte de recordarle que todos los recursos de agua están interconectados y forman parte del ciclo hidrológico global. El ingeniero necesita información en relación a la cantidad de lluvia, el flujo de los ríos y arroyos, la cantidad y profundidad del agua subterránea y las tasas de evaporación. Muy rara vez se dispone de esta clase de información, así que será necesario tomar medidas en el terreno o extrapolar datos de los registros que se disponga.

#### Cuadro 4.1

Tasas de precipitación y evaporación por continente

Continente	Precipitación mm/año	Evaporación mm/año	Escorrentía mm/año
Africa	670	510	160
Asia	610	390	220
Europa	600	360	240
América del Norte	670	400	270
América del Sur	1350	860	490
Australia y Nueva Zelandia	470	410	60
Valores promedios derivados después de ponderarlos de acuerdo al área	725	482	243

## 4.2 CALIDAD DE FUENTES DE AGUA

Tanto el agua de superficie como el agua subterránea proceden en gran parte de la lluvia. Toda el agua de lluvia tiene constituyentes que son tomados o "lavados" de la atmósfera. Los gases atmosféricos están disueltos en las gotas de lluvia. Sobre los océanos y mares, las sales son tomadas del fino vapor que orea la superficie del agua. Sobre las áreas terrestres, particularmente en las regiones secas, las partículas de polvo son "lavadas" por la lluvia.

El agua de lluvia es por lo general ligeramente ácida debido a su reacción con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera para formar ácido carbónico. Cuando el agua de lluvia toma contacto con los contaminantes gaseosos en la atmósfera, como el dióxido de azufre, (por ejemplo, de volcanes, industrias) puede volverse bastante ácida, causando problemas de corrosión y de sabor amargo. Sin embargo, en áreas rurales éste no es un problema común.

Después de alcanzar la superficie del suelo el agua de lluvia forma escorrentías en la superficie o flujos de agua subterránea. Recogerá en sus recorridos cantidades considerables de compuestos minerales y de materia orgánica, desechos de origen vegetal y animal, partículas del suelo y microorganismos. Puede recoger fertilizantes e insecticidas en áreas donde se les utiliza en la agricultura. Mientras fluye en forma subterránea, el agua extraerá, disolviéndolos o llevándolos en suspensión, elementos constituyentes de los estratos del suelo, en particular carbonatos, sulfatos, cloruros, calcio, magnesio y sales de sodio. Así el contenido total de sólidos disueltos en el agua aumenta. Al mismo tiempo, se produce la filtración removiendo sólidos suspendidos. Algunas sustancias orgánicas se degradan por acción biológica. La adsorción y otros procesos pueden dar como resultado la remoción de bacterias y de sólidos suspendidos y disueltos.

En lugares en donde están presentes cantidades considerables de materia orgánica, ya sea en el subsuelo (por ejemplo, turba), o en el agua de filtración, el contenido de oxígeno del agua subterránea puede agotarse a través de procesos microbianos. Como resultado de esto, pueden ocurrir ciertas reacciones químicas a través de las cuales se forman amoníaco y sulfuro de hidrógeno de los nitratos y sulfatos presentes en el suelo. En forma similar, el hierro y el manganeso pudieran estar disueltos en el agua.

Cuando el agua subterránea está presente a poca profundidad (por ejemplo, menos de 10 metros), se puede contaminar con fuentes de contaminación fecal tales como letrinas o tanques sépticos. Las bacterias patógenas o virus provenientes de estas fuentes de contaminación pueden ser transportadas por el agua subterránea, aunque tienden a adherirse por adsorción a las partículas sólidas del suelo. Cuando se evalúa los posibles riesgos para la salud de las fuentes de agua subterránea, se debería prestar mayor atención al tiempo de recorrido del agua a través de los estratos del suelo, que a la distancia que el agua tiene que recorrer hasta el punto de extracción. En la piedra caliza, formaciones cársticas y rocas fisuradas, la contaminación humana puede transportarse a una distancia de varios kilómetros. En las

formaciones arenosas, el flujo del agua subterránea es mucho más lento, de tal forma que sólo debe considerarse la contaminación de fuentes cercanas cuando se selecciona el punto de extracción del agua subterránea.

Tanto la escorrentía superficial como el agua subterránea llegarán finalmente a los arroyos, ríos y lagos en donde el agua está expuesta a la contaminación de la vida humana y animal, de la vegetación, plantas y algas. Muchos ríos en áreas tropicales tienen grandes cantidades de sólidos suspendidos y de turbiedad, especialmente bajo condiciones de inundación. La calidad de esta agua varía considerablemente con la lluvia. En la estación seca, la materia orgánica frecuentemente colorea el agua de río.

En el agua de superficie son importantes los procesos de autopurificación. La aeración llevará el oxígeno de la atmósfera al agua con una liberación simultánea de dióxido de carbono. En lagos y reservorios, la materia suspendida sedimenta, de tal forma que el agua se aclara. La materia orgánica se consumirá a través de procesos bioquímicos, y habrá una eliminación de bacterias intestinales, virus y microorganismos similares. Generalmente, el agua puede recuperar su calidad original, si no se introduce otra contaminación. Sin embargo, los lagos algunas veces están sujetos al crecimiento excesivo de algas. Los "hafirs" ("ojos de agua"), las represas pequeñas y los estanques tienen características similares. Casi toda el agua de la superficie requerirá cierto tratamiento antes de que pueda ser usada para la bebida y para propósitos domésticos.

#### 4.3 SELECCION DE LA FUENTE DE AGUA

El proceso de selección de la fuente de agua más adecuada para su desarrollo en una fuente pública, depende grandemente de las condiciones locales. En lugares en donde se dispone de un manantial de capacidad suficiente, éste puede ser la fuente de abastecimiento más adecuada.

En lugares donde no se dispone de manantiales, o en los que éstos no son aptos para su desarrollo, generalmente la mejor opción es explorar los recursos de agua subterránea. Para abastecimientos pequeños, por lo general serán adecuados los simples métodos prospectivos de exploración. Para abastecimientos más grandes, es probable que se necesite investigaciones geohidrológicas más extensas, usando métodos y técnicas especiales. Se puede considerar los drenes de filtración (o galerías filtrantes) para fuentes de agua subterránea de poca profundidad. Los pozos excavados pueden ser adecuados para llegar al agua subterránea que está a profundidad media. Los pozos entubados, por lo general, son más adecuados para extraer el agua de los estratos más profundos que contengan agua. Sin embargo, hay condiciones en las cuales se puede usar los pozos entubados ventajosamente para ubicar fuentes superficiales de agua subterránea.

Los pozos excavados a menudo están dentro de las capacidades locales de construcción, mientras que la perforación de pozos entubados requerirá equipo más sofisticado y experiencia considerable. En algunos casos, la única opción disponible puede que sea la perforación. Si no se dispone

de agua subterránea, o en lugares en donde los costos de excavación de un pozo o perforación de un pozo entubado son demasiado elevados, será necesario considerar el agua de superficie de fuentes tales como ríos, arroyos o lagos. Casi siempre el agua de superficie habrá de requerir algún tipo de tratamiento para hacerla segura para el consumo y el uso humano. Es preciso considerar cuidadosamente los costos y dificultades asociados con el tratamiento del agua, particularmente los problemas diarios de operación y mantenimiento involucrados en las plantas de tratamiento de agua.

En lugares en donde el patrón de lluvia permite la recolección del agua pluvial y donde se puede proveer el almacenamiento durante períodos de sequía, la recolección de agua pluvial puede servir perfectamente para abastecimientos a la comunidad de tipo casero o de pequeña escala. Con grandes áreas de captación se obtendrá cantidades considerables de agua. Algunas veces se usa el agua pluvial en conjunción con otras fuentes para suplir otro abastecimiento, particularmente si éste tiene un mantenimiento pobre y sufre de desperfectos y paralizaciones.



FUENTES DE AGUA

Balek, J.

HYDROLOGY AND WATER RESOURCES IN TROPICAL AFRICA  
Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1978

Bear, J.; Issar, A.; Litwin, Y.

ASSESSMENT OF WATER RESOURCES UNDER CONDITIONS OF SCARCITY OF DATA En:  
Water Supply, Proceedings of the Conference on rural Water Supply, Abril,  
1971,  
University of Dar-es-Salaam, pp. 151-186

GROUNDWATER IN AFRICA

United Nations, Nueva York, 1973, 170 p.  
(ST/ECA/147 Sales No. E71.11.16)

GROUNDWATER IN THE WESTERN HEMISPHERE

United Nations, Nueva York, 1976, 337 p.  
(ST/ECA/35 Sales No. E76.11.A.5)

Hammer, M.J.; MacKichan, K.A.

HYDROLOGY AND QUALITY OF WATER RESOURCES  
John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1980, 408 p.

Institute of Water engineers

MANUAL OF BRITISH WATER ENGINEERING PRACTICE, Vol. II  
W. Heffer & Sons, Londres

Jain, J.K.

INDIA: UNDERGROUND WATER RESOURCES  
En: Phil., Trans. Royal Society, Londres, (1977), pp. 505-524

James, L.D.

ECONOMICS OF WATER DEVELOPMENT IN LESS DEVELOPED COUNTRIES  
En: Water Supply and Management, Vol. 2(1978), No. 4, pp. 737-386

Leeden, F. v.d. (Ed.)

WATER RESOURCES OF THE WORLD, SELECTED STATISTICS  
Water Information Centre, Inc., Port Washington, 1975, 232 p.

MORE WATER FOR ARID LANDS

National Academy of Sciences, Washington, D.C. 1974, 153 p.

Rodda, J.C.; Downing, R.A.; Law, F.M.

SYSTEMATIC HYDROLOGY  
Newnes-Butterworth, Londres, 1976

Stern, P.H.

RURAL WATER DEVELOPMENT IN ARID REGIONS

Paper presented at IAWPR Symposium: Engineering, Science and Medicine in  
the prevention of Tropical Water Related Disease; Londres, 1978.  
En: Progress in Water Technology, Vol. 2(1979) Nos. 1 and 2.



United Nations

RESOURCES AND NEEDS, ASSESSMENT OF THE WORLD WATER SITUATION

En: Water Supply and Management, Vol. 1, No. 3, 1977, pp. 273-311  
(Principal Background Paper E/Conf. 70/CBP/1 of UN Water Conference)

Wilson, E.M.

ENGINEERING HYDROLOGY

Macmillan Book Co., Londres, 1971 (3rd edition).

## 5. RECOLECCION DEL AGUA PLUVIAL

### 5.1 AGUA PLUVIAL COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

En diversas partes del mundo se ha construido desde tiempos remotos captaciones y reservorios para el almacenamiento de agua pluvial y algunos se han preservado hasta nuestros días. El agua pluvial se recolecta conforme se escurre por techos o sobre suelos naturales, caminos, patios o áreas de captación especialmente preparadas. Fuentes históricas mencionan el uso del agua pluvial hace unos 4000 años para el abastecimiento doméstico de agua en la región del Mediterráneo. Las aldeas y ciudades romanas fueron planificadas para obtener provecho del agua pluvial para el abastecimiento de agua de bebida. En las colinas cerca a Bombay en India, las celdas monásticas de los antiguos Budistas tenían una serie intrincada de canales y cisternas cortadas en la roca para proveer agua doméstica durante todo el año.

En muchos países de Europa y Asia, la recolección de agua pluvial fue usada ampliamente para la provisión de agua de bebida, particularmente en áreas rurales. Aún se la practica en algunos países. Sin embargo, en lugares en donde se proveyeron abastecimientos de agua entubada, disminuyó la importancia del agua pluvial como fuente de abastecimiento.

En algunas islas tropicales el agua pluvial sigue siendo la única fuente de abastecimiento doméstico de agua. En zonas áridas y semiáridas, en donde la gente en su mayoría vive en asentamientos dispersos o nómades, la recolección del agua de lluvia puede ser un medio necesario de abastecimiento de agua para fines domésticos. Este es especialmente el caso en lugares en donde no se dispone de los recursos de agua subterránea o es demasiado costoso el extraerla. En los países en desarrollo se utiliza algunas veces el agua pluvial para complementar el abastecimiento de agua entubada.

Se debería considerar la recolección del agua de lluvia en los países en donde la precipitación pluvial es fuerte en tormentas de intensidad considerable, con intervalos en los cuales prácticamente no hay lluvia o hay muy poca lluvia. Ello requiere tomar las providencias adecuadas para la captación, colección y almacenamiento del agua. Dependiendo de las circunstancias, la captación del agua se hace en el suelo, o se recolecta el agua que escurre por los techos.

### 5.2 CAPTACION DE AGUA EN LOS TECHOS

Se puede recolectar agua pluvial razonablemente pura de los techos de casas, hechos de tejas, esquistos, hierro galvanizado (corrugado), aluminio o planchas de asbesto-cemento. Los techos de paja o de plomo no son adecuados debido a los riesgos para la salud. Si el agua pluvial es muy corrosiva se requiere cierta precaución con el uso de planchas de asbesto-cemento en el techo para la captación de agua. Las fibras o partículas de asbesto pueden

lixiviarse del material del techo e incorporarse al agua dando como resultado concentraciones relativamente altas de asbesto en el agua pluvial recolectada. El revestimiento de plástico es económico pero no es durable. El fieltro bituminoso y el papel de sisal reforzado son materiales de techado que se han desarrollado recientemente. La pintura del techo, con fines de impermeabilización puede inferir sabor o color al agua pluvial recolectada, y se debe evitar. La Figura 5.1 muestra una captación simple de agua en los techos.

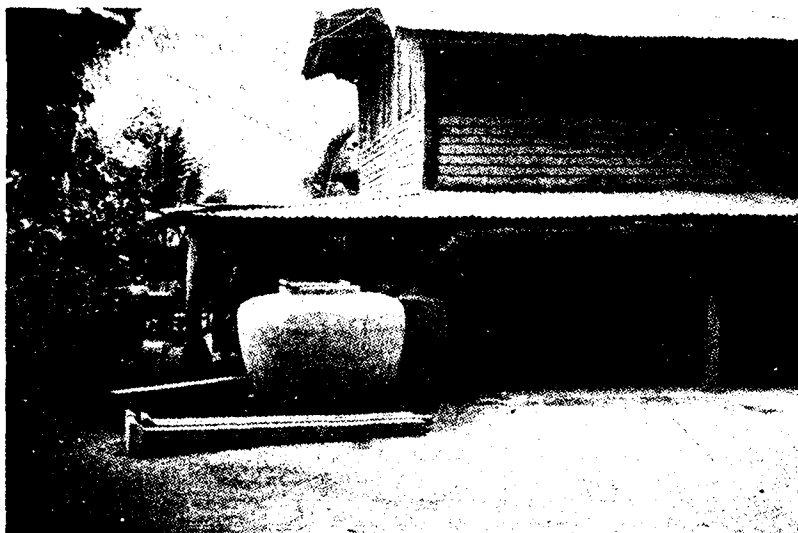


Figura 5.1  
Captación simple en el techo y almacenamiento de agua (Tailandia)

Las canaletas del techo deben tener una inclinación o pendiente pareja hacia la tubería de descenso, porque si se "arquea" se formarán en las canaletas "lagunitas" que pueden convertirse en lugares de reproducción de mosquitos. El polvo, hojas muertas y deyecciones de aves se acumularán en el techo durante períodos secos. Estos depósitos serán lavados por las primeras nuevas lluvias. Puede ser útil arreglar la tubería de descenso de tal forma que la primera agua de cada lluvia ("el chorro sucio") pueda ser separada del contenedor o recipiente de agua clara y se le permita correr al desagüe.

Para salvaguardar la calidad del agua pluvial recolectada se debe limpiar regularmente el techo y las canaletas\*. Se debe colocar una malla de alambre sobre el tope del tubo de descenso para evitar que se atore con material que haya sido arrastrado por lavado.

---

\* Se ha informado que las deyecciones de aves causaron riesgos para la salud (salmonelosis) en Jamaica.

En la Figura 5.2 se muestra un arreglo para separar la primera agua de lluvia que se escurre por el techo.

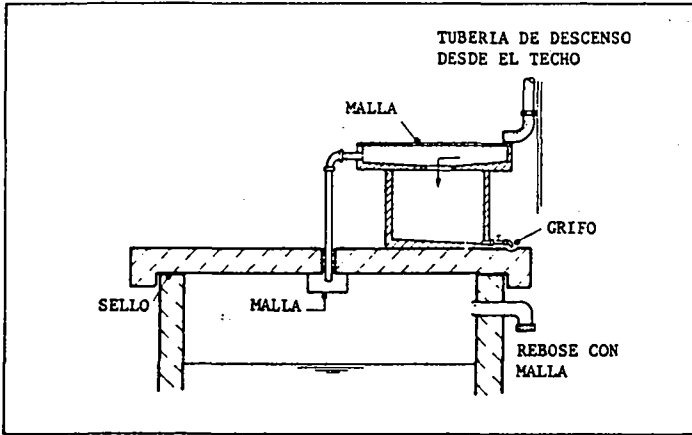


Figura 5.2  
Arreglo para separar el "primer chorro sucio"

Otro arreglo consiste en un tanque subterráneo de almacenamiento que recibe el agua pluvial que se desborda de un recipiente colocado sobre el suelo (Figura 5.3). Así, el recipiente sobre el suelo proporciona agua algunas veces al tanque subterráneo.

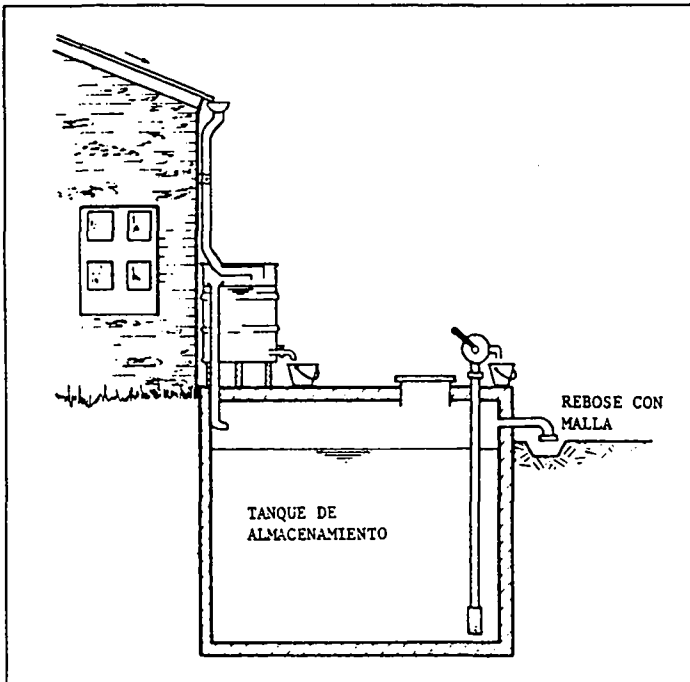


Figura 5.3  
Captación del agua en el techo y almacenamiento del agua pluvial  
(Extracción mediante bomba de mano)

El tamaño del techo dependerá del tamaño de la casa. La cantidad de agua pluvial que puede recolectarse a través de la captación en los techos estará determinada en gran parte por el área efectiva del techo y por la lluvia local anual. Un milímetro de lluvia en un metro cuadrado de techo producirá aproximadamente 0.8 litros de agua, teniendo en cuenta la evaporación y otras pérdidas.

Para un techo que mide 5m x 8m (en planta) y suponiendo un promedio de lluvia anual de 750 mm, la cantidad de agua pluvial que se puede recolectar en un año se puede estimar de la siguiente manera:

$$5 \times 8 \times 750 \times 0.8 = 24,000 \text{ litros/año}$$

$$\text{ó: } \frac{24,000}{365} = 66 \text{ litros/día en promedio}$$

Concediendo un margen para las condiciones en los años que son más secos de lo normal, y también para estaciones secas de duración excepcional, el techo y el almacenamiento deben tener una producción adicional de aproximadamente 50% sobre los requerimientos básicos de agua de la gente que ha de depender del abastecimiento. Con un almacenamiento suficiente, la captación en los techos podría proveer incluso 40 litros/día en un año seco, que es el requerimiento básico de agua doméstica y de bebida de una familia de 6 personas.

Se puede estimar el volumen requerido de almacenamiento calculando las cantidades de agua que serán usadas por la familia en la estación más larga que puede transcurrir sin lluvia. Para períodos cortos de sequía, el volumen necesario de almacenamiento será pequeño y se le podrá proveer utilizando probablemente un simple recipiente de madera, un tambor para petróleo u otro contenedor adecuado. En lugares donde la lluvia varía grandemente durante el año, se necesita considerar que pueden producirse estaciones secas de duración considerable.

Para una estación seca promedio de 3 meses, el volumen de almacenamiento requerido sería  $3 \times 30 \times 40 = 3,600$  litros. Para tener en cuenta períodos más prolongados sin lluvia en años extremadamente secos, se debe proveer una cantidad adicional del 50% y, entonces, el volumen de almacenamiento tendría que ser de 5,400 litros.

### 5.3 CAPTACION DE AGUA EN EL SUELO

Las instalaciones de captación de agua en el suelo se usan para recolectar la escorrentía de agua pluvial. Parte de la precipitación servirá para humedecer el suelo, parte se almacena en depresiones, parte se pierde a través de la evaporación o filtración en el suelo. Se puede obtener una reducción considerable de esas pérdidas de agua tendiendo locetas, tejas, concreto, asfalto o planchas de plástico para formar en el suelo una superficie suave impermeable. Otro método incluye tratamiento químico de la superficie del suelo. Algunas veces simplemente compactar la superficie es lo adecuado.

La cantidad de agua pluvial que puede recolectarse en captaciones en el suelo dependerá de si los elementos de captación son planos o inclinados, y de la impermeabilidad de la capa superior. Mediante la preparación de la superficie del terreno se puede asegurar un flujo de agua lo suficientemente rápido hasta el punto de recolección y almacenamiento con el fin de reducir las pérdidas por evaporación y por filtración.

La porción de agua de lluvia que se puede recolectar fluctúa aproximadamente entre 30% en captadores permeables tendidos en suelo plano, a casi el 90% en captadores colocados en hileras inclinadas (con pendiente) y cubiertos con material impermeable.

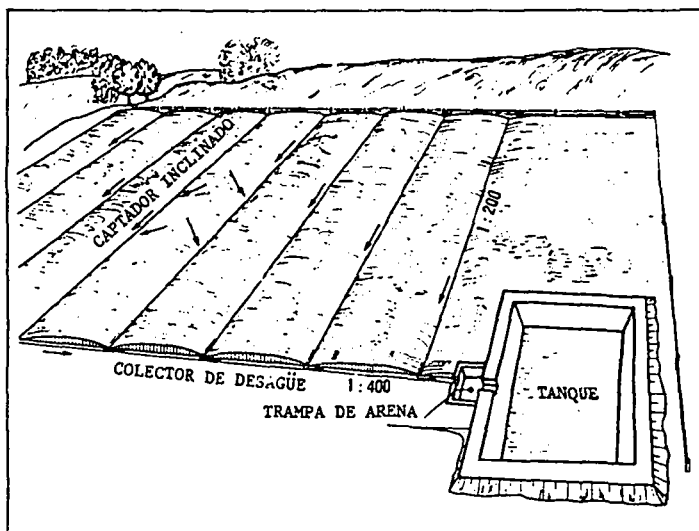


Figura 5.4  
Instalación de captación en el suelo

La alteración del terreno incluye la construcción de zanjas a lo largo de los contornos, la limpieza de rocas y vegetación y la compactación simple del suelo. A menudo se realiza intentos para lograr menores pérdidas por filtración del agua pluvial en el área de captación del suelo. En las colinas ondulantes, la cuidadosa compactación del suelo puede ser suficiente para alcanzar una buena eficiencia de captación. En el terreno plano será necesaria una subdivisión en pequeñas hileras inclinadas con la adecuada preparación de la superficie del terreno.

En los lugares en donde se va a recubrir la superficie de captación de agua en el suelo, se puede usar varios materiales. Se puede considerar las tejas, láminas corrugadas de hierro, asfalto, cemento e incluso materiales como caucho pesado de butilo o láminas gruesas de plástico. Cuando se les aplica en forma apropiada, estos materiales pueden rendir una eficiencia en la captación de agua con una producción hasta del 90% de la escorrentía de agua pluvial del área de captación. Son ventajas adicionales el escaso mantenimiento que demandan y la prolongada vida útil.

Sin embargo, por lo general, estos materiales son demasiado caros para usarlos sobre grandes áreas de captación en el suelo. Se está probando métodos de revestimiento de la superficie de captación, los cuales pueden ser más económicos. Estos incluyen:

- Asfalto en dos capas (de sello y de protección); reforzamiento con plástico o fibra de vidrio y cubierto con grava; y,
- Cera de parafina esparcida como gránulos que se derriten con el sol.

Las membranas delgadas de plástico cubiertas con 1 ó 2 cm de grava, o adheridas a la superficie del terreno mediante alquitrán de bitumen, son mucho más baratas, pero las piedras filosas, las raíces de las plantas o los animales las malogran con facilidad y las reparaciones son difíciles de realizar. Algunas veces la producción de agua de esas instalaciones de captación en el suelo, recubiertas con membranas, es decepcionante (no superior al 30 - 50% de la lluvia). Probablemente se pueda obtener buenos resultados tratando con productos químicos la capa superior de suelo del área de captación. Se puede aplicar sales de sodio que reaccionan con las partículas de arcilla para formar una capa impermeable; o se puede esparcir un revestimiento de bitumen o alquitrán sobre el terreno para bloquear los poros del suelo. Este tipo de tratamiento no es necesariamente caro y se le puede repetir a intervalos regulares (una vez cada cierto número de años) para mantener la impermeabilidad de la instalación de captación.

Estas instalaciones de captación de agua de lluvia en el suelo, si son de tamaño suficiente y si han recibido tratamiento, pueden proveer un abastecimiento doméstico de agua para un buen número de familias, e incluso para toda la comunidad de una aldea, pero necesitan un control y mantenimiento adecuados, y protección contra daños y contaminación. Puede que sea necesario proveer un cercado o vallado. Se necesitará una zanja interceptora de drenaje en el extremo superior del área de captación y un cordón o sardinel elevado alrededor de la circunferencia para evitar la entrada de escorrentía superficial contaminada. Se puede usar una cubierta de césped para reducir la erosión de la captación en el suelo, aunque esto dará como resultado una menor producción. Se puede plantar arbustos y árboles alrededor del área de captación para limitar el ingreso de polvo y de materiales transportados por el viento.

#### 5.4 ALMACENAMIENTO

Las instalaciones de almacenamiento pueden estar sobre o bajo tierra. Cualquiera que sea el tipo de almacenamiento que se escoja, debería cercarse adecuadamente para prevenir que cualquier contaminación proveniente de humanos o animales, hojas, polvo u otros contaminantes, ingrese al contenedor de almacenamiento. Una cubierta hermética asegurará condiciones de oscuridad en el almacenamiento, de tal forma que se evite así el crecimiento de algas y la reproducción de larvas de mosquitos. Por lo general los recipientes abiertos o estanques de almacenamiento no son apropiados como fuentes de agua de bebida.

Hay una amplia variedad de materiales para la construcción de recipientes o contenedores de almacenamiento de agua. Para volúmenes pequeños de almacenamiento se puede usar recipientes de madera, cemento, arcilla o armazones a prueba de agua.

Las instalaciones de almacenamiento bajo tierra tienen la ventaja general de ser frescas y prácticamente no sufren pérdidas de agua por evaporación. También puede haber un ahorro en espacio y en costo de construcción en los lugares donde se moldea el contenedor directamente en el terreno mediante la simple compactación de la tierra. En la Figura 5.5 se muestra un ejemplo.

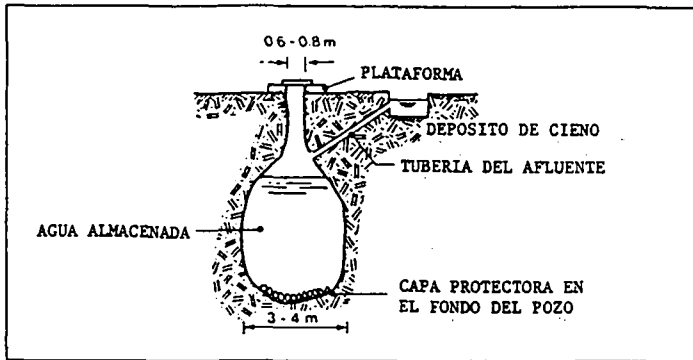


Figura 5.5  
Pozo subterráneo de almacenamiento de agua pluvial  
(utilizado en China)

Se puede usar el cemento aplicado a mano para cubrir las paredes de la excavación o un simple revestimiento de plástico. En varios países (por ejemplo, Sudán, Botswana, Suazilandia, Brasil, Jamaica) se ha construido tanques de almacenamiento que consisten en estructuras en forma de colmena (Figura 5.6) con volúmenes de 10,000 litros. Se coloca tubos de polietileno llenos con una mezcla de cemento blando y con los extremos sellados antes de que se seque la mezcla, esto le permitirá al tanque adquirir rápidamente la forma requerida. Se reviste los lados de estos tanques con polietileno.

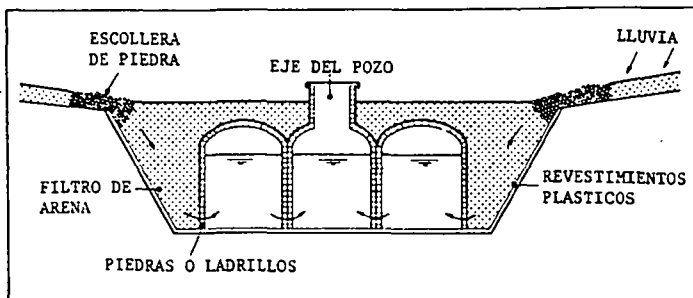


Figura 5.6  
Cisterna construida de tubos de polietileno



En las Figuras 5.7 y 5.8 se muestra dos ejemplos más de almacenamiento de agua pluvial.

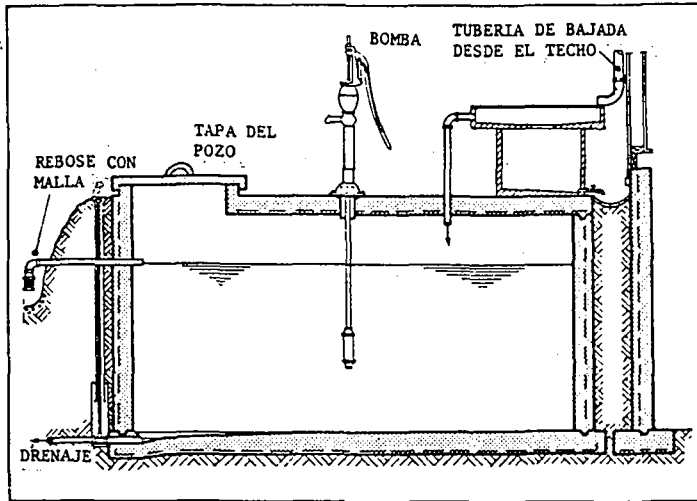


Figura 5.7  
Arreglo de almacenamiento de agua pluvial

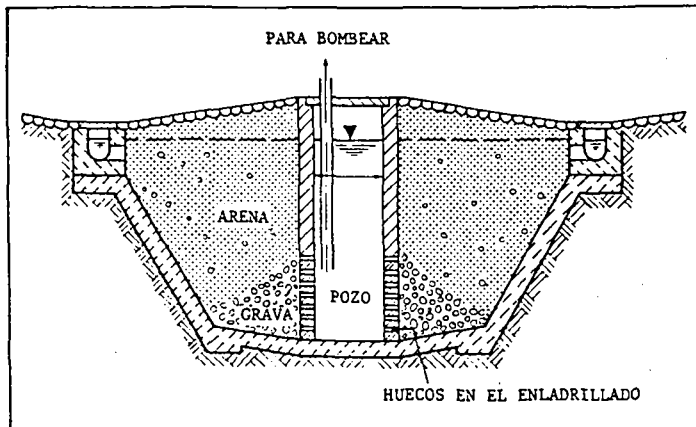


Figura 5.8  
Cisterna veneciana

El barril cilíndrico de madera para agua pluvial era cosa familiar en la mayoría de países occidentales hasta el advenimiento del abastecimiento de agua por medio de tuberías. Se puede construir estos contenedores especialmente para el almacenamiento del agua pluvial, pero se puede utilizar también recipientes de comida o bebida después de que han servido a su propósito original.

Se puede construir contenedores de cemento de paredes delgadas para volúmenes moderados de agua pluvial. En Kenia, el UNICEF ha desarrollado una forma ahusada en la cual se utiliza una simple bolsa de tela como base para una pared de 3 cm de espesor e incluso menos. De esta manera se puede construir contenedores con un volumen de almacenamiento de hasta 2,500 litros.

En muchas partes de Africa, Asia y América Latina se dispone de arcilla. Se puede usar la arcilla para construir contenedores adecuados para el almacenamiento del agua pluvial de volumen limitado. Las técnicas simples de vidriado podrían ser útiles para mejorar la impermeabilidad del recipiente de arcilla o las paredes del barril.

Los armazones a prueba de agua (por ejemplo de bambú o de varillas) pueden construirse revistiendo canastas tejidas, con cemento, argamasa o plástico. Usando una forma ahusada se puede lograr fácilmente el encierre completo de los recipientes de almacenamiento.

En la construcción de tanques metálicos de almacenamiento, el material más común lo constituye las láminas de hierro galvanizado que se remachan y sueldan en frío con facilidad. Para evitar la deformación del tanque cuando se le llena, se requiere un armazón (madera, acero, etc.). En algunas instancias se puede incorporar estos tanques como parte de la estructura de la pared o de los cimientos de construcción.

Los tanques de hierro corrugado tienen la ventaja de tener un apoyo propio. En Africa y en Australia se encuentra tanques de este tipo para el almacenamiento de volúmenes de hasta 10,000 litros. Su construcción no es difícil pero se requiere una máquina "aplanadora" especial a menos que las láminas de hierro corrugado puedan prepararse manualmente. Se puede capacitar a los artesanos locales para construir estos tanques en tamaños apropiados a los requerimientos locales.

Para volúmenes mayores de almacenamiento se usa en su mayoría tanques o cisternas construidos de ladrillo o mampostería. Típicamente las paredes son cilíndricas y adheridas por medio de una argamasa barata de cal o una mezcla más cara de cemento. En lugares en donde se construye grandes volúmenes de almacenamiento, y ciertamente para tanques cuya altura excede los 2 m, se convierte en necesario el reforzamiento a lo largo de los bordes externos. Esto se puede proveer convenientemente por medio de una o más bandas de acero templado alrededor de la circunferencia externa del tanque. Comúnmente se techa este tipo de tanque colocando alguna cubierta conveniente (por ejemplo, hojas de hierro galvanizado) sobre un armazón de soporte.

En muchas áreas se utiliza los tanques de concreto reforzado. En su construcción se utiliza el moldaje de paredes dobles. En el espacio se coloca material de refuerzo, por lo general mallas o barras de acero, y se vacía dentro la mezcla de concreto. Se puede retirar el moldaje cuando el concreto se ha endurecido lo suficiente, por lo general después de todo un día o más. Entonces se debe despegar nuevamente el moldaje para la construcción de otro tanque. Esto es necesario porque el moldaje representa una inversión inicial sustancial, se le debe utilizar económicamente varias veces para lo cual se requiere medidas de organización. Los tanques de concreto reforzado tienen la ventaja de una gran durabilidad y pueden, en principio, construirse en el tamaño deseado. Debido a su fuerza estructural se puede usar estos tanques como parte de las paredes o cimientos de una construcción.

Se ha construido exitosamente tanques de concreto reforzados con bambú en países en donde se dispone del bambú en longitud, tamaño y fuerza adecuados (por ejemplo, China, Indonesia, Tailandia). Los tanques de ferro-cemento son cada vez más populares y en ellos se utiliza el alambre para el reforzamiento de las paredes y el fondo, los cuales se forman mediante la cobertura con cemento. Estos tanques son bastante económicos.

#### 5.5 PRESERVACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

En lugares en donde se construye tanques o cisternas bajo tierra, se debe tener un cuidado especial para prevenir el ingreso de polvo, arena, hojas, insectos u otros contaminantes. Por esta misma razón, en las aberturas para ingreso y salida y cualquier conducto de ventilación se debe colocar mallas.

Se debe proveer una zanja de intercepción para drenar cualquier escorrentía superficial en exceso.

Durante el almacenamiento, la calidad del agua pluvial recolectada, del captador de suelo o de techo, se puede deteriorar a través de la putrefacción de material orgánico en el agua o a través del crecimiento de bacterias y otros microorganismos. Las medidas para proteger la calidad del agua almacenada incluyen la exclusión de la luz, condiciones frescas de almacenamiento y limpieza regular. Dispositivos simples de desinfección tales como el clorador de pote (véase Capítulo 17) pueden ser muy útiles en los contenedores de almacenamiento de agua pluvial.

En teoría, sería deseable la prefiltración del agua recolectada antes de su almacenamiento, pero en la práctica los filtros no son muy efectivos para la operación intermitente requerida. Sin embargo, la Figura 5.9 muestra un ejemplo.

Serfa deseable el hervido del agua extraída del almacenamiento antes de usarla para la bebida o la preparación de alimentos, pero a menudo no es practicable. En algunos lugares se suspende en el tanque de almacenamiento una bolsa pequeña conteniendo un coagulante para flocular los sólidos suspendidos en el agua. El agua extraída del tanque de almacenamiento tiene una apariencia clara, pero su seguridad bacteriológica no está asegurada.

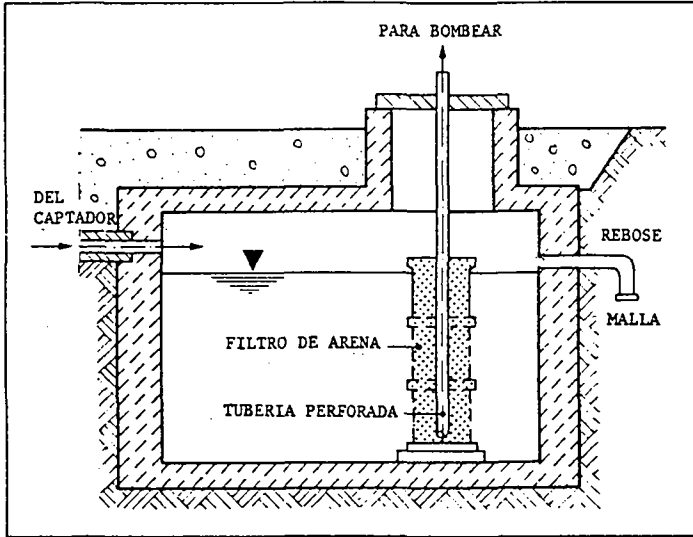


Figura 5.9  
Extracción del agua pluvial filtrada del almacenamiento



RECOLECCION DEL AGUA PLUVIAL

Environmental Protection Agency  
INDIVIDUAL WATER SUPPLY SYSTEMS  
U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1973

Grover, B.  
HARVESTING PRECIPITATION FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
World Bank, Washington, D.C., 110 p.

Ionides, M.  
WATER IN DRY PLACES  
Engineering, Londres, 1967, pp. 662-666

Johnson, K.; Renwick, H.  
RAIN AND STORMWATER HARVESTING FOR ADDITIONAL WATER SUPPLY IN RURAL AREAS:  
Component review of North America  
United Nations Environment Programme, Nairobi, 1979.

Maddocks, D.  
AN INTRODUCTION TO METHODS OF RAINWATER COLLECTION AND STORAGE  
En: Appropriate Technology, Vol. 2(1975) No. 3, pp. 24-25

Maddocks, D.  
METHODS OF CREATING LOW-COST WATERPROOF MEMBRANES FOR USE IN THE  
CONSTRUCTION OF RAINWATER CATCHMENT AND STORAGE SYSTEMS  
Intermediate Technology Publications Ltd., Londres, 1975

MORE WATER FOR ARID LANDS  
National Academy of Science, Washington, D.C., 1974

RAINWATER CATCHMENT PROJECT JAMAICA  
Inter-Technology Service Ltd.; Government of Jamaica  
Ministry of Mining and Natural Resources, Water Resources Division of  
Foreign and Commonwealth Office  
(Overseas development Administration), Londres, 1972, 220 p.

RAINWATER AND STORMWATER HARVESTING FOR ADDITIONAL WATER SUPPLY IN AFRICA  
University of Nairobi, Department of Geography, Nairobi, 1979

RAINWATER HARVESTING IN INDIA AND MIDDLE EAST  
Indian Institute of Science, department of Civil Engineering  
Bangalore (India), 1979

THE INTRODUCTION OF RAINWATER CATCHMENT AND MICRO-IRRIGATION TO BOTSWANA  
Intermediate Technology Development Group Ltd., Londres, 1969, 110 p.

Watt, S.B.  
RAINWATER STORAGE TANKS IN THAILAND  
En: Appropriate Technology Vol. 5(1978) No. 2, pp. 16-17



## 6. CAPTACION DE AGUAS DE MANANTIAL

### 6.1 INTRODUCCION

Los manantiales se encuentran principalmente en terrenos montañosos o empinados. Se puede definir un manantial como un lugar donde se produce un afloramiento natural del agua subterránea. El manantial se alimenta por lo general de una formación de arena o grava que contenga agua (estrato acuífero o simplemente acuífero), o de un flujo de agua a través de roca fisurada. En lugares donde estratos impermeables bloquean el flujo subterráneo del agua, ésta logra llegar a la superficie. La descarga del acuífero se puede dar en una situación al descubierto, como manantial, o de un modo "invisible", como cuando el flujo subterráneo aporta a un río, arroyo, lago o mar (Figura 6.1). En lugares donde el agua aflora en forma de manantial se la puede captar fácilmente. De hecho, los abastecimientos públicos de agua más antiguos se basaban a menudo en manantiales.

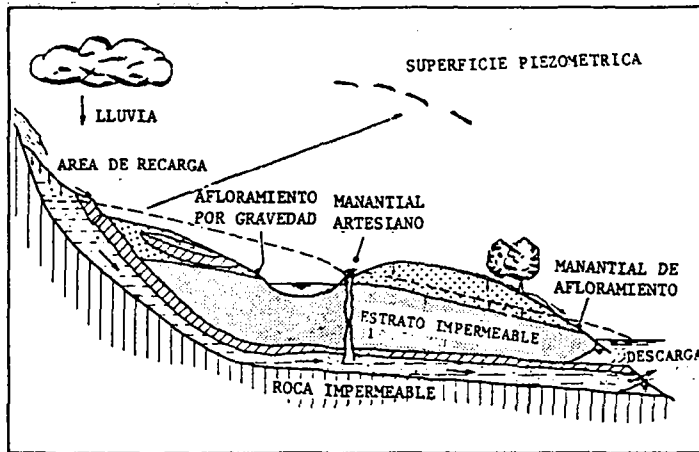


Figura 6.1  
Surgimiento de manantiales

Los mejores lugares para buscar manantiales son las laderas de las colinas y los valles ribereños. La existencia de vegetación verde en un cierto punto en un área seca también puede indicar un manantial, o se puede encontrar uno remontando un arroyo hasta su fuente. Sin embargo, los lugareños son los mejores guías para estas búsquedas, ya que por lo general conocen la mayoría de los manantiales en su área.



La verdadera agua de manantial es pura y, por lo general, se la puede usar sin tratamiento, a condición de que el manantial esté adecuadamente protegido con una construcción, (por ejemplo, mampostería, ladrillo o concreto) que impida la contaminación del agua. Uno debe asegurarse que el agua provenga realmente de un acuífero y que no se trata del agua de un arroyo que se ha "sumergido" por una corta distancia.

El flujo del agua de un manantial puede originarse de "aberturas" en el terreno con diferentes formas. Según estas configuraciones existen varios nombres: manantiales de filtración o de percolación, en donde el agua percola de muchas aberturas pequeñas en el suelo poroso (en algunos países, este tipo de manantiales se llaman "ojos de agua"); manantiales de fisura, donde el agua surge de uniones o fisuras de las rocas duras; y manantiales tubulares en donde la abertura de salida es más o menos redonda. Sin embargo, para comprender las posibilidades de captación de agua de manantial, es más importante la distinción entre manantiales de afloramiento y manantiales artesianos. Se puede hacer otra subdivisión en manantiales de depresión y manantiales de afloramiento.

Los manantiales de afloramiento se producen en acuíferos no confinados. En lugares donde la superficie del suelo intercepta el nivel freático, cualquiera de estas depresiones se llenará de agua (Figura 6.2).

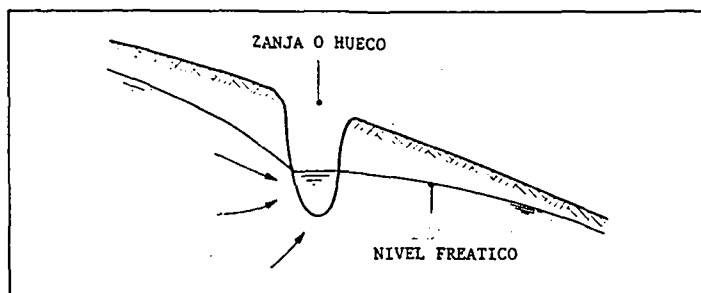


Figura 6.2  
Manantial de depresión por gravedad

Por lo general los manantiales de depresión por gravedad tienen un rendimiento bajo y es factible una mayor disminución del caudal, en condiciones de sequías, o en extracciones cercanas al agua subterránea, que dan como resultado un descenso del nivel freático.

Se obtiene una producción mayor y más constante de los manantiales de afloramiento en lugares donde ocurre el surgimiento de material impermeable, que impide el flujo del agua subterránea y hace que alcance la superficie (Figura 6.3). En este manantial de afloramiento por derrame, se descarga

toda el agua del área tributaria de recarga. El flujo será mucho más regular que en el caso de recarga sólo por lluvias. Aún así, puede producirse una fluctuación apreciable de la descarga, y en períodos de sequía algunos manantiales pueden dejar de fluir completamente.

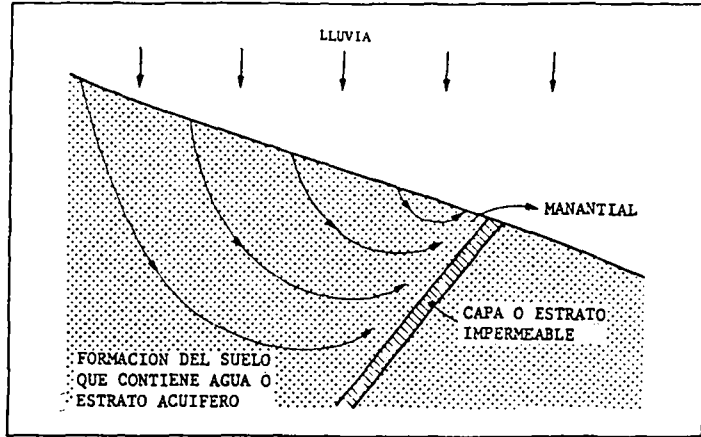


Figura 6.3  
Manantial de afloramiento por gravedad

Los manantiales artesianos\* por depresión son similares en apariencia a los manantiales de depresión por gravedad. La diferencia está, sin embargo, en que se obliga que el agua salga bajo presión de tal forma que la descarga es mayor y muestra menos fluctuación. Un descenso del nivel del agua, durante períodos secos, tiene poca influencia en el flujo del agua subterránea (Figura 6.4). Los manantiales artesianos de fisura (Figura 6.5) forman una variante importante de este tipo de manantial. Existen en muchos países y son ampliamente usados para abastecimientos públicos de agua.

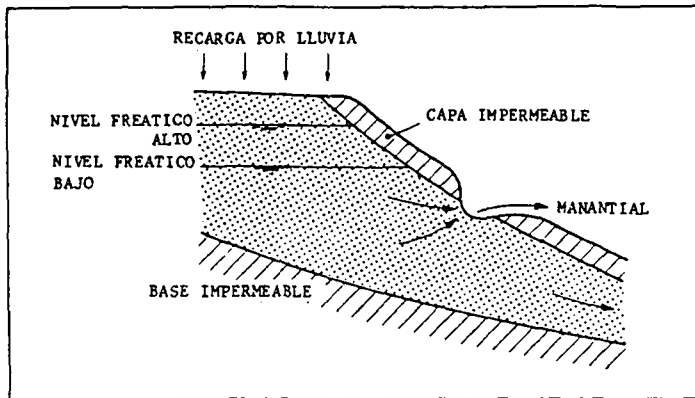


Figura 6.4  
Manantial artesianiano por depresión

\* El agua subterránea artesianiana es el agua subterránea que está confinada bajo una capa impermeable sobrepuesta, impedida de alcanzar su nivel freático libre y por lo tanto está bajo presión.

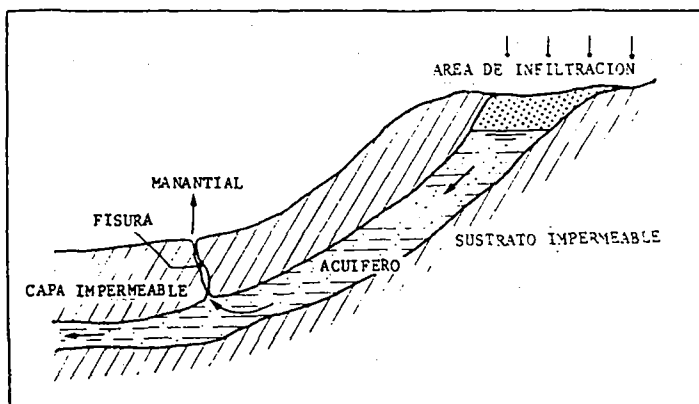


Figura 6.5  
Manantial artesiano de fisura

Los manantiales artesianos de afloramiento a menudo tienen una gran área de recarga, que alcanza a veces gran distancia (Figura 6.6). El agua es obligada a salir bajo presión; a menudo la descarga es considerable y muestra poca o ninguna fluctuación estacional. Estos manantiales se adaptan muy bien para fines de abastecimiento público de agua. Los manantiales artesianos tienen la ventaja de que la cubierta impermeable puede protegerlos de la contaminación. El agua de estos manantiales será en muchos casos bacteriológicamente segura.

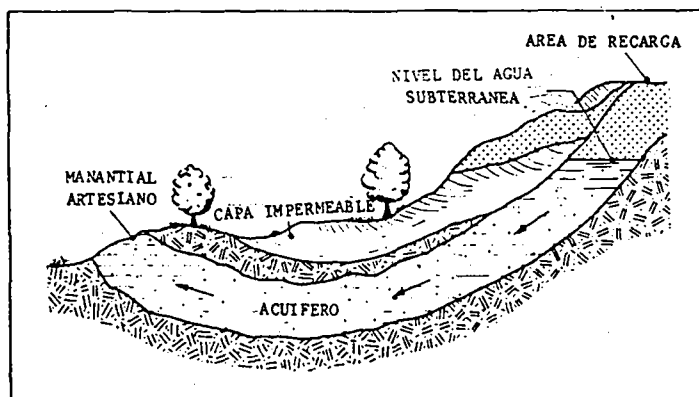


Figura 6.6  
Manantial artesiano de afloramiento

## 6.2 CONSIDERACIONES BASICAS

El manantial escogido para un abastecimiento debe estar encerrado en una estructura de la cual se derive una tubería que dirija el agua hasta el punto de entrega. Existen cuatro factores de gran importancia y a los cuales se les debe prestar una atención cuidadosa:

1. Una protección sanitaria para evitar la contaminación del agua del manantial en la estructura de captación.
2. Es importante la calidad del agua de manantial. En particular en manantiales artesianos, el agua por lo general estará libre de organismos patógenos. Sin embargo, si la temperatura del agua difiere en el día y en la noche, la calidad del agua es dudosa.
3. En estratos acuíferos granulares, el flujo variará poco con la distancia a lo largo de la curva del nivel (manantiales de percolación). Para captar esta agua se requiere galerías de filtración de longitud considerable, pero su ubicación no es factor crítico. Sin embargo, en los acuíferos de roca fisurada, el afloramiento o salida se concentrará en los sitios donde las fisuras, por donde sale el agua, alcance la superficie del suelo. Probablemente serán adecuados trabajos de captación a pequeña escala, pero el sitio donde se va a construir necesita ser localizado con cuidado.
4. Se requiere una evaluación de la producción del manantial y de la variación estacional del flujo. La producción y la confiabilidad de un manantial pueden ser influenciados sólo ligeramente por la construcción de los trabajos de recolección de agua del manantial.

Comparada con la extracción del agua subterránea descrita en el Capítulo 7, la captación del agua de manantial tiene la ventaja de que el nivel de agua subterránea normalmente descenderá en muy poco.

## 6.3 CAPTACION DE MANANTIALES DE AFLORAMIENTO POR GRAVEDAD

Debido a su pequeño rendimiento y a la dificultad en obtener una protección sanitaria satisfactoria, un manantial de depresión por gravedad (Figura 6.2) no puede ser recomendable para el abastecimiento público. Sin embargo, la presencia de un manantial de esta naturaleza indica la presencia de agua subterránea poco profunda, la cual puede ser extraída usando drenes o pozos excavados a los cuales se les puede cubrir y proteger contra la contaminación.

Se puede captar los manantiales de depresión por gravedad en formaciones de rocas granulares con drenes, consistentes en tubos con acoplamientos abiertos colocados en un relleno de grava. Para proteger al manantial es necesario cavar en las laderas de tal forma que se tome el agua de una profundidad adecuada del estrato acuífero, aún cuando el nivel freático sea bajo (Figura 6.7).

El diseño de drenes sigue las prácticas comunes de ingeniería. Estos deben colocarse en una profundidad tal que el estrato saturado por encima de ellos actúe como un reservorio de almacenamiento que compense las fluctuaciones del nivel freático. El agua recolectada en un dren, descarga en una cámara de almacenamiento, la cual, a veces es referida como "caja de manantial" (Figura 6.8).

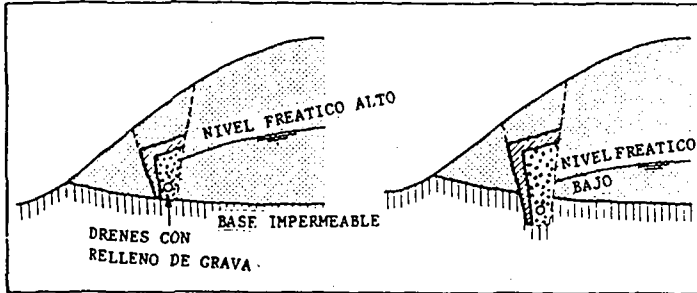


Figura 6.7  
Derivación de un manantial de afloramiento por gravedad

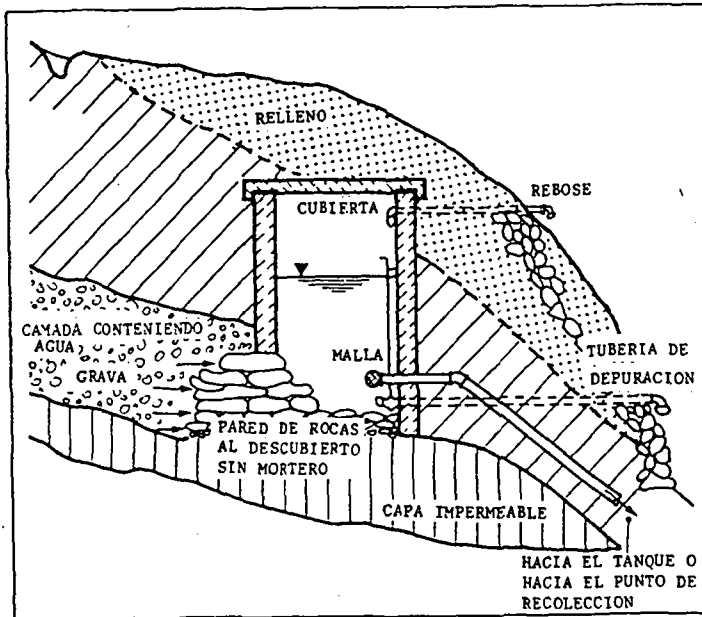


Figura 6.8  
Cámara de almacenamiento de agua de manantial ("caja de manantial")

Se deben construir el sistema de drenes y la cámara de almacenamiento de tal forma que se evite la contaminación del agua recolectada. Antes de que se construya la parte trasera de la cámara se deberían apilar las piedras sueltas. Estas servirán para hacer una pared y evitarán el deslave del terreno. La cámara debe tener un pozo de entrada con cubierta o tapa segura y removible en la cámara para la limpieza y para el trabajo de mantenimiento. Todos los conductos de aire, tuberías de rebose y drenes de limpieza deben tener aberturas con mallas. Una acequia de desviación evitaría que la escorrentía de la superficie, que fluye por las laderas, ingrese a la cámara.

Para protección sanitaria la parte superior del relleno de grava debería estar por lo menos a 3 metros por debajo de la superficie del suelo; esto se puede asegurar mediante la construcción de los trabajos de captación del agua de manantial en la ladera, o elevando el nivel del suelo con relleno traído de otro lugar. Un área que se extienda a lo largo de la galería en toda su longitud más 10 m a cada lado y, en la otra dirección a una distancia de por lo menos 50 m aguas arriba, debería protegerse contra la contaminación de fosas percoladoras, abonos o letrinas. Preferiblemente se debería cercar esta área para evitar el ingreso de gente o de animales. Por encima del lugar del manantial se requiere una acequia de drenaje para evitar que cualquier escorrentía de la superficie contamine el agua de manantial recolectada.

En casos de acuíferos de roca fisurada se pueden usar tuberías rellenas de grava, o se puede recolectar el agua mediante túneles revestidos o no, (Figura 6.9), dependiendo de la naturaleza de la formación geológica. En lugares donde las fisuras llevan caudales grandes de agua, sólo una pequeña estructura de captación será adecuada (Figura 6.10). Sin embargo, en vista de la gran velocidad del flujo de agua a través de las fisuras, el área de protección sanitaria contra la contaminación debe extenderse a una distancia considerable, por lo menos a 100 metros y preferentemente a 300 metros aguas arriba de la galería.

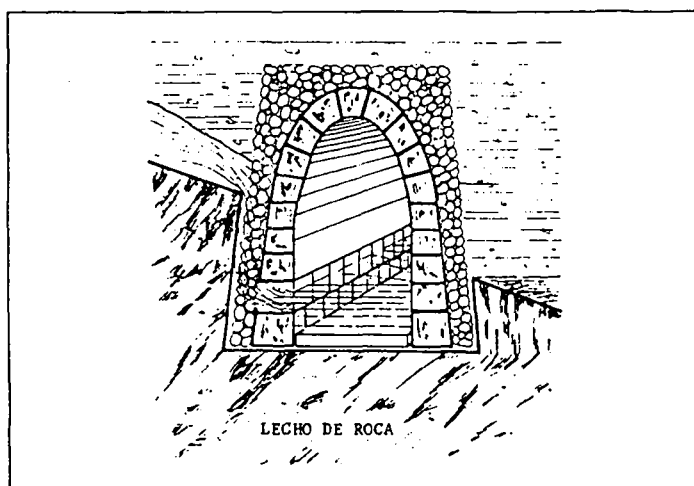


Figura 6.9

Túnel para la captación de manantiales de afloramiento

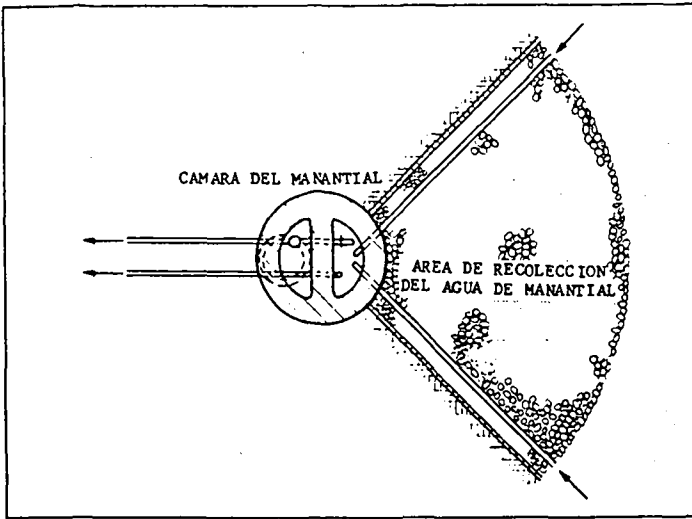


Figura 6.10  
Captación de agua de manantial de un acuífero de roca fisurada

#### 6.4 CAPTACION DE MANANTIALES ARTESIANOS

En apariencia externa, los manantiales artesianos son bastante similares a los manantiales de depresión por gravedad pero su rendimiento es mayor y menos fluctuante, ya que el agua es forzada a salir bajo presión.

Para captar agua de un manantial artesiano de depresión, el área de percolación debe estar rodeada de una pared que se extienda ligeramente por encima del nivel máximo al cual se eleva el agua bajo condiciones estáticas. Para protección sanitaria, la cámara de almacenamiento debe tener una tapa o cubierta (Figura 6.11).

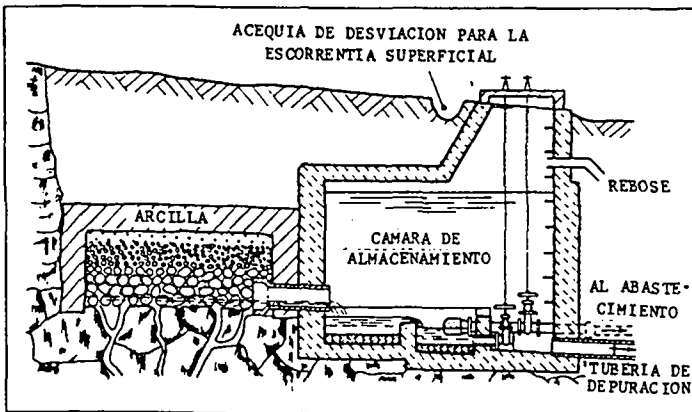


Figura 6.11  
Manantial artesiano de depresión

Para manantiales artesianos de depresión de gran extensión lateral, se tendrá que usar un sistema de drenes que descargue el agua recolectada en una cámara de almacenamiento, desde donde fluye hasta el área de abastecimiento. Para aumentar la tasa de filtración y para proteger la calidad del agua, se debe limpiar el área de recarga de todos los desechos. Para capas superiores granulares, puede ser necesario cubrir el área de recarga con capas graduadas de grava para atrapar los sólidos finos suspendidos.

Los manantiales de fisura pertenecen a la misma categoría de los manantiales artesianos de afloramiento, pero el agua brota de una sola abertura, de tal forma que los trabajos de captación pueden ser pequeños (Figura 6.12). Se puede obtener un cierto aumento en la capacidad, removiendo obstáculos de la boca del manantial o agrandando la abertura para el flujo (Figura 6.13). Debido a que el afloramiento del agua del manantial es más localizado, es fácil arreglar la protección sanitaria.

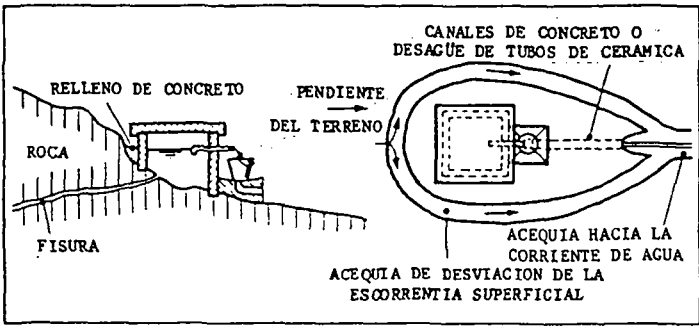


Figura 6.12  
Manantial de fisura de pequeña capacidad

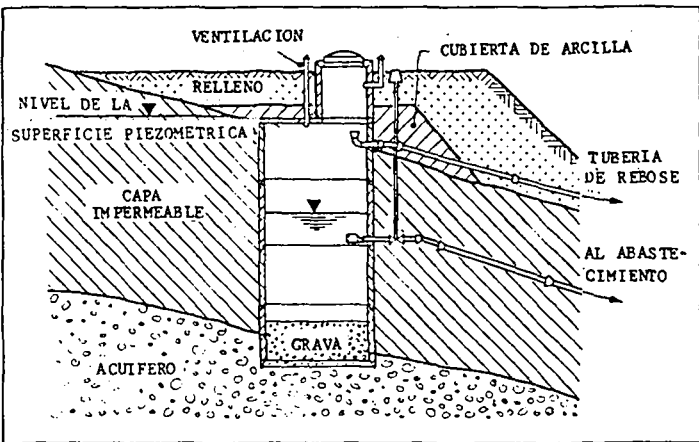


Figura 6.13  
Manantial de fisura de gran capacidad



Los manantiales artesianos de contacto, a menudo tienen una gran área de recarga a una gran distancia del manantial. El agua brota bajo presión y está protegida contra la contaminación por la capa impermeable sobrepuesta. La descarga puede ser grande y estable, con poca o ninguna fluctuación estacional. Esos manantiales son excelentes fuentes para el abastecimiento público de agua.

En lugares donde el afloramiento de agua ocurre en un solo punto, se puede captar el agua de manantial en una pequeña construcción. Para un manantial lateral grande, es decir, si el agua aflora a lo largo de una extensión de terreno, por ejemplo, a lo largo de un terreno natural, se debe construir una pared de contención en todo su ancho con los estribos (bordes) extendidos hacia las capas impermeables y la base de la pared construida sobre el sustrato rocoso; de esta manera se evita la infiltración de agua y cualquier riesgo de erosión y derrumbe. Se debe construir una galería a cierta distancia de la pared, lo que aumenta el contacto de captación (Figura 6.14), cubierta con una capa de arcilla para protección sanitaria. Desde aquí el agua descarga a un tanque de almacenamiento. En la Figura 6.15 se muestra otra estructura típica de captación de manantial.

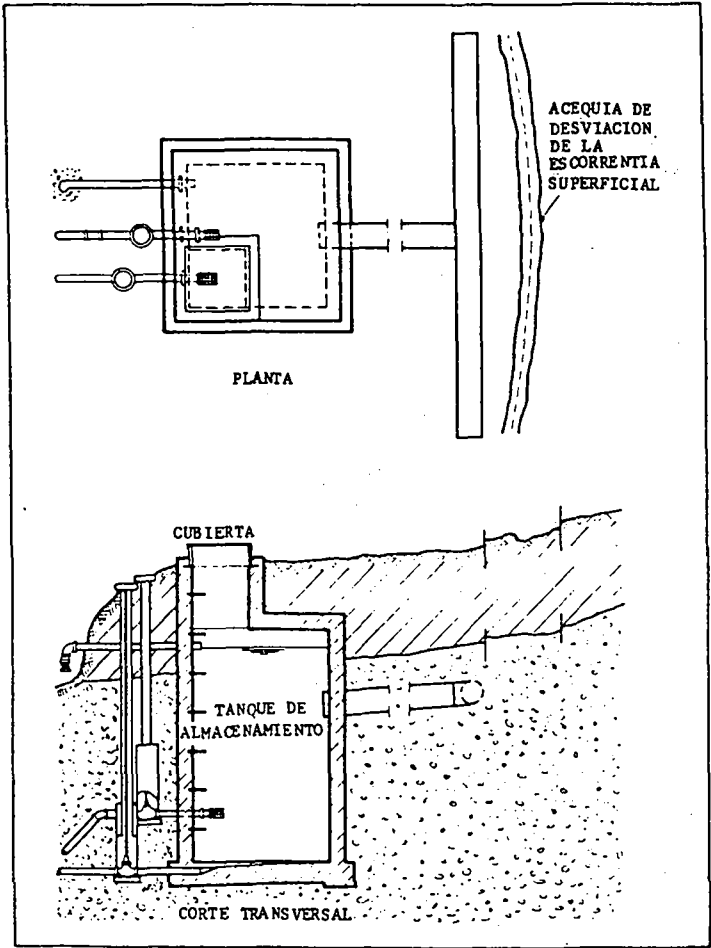


Figura 6.14  
Manantial artesiano de contacto de gran ancho lateral

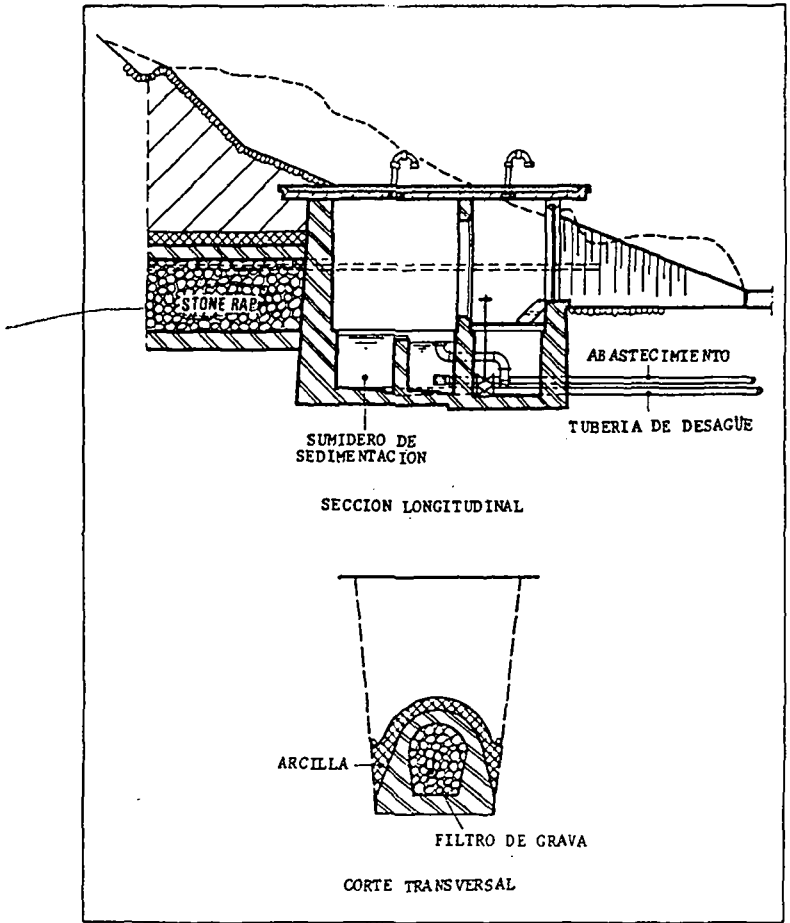


Figura 6.15  
Estructura típica de captación de manantial



CAPTACION DE AGUAS DE MANANTIAL

Bryan, K.

CLASSIFICATION OF SPRINGS

Journal of Geology, 1919, pp. 522-561

Johnson, C.R.

VILLAGE WATER SYSTEMS

UNICEF, Kathmandu, Nepal, 1976.

MORE WATER FOR ARID LANDS

National Academy of Science, Washington, D.C., 1974

Savary, I.

INVESTIGATION OF SPRINGS: THE MOST EFFECTIVE METHOD FOR ESTIMATING WATER RESOURCES IN CARBONATE AQUIFERS

En: Proceedings of the International Symposium on Development of Groundwater Resources, Resources Journal, Vol. 1(1973), pp. 53-62



## 7. EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA

### 7.1 INTRODUCCION

Para los sistemas públicos de abastecimiento de agua, el agua subterránea debiera ser siempre la fuente preferida. Las fuentes de agua superficial tienen mayor probabilidad de estar contaminadas y están más sujetas a la fluctuación estacional. A menudo se puede continuar con las extracciones de agua subterránea mucho después de que las condiciones de sequía hayan agotado los ríos y arroyos. Es muy probable que en muchos países la utilización del agua subterránea para abastecimientos públicos se encuentre aún muy por debajo de su potencial.

Frecuentemente, los datos disponibles sobre recursos de agua subterránea son por lo general inadecuados. Se puede promover, entonces, el desarrollo exitoso de abastecimientos de agua subterránea mediante la prospección (estudios de exploración). Esto también traería a luz las características físicas y químicas del agua subterránea.

La captación de recursos de agua subterránea, tanto para propósitos de abastecimiento de agua potable, como para fines de irrigación, se remonta a épocas antiguas. En China, ya se perforaban pozos por lo menos hace 3,000 años con barrenos operados manualmente, a profundidades de hasta 100 metros y revestidos con envolturas de bambú. Desde épocas inmemoriales se han excavado pozos manualmente, algunas veces a una profundidad considerable y se sigue excavando esos pozos en varias partes del mundo. La tecnología para la captación del agua subterránea a gran profundidad, a través de pozos entubados, es de fecha más reciente.

El primer tipo de perforación de pozos tubulares de agua que tuvo uso popular fue el método de la herramienta de cable (percusión). Durante un período de varios siglos evolucionó desde formas rústicas hasta un número de técnicas bastante sofisticadas. La necesidad de prevenir el derrumbe de formaciones geológicas no estables y los problemas de control a profundidad de las pesadas herramientas requeridas para la perforación por percusión, alentaron el desarrollo de otros métodos de perforación. Estos utilizan cortadores giratorios, "taladros" o "brocas" que perforan la roca mientras que se deja pasar un fluido a través de ellos (perforación rotatoria de perforación por circulación directa). Para pozos de abastecimiento de agua, el uso de un fluido de lodo basado en arcilla presenta un problema ya que el acuífero del que se va a captar tiende a obstruirse. Esto condujo al desarrollo del método de perforación rotatoria por circulación invertida, en el cual se utiliza un flujo rápido de agua limpia para retirar las cortaduras del hueco perforado. Un paso posterior y lógico fue la herramienta neumática en el fondo de la tubería de perforación. En la década de 1950 se introdujo el método de perforación del "método de percusión con martillo neumático". La eficiencia de esta herramienta demostró ser notable y ahora se pueden perforar pozos de pequeño diámetro, aún en formaciones de roca dura, en una fracción del tiempo requerido anteriormente.

Ninguna técnica particular de perforación de pozos de agua es aplicable bajo todas las condiciones. Cada método de construcción de pozos puede ser el más adecuado, dependiendo de las circunstancias, aunque la tendencia general está dirigida hacia la perforación rotatoria para reducir el tiempo y el costo. Así, las técnicas para llegar al agua subterránea varían desde los métodos antiguos, tales como la simple excavación de pozos con herramientas manuales, y la excavación de los famosos "ganats" (galerías subterráneas con una extensión de muchos kilómetros en Irán y Afganistán), hasta las sofisticadas máquinas de perforación ("equipos de perforación") capaces de hacer un pozo entubado a algunos cientos de metros de profundidad aún en formaciones de roca dura.

## 7.2 OCURRENCIA Y PROSPECCION DEL AGUA SUBTERRANEA

La prospección del agua requiere un conocimiento básico de los diferentes tipos de formaciones que contienen agua subterránea que se pueden encontrar en la corteza terrestre. Desde este punto se debe desarrollar el enfoque de su exploración para el abastecimiento de agua.

### Ocurrencia

El agua subterránea ocurre o se da en poros, vacíos o fisuras en formaciones geológicas. Los poros son los espacios entre los granos minerales en estratos sedimentarios y en rocas intemperizadas. La cantidad de espacios entre los poros en una formación rocosa depende de factores tales como tamaño y forma de los granos, textura, compactación y presencia de material de cementación. La porosidad es la relación entre el espacio de poros y el volumen total de la roca (Figura 7.1). Una porosidad elevada no siempre indica una buena permeabilidad (potencial de contención de agua).

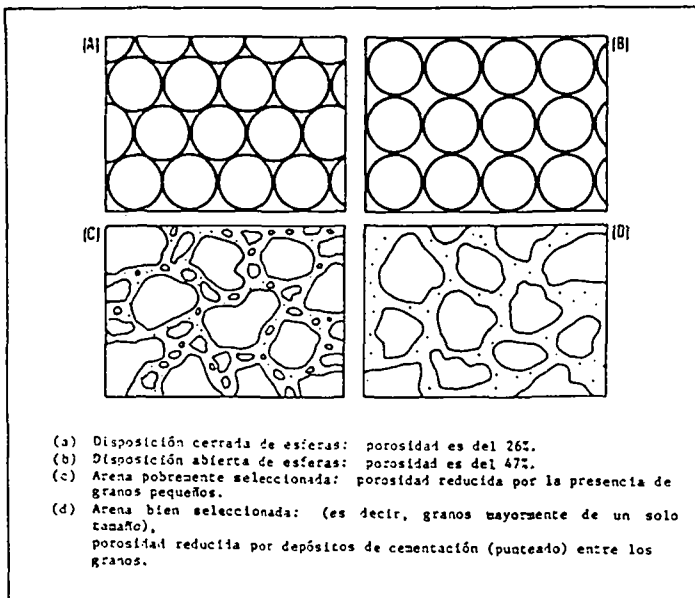


Figura 7.1  
Porosidad y textura

Aunque las arcillas y los limos tienen una porosidad elevada, el tamaño de los poros es demasiado pequeño para permitir al agua fluir con facilidad. A todas las aberturas en las rocas tales como juntas, estratificaciones o camadas, planos de hendiduras y grietas, se les llama fisuras (en terminología hidrogeológica). Por lo general, las rocas ígneas\* no son porosas, a menos que se intempericen por la acción corrosiva de elementos naturales. Las lavas que contienen cavidades formadas por burbujas de gas que escaparon de ellas durante la erupción pueden constituir una excepción. Aún cuando una formación sea altamente porosa, la permeabilidad puede ser muy baja debido a que los vacíos no siempre están interconectados. Las fisuras pueden producirse también en rocas sedimentarias\*\*.

Geológicamente las fisuras jóvenes, y no intemperizadas, en todos los tipos de formaciones, tienden a cerrarse y es probable que contengan poco o nada de agua. Con la acción del intemperismo, las fisuras se abrirán cerca a la superficie del suelo pero permanecerán cerradas en la profundidad.

Los acuíferos (porción de rocas de donde se puede extraer agua) que conservan la mayor parte de su agua en grandes junturas y fisuras, reciben el nombre de fisurado, mientras que aquellos que tienen agua en los poros se les llama porosos. El Cuadro 7.1 muestra tipos comunes de sedimentos y rocas y la forma usual de ocurrencia del agua en ellas.

#### Cuadro 7.1

Modo usual de ocurrencia del agua

Tipo de material	Por lo general el agua ocurre en:
Arena y grava	Poros
Areniscas	Poros y fisuras
Caliza	Fisuras a menudo se agrandan a cuevas
Tiza	Poros y fisuras
Arcilla	Poros muy pequeños
Ígneos masivos	Fisuras con poros en zonas sometidas a la intemperie
Lavas	Fisuras con poros en zonas ígneas
Metamórfico	Fisuras con poros en zonas sometidas a la intemperie

\* Ignea: originada de material volcánico erupcionado.

\*\* Sedimentaria: sedimentos compactados por presión para formar material sólido.



A la facilidad con que el agua puede fluir a través de una formación bajo una carga hidráulica se le da el nombre de permeabilidad hidráulica. La permeabilidad hidráulica es expresada como la velocidad del flujo de agua a través de la roca por unidad de gradiente hidráulico, por ejemplo, mm/seg, metro/día. Depende de la porosidad, del tamaño promedio de los poros, y de la distribución de las fisuras (véase Cuadro 7.2).

Los estratos con una permeabilidad hidráulica muy baja (inferior aproximadamente a  $10^{-6}$  mm/seg) son llamados impermeables, y los que tienen una permeabilidad hidráulica mayor son considerados como permeables.

La Figura 7.3 muestra la distribución del agua dentro y sobre un acuífero no confinado.

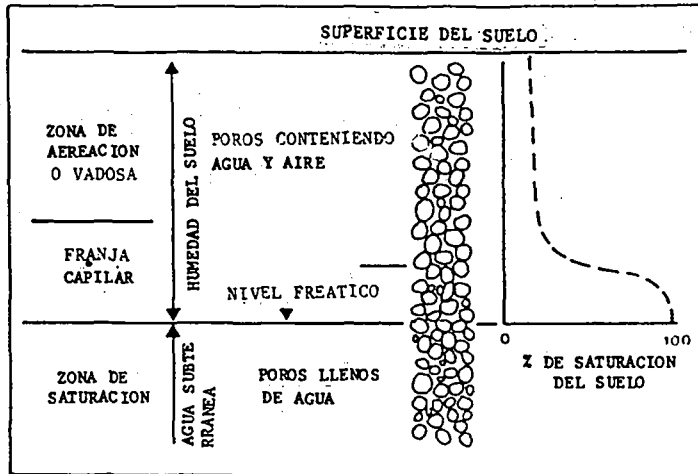


Figura 7.3  
Distribución del agua por sobre y en un acuífero poroso no confinado

Cuadro 7.2  
Porosidad y permeabilidad hidráulica para algunas rocas y sedimentos comunes

Material	Porosidad (%)	Permeabilidad Hidráulica Coeficiente en mm/seg
Arcilla	45 - 55	$10^{-3}$ - $10^{-9}$
Limo	40 - 50	$10^{-2}$ - $10^{-6}$
Arena	35 - 40	$10^{-2}$ - $10^{-1}$
Grava limpia	40 - 45	$10^3$ - $10^1$
Grava arenosa	25 - 40	$10^1$ - $10^{-2}$
Arenisca	10 - 20 (poros)	$10^{-4}$ - $10^{-6}$
	(fisuras)	$10^{-1}$
Caliza	1 - 10 (poros)	$10^{-6}$ - $10^{-8}$
	(fisuras)	$10^2$
Granito (fresco)	1 (poros)	$10^{-10}$
	(fisuras)	$10^2$

Un acuífero no confinado está expuesto a la filtración del agua directamente de la superficie del suelo. Esto se ilustra en las Figuras 7.4a y 7.4b.



Figura 7.4a  
Filtración de agua en un acuífero no confinado durante la estación húmeda

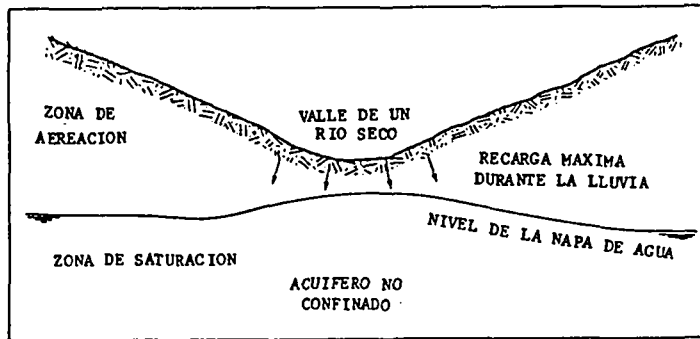


Figura 7.4b  
Infiltración de agua en un acuífero no confinado durante la estación seca

Un acuífero confinado (Figura 7.5) es aquél donde la formación geológica que contiene agua está cubierta con un estrato impermeable. La presión del agua en un acuífero confinado está relacionada con el nivel de su área de recarga.

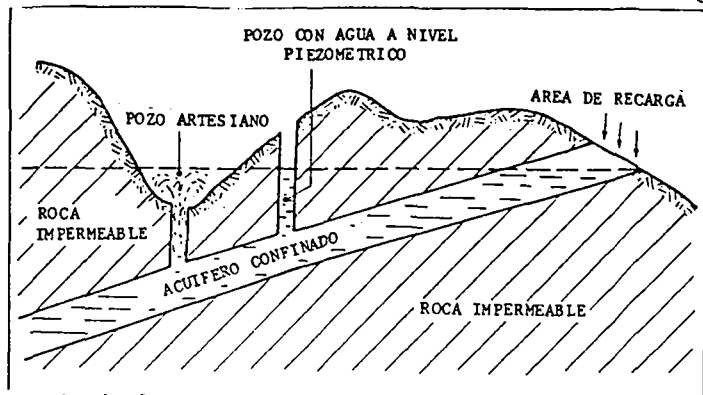


Figura 7.5  
Acuífero confinado alimentado desde un área de recarga

Se puede medir la presión del agua en un acuífero confinado perforando en él y observando el nivel que alcanza el agua en el pozo excavado. A este nivel de agua se le llama nivel piezométrico. Si el nivel piezométrico está por sobre la superficie del suelo, el agua del acuífero brotará y rebosará naturalmente del pozo excavado que entonces recibe el nombre de "pozo artesiano" (de flujo libre).

La infiltración de agua desde la superficie del suelo a través del estrato permeable hasta el agua subterránea será interrumpida en lugares donde está presente un lente de material impermeable como arcilla (Figura 7.6). El agua se acumulará entonces por encima de este lente, formando una napa freática colgada a cierta distancia por sobre el verdadero nivel freático. Es muy importante identificar una napa freática colgada ya que la cantidad de agua que ésta contiene es muy pequeña. Frecuentemente, las napas freáticas colgadas desaparecerán durante períodos secos, cuando no hay recarga por filtración desde la superficie del suelo.

### Prospección

Una prospección exitosa de agua subterránea requiere un conocimiento de la forma de ocurrencia del agua en las formaciones que la contienen. Sin este conocimiento es imposible una exploración efectiva y eficiente de dicha agua, y la perforación del pozo se convierte en algo así como un juego de ruleta. Debe definirse claramente el propósito del trabajo de prospección. ¿Es el de proveer un pequeño abastecimiento local, o es el de determinar las características acuíferas para el desarrollo de recursos de agua subterránea de toda un área?

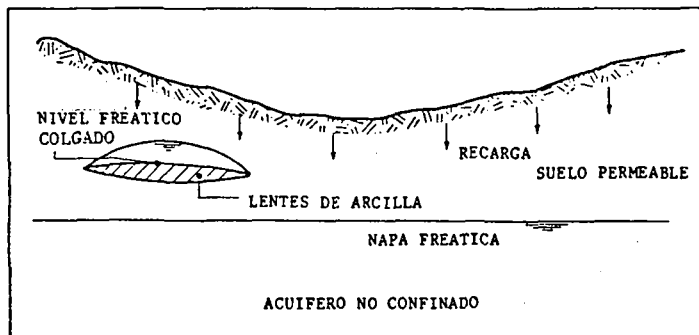


Figura 7.6  
Nivel freático aislado

Se sugiere el siguiente enfoque: se debe recolectar y comparar la información hidrogeológica acerca del área de estudio. Esto debe incluir mapas geológicos o informes; mapas topográficos; registros de pozos tubulares; reconocimiento geológico de la superficie; registros meteorológicos y datos hidrológicos.

Para complementar la recolección de información se debe hacer un examen del área de estudio, preferiblemente hacia fines de la estación seca. En algunos casos esto será lo que necesite un hidrogeólogo experimentado para definir las fuentes de agua para abastecimientos de pequeñas comunidades y no se requerirá ninguna otra investigación ulterior. Si se carece de datos esenciales, será necesario cierto trabajo de campo.

El examen debe proporcionar datos suficientes que permita formar una base para dibujar un mapa hidrogeológico que muestre: la distribución de acuíferos, cualquier manantial o nacimiento de agua presentes, la profundidad de las napas freáticas y los niveles piezométricos, el rendimiento de fuentes existentes de agua subterránea y la calidad del agua de ellas. Algunas veces, es posible preparar un mapa de esta naturaleza sobre la base de un examen de los afloramientos y abastecimientos de agua existentes; en otros casos puede incluir el uso de pozos excavados especialmente y de la geofísica. Por lo general se requerirá la perforación de pozos especiales de prueba sólo cuando se va a explotar completamente un acuífero; para esto se necesita tener un conocimiento de la permeabilidad hidráulica y la capacidad de almacenamiento de agua.

Las investigaciones geofísicas, especialmente las medidas de resistividad eléctrica, son muy útiles para comprender la distribución y la calidad del agua subterránea. El valor de la resistencia eléctrica de una formación de suelo depende de la cantidad, distribución y conductividad del agua que contiene. Las medidas de la resistividad se obtienen haciendo pasar una corriente eléctrica a través del suelo entre dos electrodos y midiendo la caída de voltaje entre otros dos electrodos (Figura 7.7). Se controla la profundidad de penetración de la corriente mediante el espaciamiento de los electrodos. Aumentando el espaciamiento del electrodo, puede hacerse que la corriente penetre a mayor profundidad y así se puede realizar un sondaje completo de profundidad de la resistividad. Si se realiza un sondaje de profundidad cerca a un pozo o pozo excavado existente del cual se conoce el nivel de agua, la calidad del agua y el espesor del acuífero, entonces se puede establecer la correlación entre los valores de resistividad y las condiciones hidrogeológicas. Esto proporcionará una base para la interpretación de los sondajes de profundidad de la resistividad hechos en otras áreas con la misma geología, y establecerá así información sobre la profundidad de la napa freática, la calidad del agua y el espesor del acuífero.

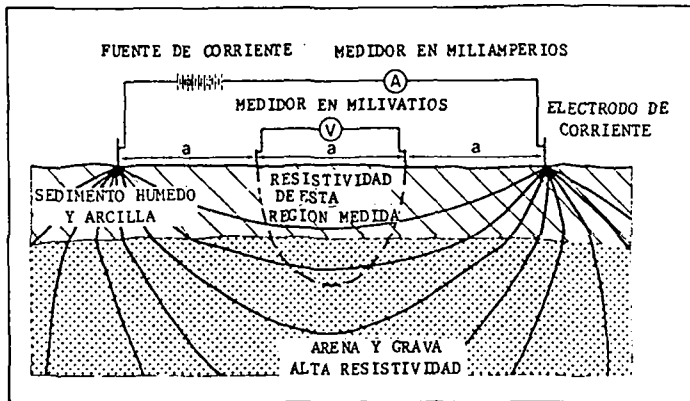


Figura 7.7  
Arreglo para la medida de la resistividad eléctrica

Si se conduce las medidas de resistividad en un patrón reticular en un área dada, las lecturas pueden trazarse en un mapa reticulado y formar patrones de alta y baja resistividad para cada espaciamento de electrodos usado. Entonces se pueden dibujar en el mapa las líneas de igual resistividad para la identificación de áreas de baja resistividad, que tienen mayor probabilidad de ser formaciones permeables y contenedoras de agua que las áreas de alta resistividad.

Algunas veces se requiere la perforación de pequeños pozos con propósitos de prospección para complementar los datos obtenidos con métodos geofísicos de superficie. Este método siempre es caro y a menudo es difícil de emplear. Puede ser necesario levantar el perfil geofísico para obtener la cantidad máxima de información de un pozo de prospección. Esto incluye el descenso de instrumentos de medición en el pozo para extraer medidas sobre las propiedades del agua y del suelo. El perfilado del pozo excavado es una operación compleja y siempre se debe obtener el consejo de un geofísico antes de que se decida hacerla. Otras técnicas geofísicas más sofisticadas para la prospección del agua subterránea son las medidas sísmicas y de gravedad.

### Rendimiento seguro

El rendimiento seguro de un acuífero es la extracción máxima permanente de agua que se puede obtener de una fuente subterránea. Se calcula el rendimiento seguro de un acuífero para ver si la extracción planeada para propósitos de abastecimiento de agua será garantizada en el futuro. Básicamente no se puede extraer mayor cantidad de agua que la recarga natural aporta. Otra limitación es que no se debe hacer descender la napa de agua subterránea en forma tal que el agua contaminada de algún otro lugar ingrese en el acuífero. Algunas veces, la extracción de agua de un pozo nuevo puede causar una reducción considerable en el rendimiento de pozos cercanos existentes. En un área en donde se conoce poco sobre la extensión y capacidad del acuífero, se debe vigilar el pozo nuevo y cualquier pozo cercano por lo menos durante el primer período de operación.

## 7.3 METODOS DE EXTRACCION DEL AGUA SUBTERRANEA

El método más antiguo para la extracción del agua subterránea es cavar un hoyo en el suelo, a una profundidad por debajo del nivel de la napa de agua subterránea. Por lo general, la cantidad de agua que se puede recolectar de esta manera es bastante limitada y cuando se necesite una mayor capacidad de extracción, se debe explotar el acuífero en un área mayor de contacto. Se puede hacer esto ampliando el ancho de la excavación, extendiéndola a una mayor profundidad o aumentando ambos, el ancho y la profundidad. Saber cuáles de estos métodos pueden y deben aplicarse en un caso particular depende del espesor de la formación del suelo contenedora de agua y de la profundidad de la napa de agua subterránea.

Los medios horizontalmente extendidos para la captación y extracción de agua subterránea reciben el nombre de galerías y se les puede subdividir en zanjas de percolación (Figura 7.8), drenes de filtración (Figura 7.9) y túneles (Figura 7.10).

Debido a las dificultades y costos de excavación sólo se deben usar las galerías en los casos en que la napa de agua subterránea esté a una profundidad superficial no mayor a los 5-8 metros por debajo de la superficie del suelo (los túneles en formaciones de suelo consolidado pueden ser económicos aún a profundidades mayores). Las galerías ofrecen la única solución práctica cuando se va a captar el agua subterránea de acuíferos de poca profundidad con un pequeño espesor saturado. Estos acuíferos tienen que ser explotados en una gran área de contacto. También son recomendables las galerías en áreas costeras en donde el agua dulce que se va a extraer se encuentra encima del agua salada. Entonces el descenso o abatimiento del nivel\* de la napa de agua dulce debe mantenerse en lo mínimo posible, de lo contrario, surgirá el agua salada y se mezclará con el agua dulce.



Figura 7.8  
Zanja de percolación

---

\* Descenso del nivel o abatimiento: es el descenso de la napa de agua subterránea alrededor de un colector de agua subterránea, resultante de la extracción del agua.

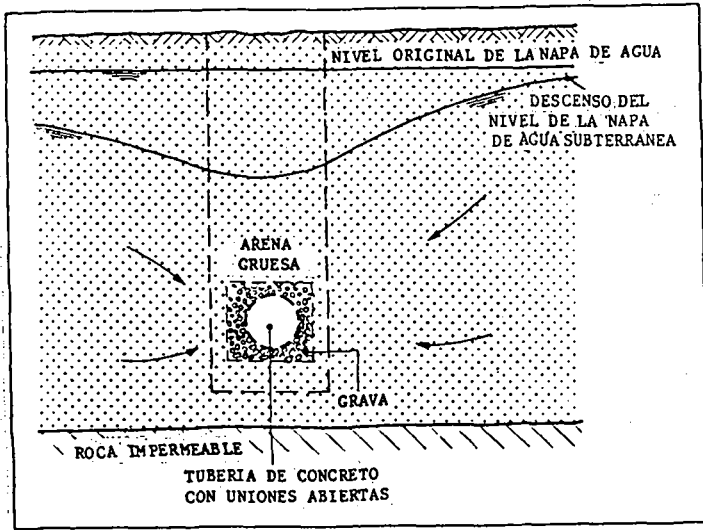


Figura 7.9  
 Dren de infiltración

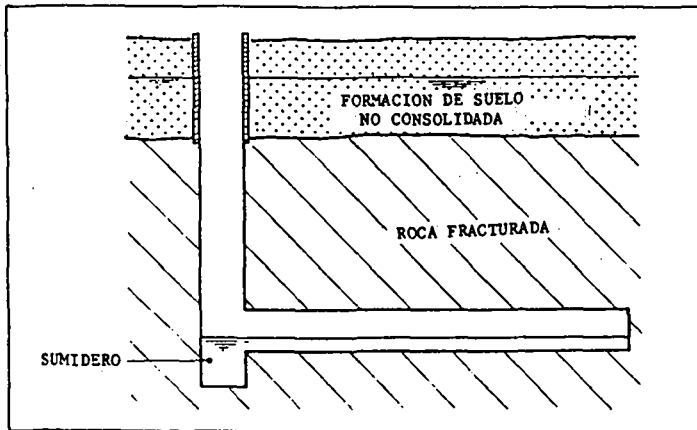


Figura 7.10  
 Túnel de infiltración

Las zanjas son fáciles de construir; éstas pueden tener una gran capacidad y una prolongada vida útil. Sin embargo, si las zanjas son descubiertas, el agua recolectada en ella no se encontrará protegida contra la contaminación, lo que las hace menos apropiadas para propósitos de abastecimiento de agua. Los drenes de filtración y los túneles son más caros de construir y su diseño es más complicado. Los drenes pueden estar sujetos al atoro. La ventaja de los drenes y túneles es que estos colectores son completamente subterráneos de tal forma que el agua recolectada está protegida contra la contaminación de la superficie.

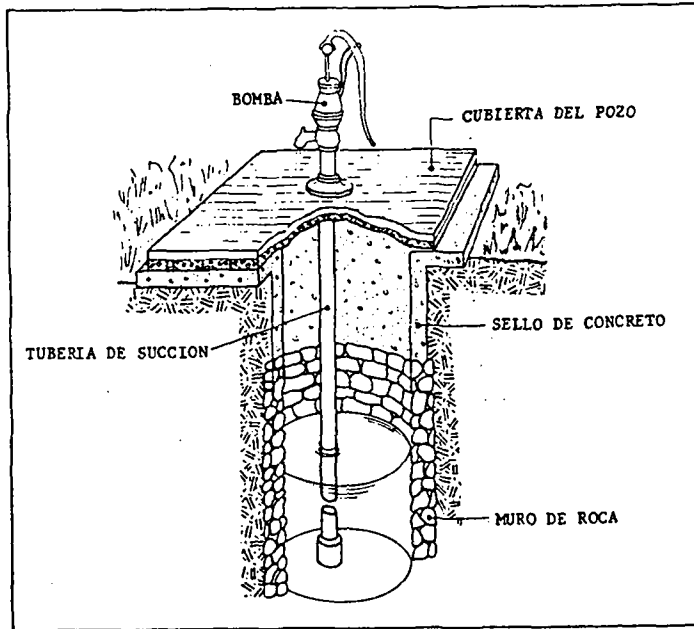


Figura 7.11  
Pozo excavado

Los medios verticales para extracción de agua subterránea pueden subdividirse en pozos excavados de gran diámetro (Figura 7.11) y pozos tubulares de pequeño diámetro (Figura 7.12). Se deben usar los pozos tubulares cuando la napa de agua subterránea se encuentre a profundidad considerable por debajo de la superficie del terreno, pero sólo son efectivos en acuíferos de espesor suficiente. Por lo general, los pozos excavados tienen una capacidad limitada de tal forma que su uso está restringido sólo a domicilios individuales y otros abastecimientos de agua en pequeña escala. Los pozos de diámetro grande actúan como reservorios de



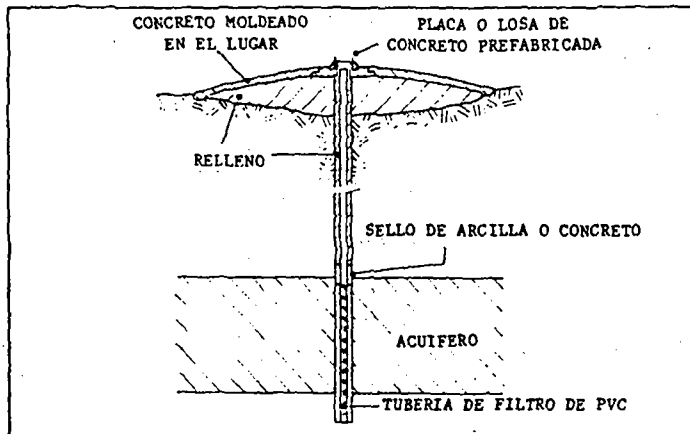


Figura 7.12  
Pozo tubular

almacenamiento y así tienen la capacidad de surtir agua en cualquier extracción máxima. La capacidad de los pozos tubulares varía en una gran escala, desde menos de 1 litro/seg para pozos superficiales de diámetro pequeño en acuíferos de arena fina, a más de 100 litros/seg para pozos profundos de diámetro más grande en arena gruesa o en depósitos de roca sedimentaria. Los pozos entubados son muy adecuados para abastecimientos de agua potable porque sólo serán necesarias precauciones simples para proteger de la contaminación al agua extraída de esta manera. Algunas veces, se puede usar un grupo de pozos tubulares colocados en serie y a los cuales se bombea como una unidad (Figura 7.13).

En situaciones en donde un acuífero de gran espesor se encuentra a poca profundidad, tanto los recolectores de agua verticales como los horizontales, (pozos, galerías, zanjas, drenes) o una combinación de ambos, pueden ser apropiados. La viabilidad técnica dependerá en mucho de las condiciones geológicas locales. Una situación mucho más difícil es cuando se tiene que extraer el agua subterránea de un acuífero delgado situado a profundidad considerable. En vista de la pequeña área saturada de este acuífero, no se deben usar los pozos tubulares. Las acequias y los drenes no son apropiados debido a que requerirán una cantidad excesiva de trabajo de excavación. Algunas veces, en terrenos consolidados, los túneles pueden ser adecuados. Para los sedimentos no consolidados se pueden considerar los pozos recolectores radiales (Figura 7.14).

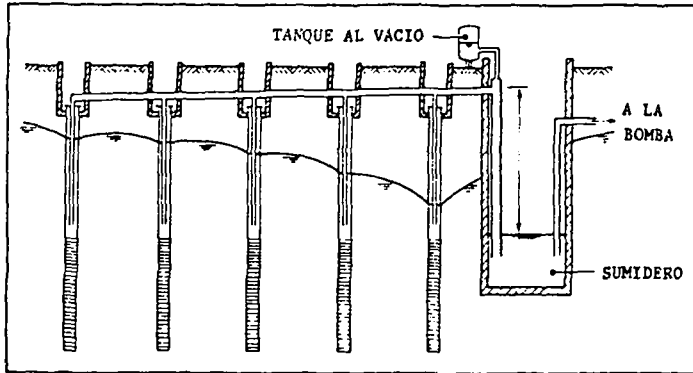


Figura 7.13  
Batería de pozos entubados

Sin embargo, estos pozos requieren diseño y construcción especializada y, por lo tanto, son generalmente menos adecuados para abastecimientos de agua en pequeña escala.

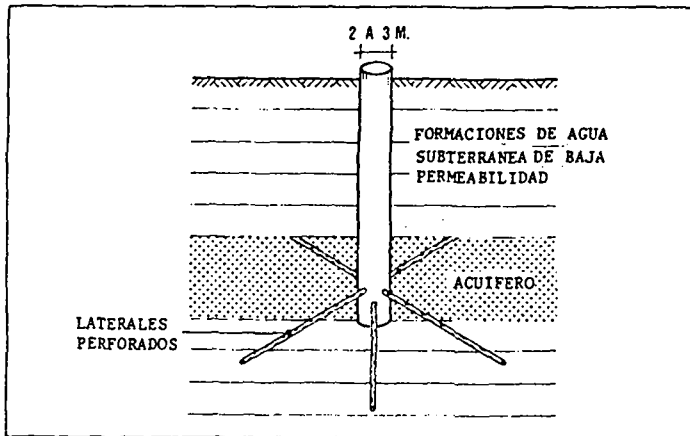


Figura 7.14  
Pozo recolector radial\*

\* También llamado "Pozo Ranney"

Cuando se extrae agua subterránea siempre hay un descenso de la napa de agua subterránea. En principio todas las otras extracciones del mismo acuífero están influenciadas. El efecto de las extracciones de agua subterránea para abastecimientos públicos de agua por lo general no es grande, pero para extracciones de alta tasa, que frecuentemente se hacen para propósitos de irrigación, el efecto posible de un descenso apreciable de la napa de agua subterránea debería ser cuidadosamente investigado. Puede que sea necesario realizar un bombeo de ensayo para proporcionar una base para calcular el futuro descenso de nivel de la napa de agua.

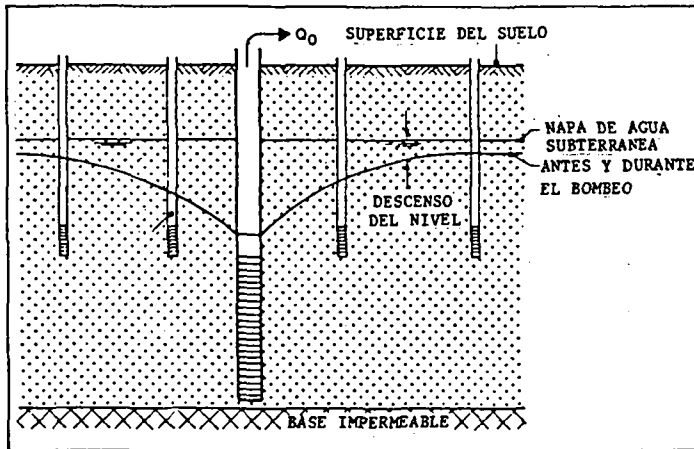


Figura 7.15  
Bombeo de prueba

#### 7.4 GALERIAS DE FILTRACION

Las zanjas como medio de captación y extracción de agua subterránea son sólo un corte en el suelo para hacer accesible el acuífero desde la superficie. Son fáciles de construir ya sea manualmente o con equipo mecánico. El diseño también presentará pocos problemas. Los principales requerimientos son los siguientes (véase Figura 7.16):

- a. Suficiente ancho y profundidad para asegurar que el agua recolectada fluya a baja velocidad (por lo general menos de 0.1 m/seg) de tal forma que se prevenga la erosión de los lados de la acequia y que se limiten las pérdidas de carga.
- b. La profundidad debe ser mayor a 1.0 m y preferiblemente de 1.5 m para reducir cualquier penetración de luz solar en el agua, donde estimulará el crecimiento de plantas y algas y provocará resistencia al flujo de agua.

- c. Los lados de la zanja deben ser ligeramente inclinados para proporcionarle estabilidad. Esto es particularmente importante para el área de la zanja que tenga contacto con la superficie.
- d. Para zanjas profundas, es deseable un terraplén horizontal aproximadamente 0.5 m sobre el nivel normal del agua para facilitar el acceso para el trabajo de limpieza y mantenimiento.

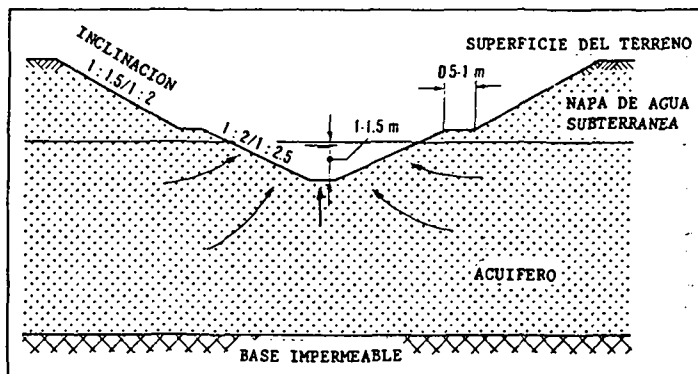


Figura 7.16  
Diseño de zanja de percolación

Cuando se abren las zanjas de percolación, el agua subterránea que ellas contienen está sujeta a la contaminación bacteriana y crecimiento de algas.

Los drenes (Figura 7.17) tienen poros, perforaciones o uniones abiertas que permiten el ingreso del agua subterránea. Se pueden hacer drenes porosos de materiales tales como cerámica o concreto "no-fino" (usando una mezcla de grava de media pulgada y cemento, sin arena). En su mayoría, los drenes perforados son de arcilla vitrificada cocida en un horno, o de plástico o madera. Por lo general los drenes con uniones abiertas son hechos de concreto o de asbesto-cemento.

La elección del material a emplearse en una construcción particular de un dren depende de la fuerza requerida, de la resistencia a la corrosión necesaria para el tipo de agua subterránea que se va a recolectar y, sobre todo, de los costos y la disponibilidad. Las perforaciones en el dren sólo necesitan ser hechas alrededor del mismo cuando éste está situado completamente en el acuífero. Para drenes que estén colocados en la parte superior del acuífero, serán adecuadas las perforaciones en la parte de abajo, y para drenes que se encuentren a mayor profundidad en el acuífero sólo se necesitan perforaciones en la parte superior.

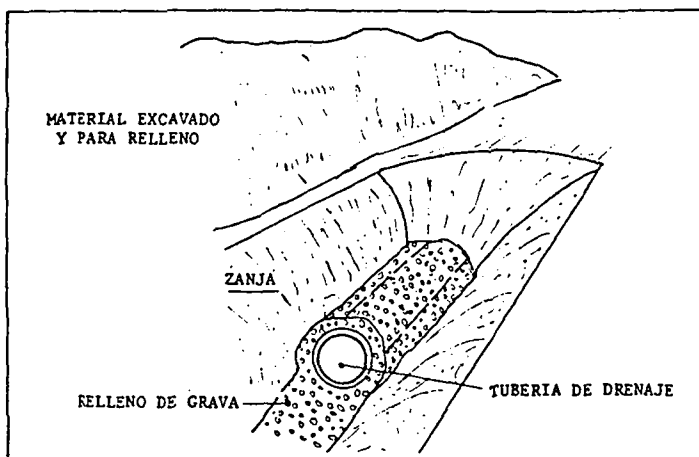


Figura 7.17  
Construcción del dren

En formaciones de terreno grueso, tales como grava, las aberturas del dren se pueden reducir fácilmente, lo suficiente para mantener aparte al material del suelo. En arena fina y de tamaño medio, se debe ubicar los drenes perforados y los drenes con uniones abiertas en una o más capas de grava o arena gruesa, para evitar que la arena fina del acuífero ingrese a los drenes. La capa externa debe ser lo suficientemente fina para mantener fuera del dren el material del acuífero; la grava de la capa interna debe tener un tamaño que sea en cierta forma mayor que las aberturas del dren. Para un acuífero de arena que tenga un tamaño efectivo de aproximadamente 0.2 mm, el paquete de grava podría consistir de dos capas, cada una de ellas de aproximadamente 10 cm de espesor, con granos de 1-2 mm y de 4-8 mm de tamaño. Entonces se pueden usar aberturas del dren de aproximadamente 3 mm de ancho. Cuando se aplica drenes con uniones abiertas de 10 mm de ancho, será necesaria una tercera capa de relleno de grava de granos de 15-30 mm.

Los factores más importantes en el diseño para la construcción del dren son el diámetro interno de las tuberías del dren y la profundidad a la cual se colocan las tuberías y el relleno de grava por debajo de la napa de agua subterránea.

A pesar del relleno de grava, cierta materia suspendida puede ingresar al dren. Cuando se permite la acumulación de este material, éste bloqueará el dren. Para evitar esto, se debe dar un tamaño al dren de tal manera que la velocidad del flujo en ellos sea lo suficientemente elevada para expulsar cualquier depósito de sedimento. Para que los drenes realicen una auto-limpieza, la velocidad debe ser superior a los 0.5 m/seg pero no mayor de 1.0 m/seg; de lo contrario, las pérdidas de fricción serán demasiado elevadas. Esto provocaría un abatimiento de la napa y una extracción del agua subterránea desiguales a lo largo del dren. Para acomodar la cantidad que se acumula del agua recolectada y el flujo a través del dren puede ser necesario proporcionar aumentos de tamaño en el dren a lo largo de su extensión.

Obviamente, en vista de los costos de excavación, se debe colocar los drenes a una profundidad no mayor de la necesaria. Sin embargo, los drenes deben permanecer completamente sumergidos en el agua subterránea, estando la parte superior del relleno de grava por lo menos a 0.5 m de profundidad, incluso al final de un largo período de sequía cuando es probable que la napa de agua subterránea esté en su nivel más bajo. Usando como base la napa de agua subterránea existente, el diseñador debe tener en cuenta un descenso de nivel operativo de por lo menos 1 m, más una nueva baja de 1 m de la napa de agua subterránea bajo condiciones de sequía. Así, la parte superior del relleno de grava debería estar a una profundidad de 2.5 m o más, bajo la napa de agua existente. Cuando el hierro y el manganeso están presentes en el agua subterránea, hay un serio riesgo de que los depósitos de hierro y manganeso obstruyan las aberturas del dren y el relleno de grava. Entonces es necesario colocar los drenes a mayor profundidad a unos 4-5 m por debajo de la napa de agua existente, para evitar que el oxígeno penetre en los drenes y forme los depósitos de precipitación de estos metales.

## 7.5 POZOS EXCAVADOS

Los pozos excavados se hacen simplemente cavando un hoyo en el suelo. Son ampliamente usados en muchos países y pueden ser bastante satisfactorios si las condiciones son las correctas. Por lo general, no se requiere equipo o habilidades especiales para su construcción.

La experiencia muestra que el diámetro de un pozo excavado debe ser, por lo menos, de 1.2 m si dos hombres van a trabajar juntos en el fondo del pozo durante la excavación. Para un pozo que sirve un solo domicilio o una comunidad agrícola, por lo general, este diámetro mínimo es adecuado, pero cuando más gente depende de un pozo excavado se debe proporcionar un pozo más grande, de 2-3 m de diámetro. En raras ocasiones es útil un mayor aumento del tamaño de un pozo, ya que la producción adicional de agua obtenida de esta manera es probable que sea muy pequeña.

Debido a su gran diámetro y volumen, los pozos excavados sirven para la captación y el almacenamiento del agua subterránea. Debido a la capacidad de almacenamiento, se puede extraer el agua temporalmente a una escala mayor que el influjo de recarga al pozo. El efecto de almacenamiento es particularmente importante cuando los usuarios extraen el agua mayormente en proporción máxima durante unas cuantas horas en la tarde.

La profundidad a la que se debe y puede cavar un pozo depende del tipo de material perforado y de la fluctuación de la napa freática. La estabilidad del material y los costos de excavación constituyen un factor importante. Los pozos particulares, por lo general, tienen una profundidad menor a los 10 m. Los pozos excavados para uso comunal frecuentemente son más profundos, 20-30 m es usual, y se ha alcanzado profundidades de 50 m y más.



Foto de G. de Sabatino para WFP

Figura 7.18  
Extracción de agua de un pozo excavado revestido con concreto (Togo)

La mayoría de pozos excavados necesitan un revestimiento interno. Para esto, se usan materiales tales como ladrillo, piedra, mampostería, vaciado de concreto en un armazón dentro del hueco, o anillos de concreto prevaciados. El revestimiento sirve a varios propósitos. Durante la construcción ofrece protección contra derrumbes y hundimiento y evita que la tierra derrumbada llene el hoyo excavado. Después de que se completa el pozo, retiene las paredes. En material consolidado el pozo puede permanecer sin revestimiento pero siempre es recomendable uno en la parte superior (Figura 7.19). En formaciones no consolidadas se debe revestir el pozo en toda su profundidad (Figura 7.20). La sección del pozo que penetra en el acuífero requiere un revestimiento con aberturas o perforaciones que permitan al agua subterránea fluir hacia el pozo.

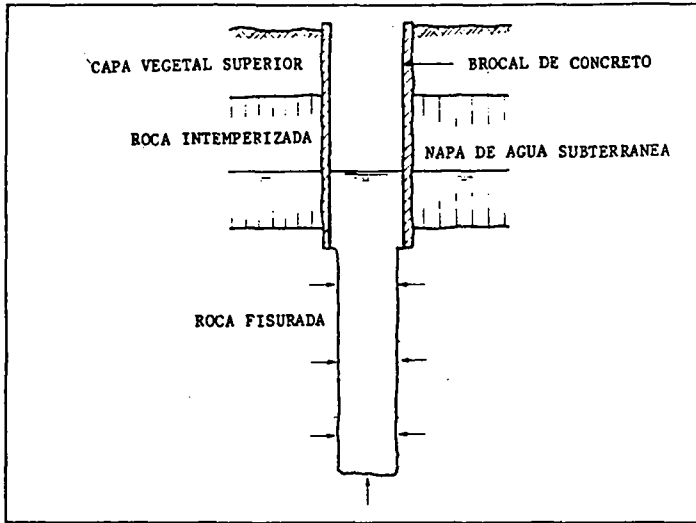


Figura 7.19  
Pozo excavado en formación de roca

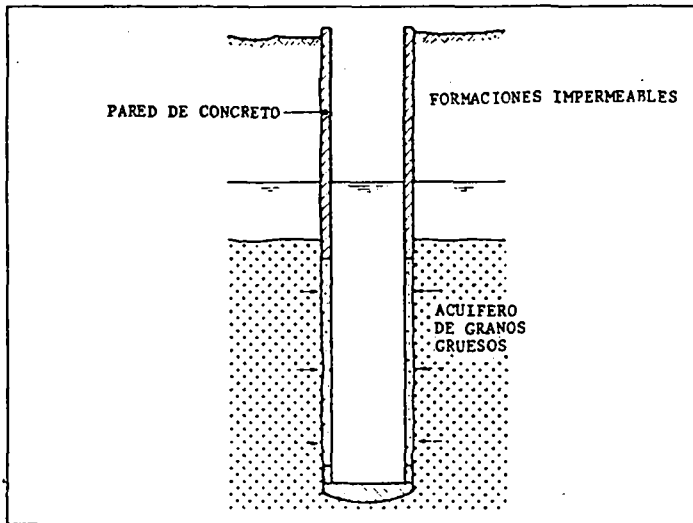


Figura 7.20  
Pozo excavado en material granular grueso



En acuíferos de arena fina es imposible proveer un revestimiento con aberturas o perforaciones lo suficientemente pequeñas para retener el material y evitar que éste ingrese al pozo. En tales casos, frecuentemente se extiende el revestimiento a lo largo de toda la profundidad del pozo sin ninguna abertura o perforaciones. El agua subterránea ingresa al pozo sólo a través del fondo, el cual está cubierto con varias capas de grava graduada que mantienen en el fondo la arena fina de la formación que contiene agua (Figura 7.20). Por ejemplo, tres capas de grava graduada, cada una de 15 cm de espesor, pueden usarse con granos de 1-2 mm para la capa más profunda, luego, tamaños efectivos de 4-8 mm y 20-30 en la parte superior.

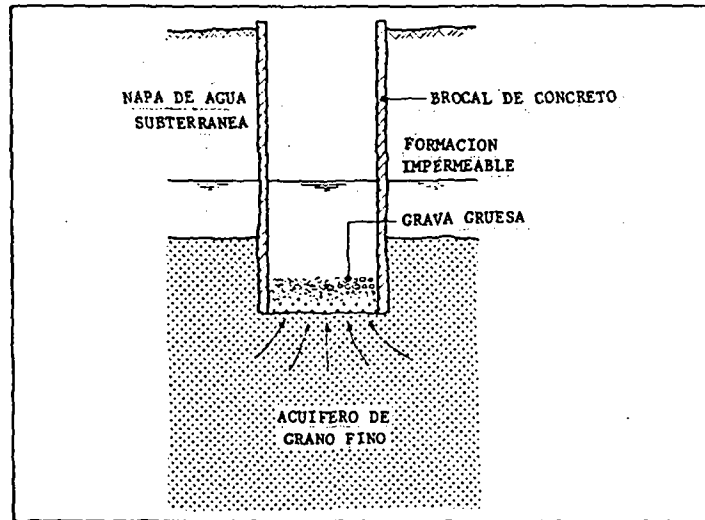


Figura 7.21  
Pozo excavado en acuífero granular fino

El revestimiento de un pozo excavado provee también un sello para evitar que el agua contaminada se filtre de la superficie al pozo. Esto no es muy efectivo si el pozo está al descubierto, porque en ese caso el agua que está en éste será contaminada de cualquier manera, especialmente si se extrae el agua usando cubetas y soga. Como precaución mínima, se debe extender el revestimiento del pozo por lo menos 0.5 m por encima del suelo para formar un "muro" alrededor del borde externo del pozo. Se debe construir, entonces, una losa delantera de concreto en la superficie del suelo, que se extienda aproximadamente 2 m a todo el rededor del pozo. Al vaciarse la losa de concreto también se sella cualquier fisura entre el revestimiento del pozo y las paredes del hueco excavado y la losa, evita así que el agua contaminada de la superficie se filtre al pozo.

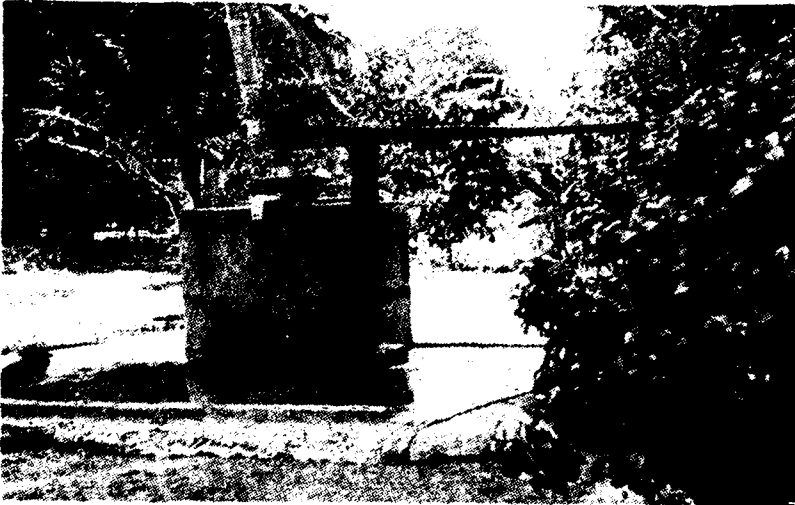


Foto CIR

Figura 7.22  
 Pozo excavado cubierto con bomba de mano (Tailandia)

Todas estas medidas tienen sólo un efecto limitado si el pozo permanece al descubierto. Se puede obtener una protección satisfactoria de la seguridad bacteriológica del agua de un pozo, únicamente si la parte superior de éste está completamente sellada con una losa hermética en la cual se monta una bomba para extraer el agua (Figura 7.23). Se debe proveer un buzón de acceso que pueda cerrarse apretada y seguramente, para permitir la desinfección del agua en el pozo mediante la cloración. Aunque el sellado de los pozos excavados es en sí mismo simple, no siempre es factible, especialmente cuando el estándar de instalación de bombas es pobre y no se puede alcanzar adecuadamente los requerimientos de mantenimiento.

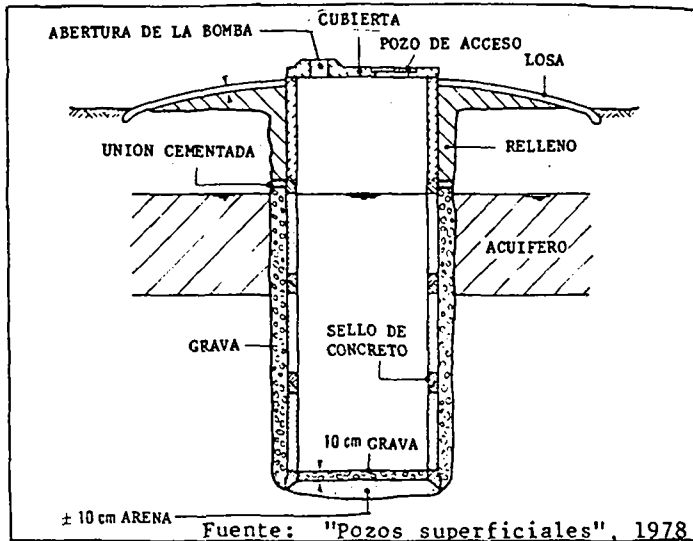


Figura 7.23  
 Pozo excavado sellado para protección sanitaria

Algunas veces, los pozos excavados en realidad se "construyen" en una excavación temporal, la cual es desaguada y apuntalada contra el derrumbe conforme sea necesario (Figura 7.24). Se puede usar cualquier tipo de material de construcción. Por economía, fuerza y estabilidad, son preferibles las paredes circulares. La mampostería y el enladrillado son grandemente usados; el concreto reforzado también es popular, ya sea prefabricado o vaciado en el sitio. Para permitir que el agua subterránea fluya hacia el pozo, las paredes de mampostería y enladrillado son hechas con uniones abiertas. En revestimientos de concreto se puede vaciar pedazos pequeños de tubos delgados o manguera de jardín para proveer aberturas. Para evitar el ingreso de agua contaminada de la superficie del suelo, se debe hacer el relleno con cuidado en capas delgadas que estén firmemente apisonadas.

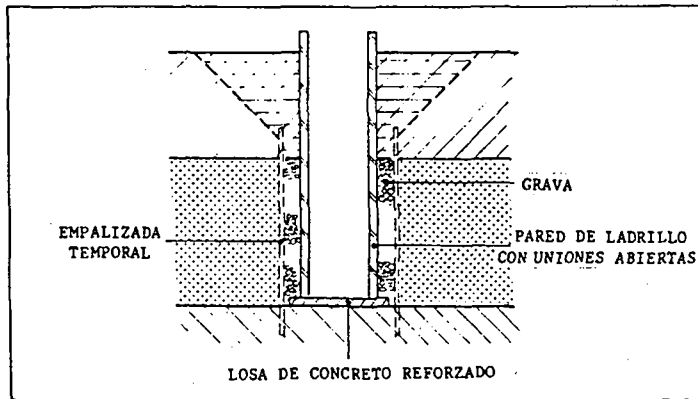


Figura 7.24  
 Pozo excavado construido en excavación temporal

Las formaciones consolidadas rígidas no requieren un soporte inmediato, porque su estabilidad natural permite que se ejecute la excavación temporal como un hoyo abierto con paredes sin soporte. Sin embargo, es prudente realizar la excavación sección por sección, como se muestra en la Figura 7.25.

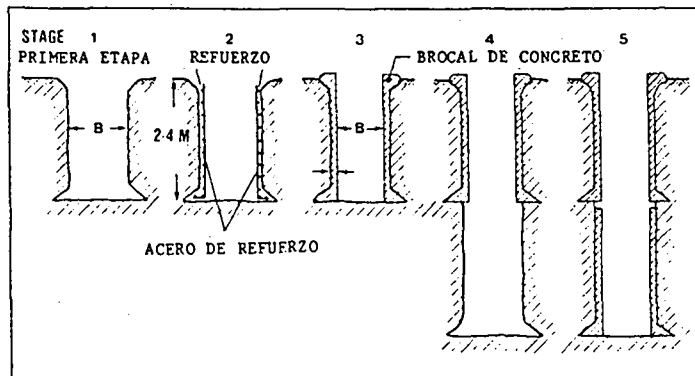


Figura 7.25  
 Brocal de concreto reforzado construido en el sitio

Cada sección debe tener una altura de 2-4 m y se mantiene en su lugar mediante la presión que el terreno circundante ejerce sobre ella.

El método más común de construcción de un pozo excavado es mediante la excavación desde el interior, removiendo la tierra del fondo. Entonces, el revestimiento se hunde debido a su propio peso (Figura 7.26). Para pozos cuyo diámetro sea superior a los 3-4 m, la excavación se realiza frecuentemente con herramientas manuales. Por debajo de la napa de agua subterránea se hace necesario proveer drenaje para permitir que se realice una mayor excavación. En este método de construcción se usa en su mayoría paredes de formación circular, debido a que ellas se asientan fácilmente y no corren el riesgo de deformarse cuando las secciones de revestimiento del pozo estén sujetas a fuerzas dispares.

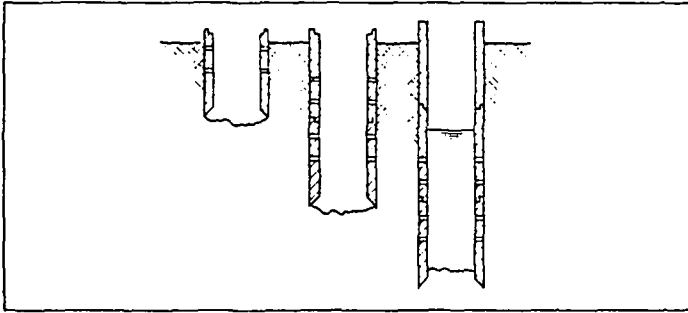


Figura 7.26

Hundimiento de un pozo excavado mediante la excavación desde el interior

Se puede usar trabajos de mampostería en piedra, ladrillo o bloques de concreto para construir el revestimiento del pozo usando un fuerte "zapato" de acero como base (Figura 7.27). El "zapato" evita que, al "calzarlo", el revestimiento se asiente en forma dispares, lo que podría causar deformación y rajaduras. Obviamente, el concreto reforzado es un material de construcción más adecuado en este respecto. También permite que se construya el revestimiento del pozo sobre el suelo conforme progresa el hundimiento del pozo. Se puede usar tuberías de concreto, cemento-asbesto o plástico de mayor diámetro, como material de revestimiento del pozo. Cuando no se dispone de estos o son demasiado caros y difíciles de manipular, se puede usar aros prefabricados de concreto para formar el revestimiento (Figura 7.28). No hay ninguna razón válida que explique por qué los aros prefabricados de concreto no deben ser más ampliamente usados. Estos no requieren albañiles capacitados, sólo piedras adecuadas, ladrillos o grava, y no es difícil capacitar, para vaciar el concreto, a trabajadores sin mayores habilidades. Por lo general, se puede conseguir la arena y grava necesarias en la vecindad del sitio del pozo.

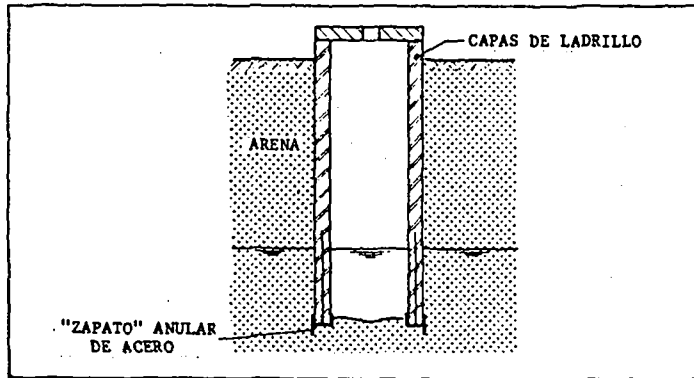


Figura 7.27  
 Pozo excavado con revestimiento de ladrillos

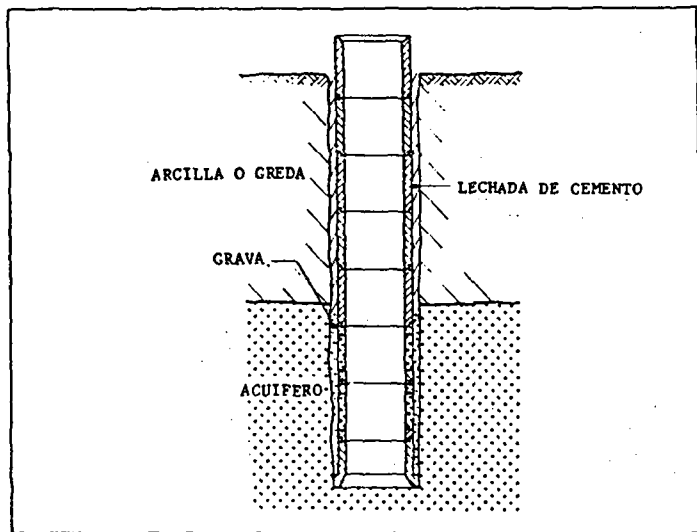


Figura 7.28  
 Construcción de pozo excavado con anillos prefabricados

El extremo inferior del primer aro está provisto de un "zapato" que tiene en su interior un borde cortante; el diámetro exterior es en cierta forma más grande para facilitar el hundimiento y reducir la fricción del terreno a lo largo de la parte externa (Figura 7.29). Durante el hundimiento, el primer aro deja un espacio alrededor de la pared. En formaciones sueltas este espacio será auto sellado, pero en formaciones cohesivas, se le debe

rellenar con lechada de cemento o con arcilla batida como protección contra la filtración del agua contaminada de la superficie del suelo. En el fondo del acuífero los aros están hechos de concreto "no-fino" (cemento y grava de media pulgada, sin arena) a través de los cuales el agua puede ingresar al pozo.

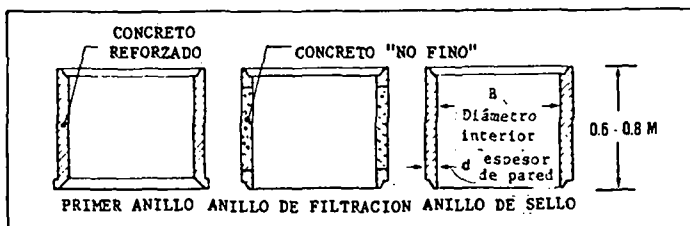


Figura 7.29  
Anillos prefabricados de concreto



Foto VDO

Figura 7.30  
Anillos de concreto reforzado para el revestimiento de un pozo excavado

Frecuentemente, se puede obtener una construcción más económica y técnicamente mejor, combinando los dos métodos de construcción descritos anteriormente. La construcción de la Figura 7.31 proporciona una excelente protección contra el ingreso de agua contaminada que se filtra desde la superficie; también permite hacer el pozo a mayor profundidad cuando después de cierto tiempo el agua subterránea desciende a un nivel más bajo. El diseño que se muestra en la Figura 7.32 no tiene esta ventaja pero cuesta mucho menos para construir.

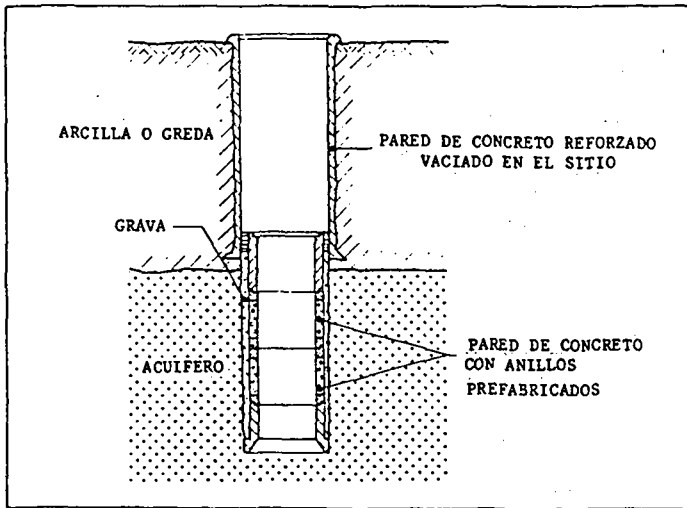


Figura 7.31

Construcción de pozo excavado usando combinación de métodos

Está claro que no es tan fácil proteger el agua de un pozo excavado contra la contaminación bacteriana. Resumiendo, se recomienda las siguientes precauciones:

1. La parte superior del revestimiento debe ser impermeable, preferentemente a una profundidad varios metros por debajo del nivel más bajo alcanzado por el agua en el pozo;
2. El espacio entre las paredes del hoyo cavado y el revestimiento debe estar sellado con arcilla batida, o mejor con lechada de cemento;
3. La parte superior del revestimiento debe extenderse a unos 0.5 m sobre el nivel del suelo y se le debe cubrir con un revestimiento impermeable en la cual se va a montar una bomba (de mano) para extraer el agua del pozo;
4. Se debe construir una losa delantera alrededor del borde levantado del revestimiento ("muro" o "brocal") de aproximadamente 2 m de ancho, inclinada hacia adelante, y con un canal que drene cualquier agua que se derrame fuera del sitio del pozo;
5. Se debe clorar el agua del pozo para desinfección luego que aquél ha sido completado; esto se debe repetir.

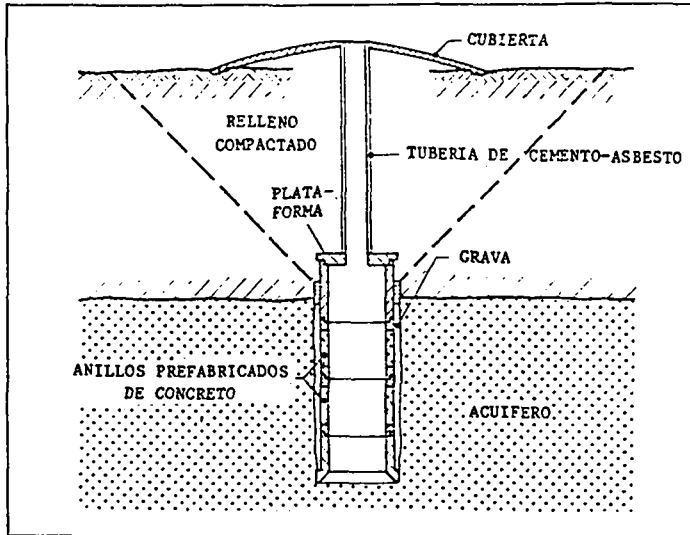


Figura 7.32  
 Construcción de pozo excavado usando combinación de métodos

## 7.6 POZOS TUBULARES

Un pozo tubular tiene una envoltura o revestimiento que consiste de tuberías simples (ademe) frente a formaciones de terreno que no contengan agua y secciones perforadas o ranuradas frente a un acuífero (rejillas o filtros).

Los pozos tubulares de poca profundidad y diámetro son bastante adecuados para abastecimientos de agua de poca capacidad. Tales pozos tubulares se pueden construir mediante el clavado, el uso de chorros a presión, y el taladro. El método de perforación con uso de máquinas es más adecuado para pozos tubulares de mayor diámetro, diseñados para la captación de cantidades considerables de agua a profundidades mayores, o para captar acuíferos que estén cubiertos por capas de roca dura o formaciones similares de terreno. La construcción de pozos con máquina perforadora es una técnica muy versátil que se puede usar para cualquier profundidad considerable y en la mayoría de las formaciones geológicas. Sin embargo, requiere equipo complicado y conocimiento y experiencia considerables. En su mayoría la realizan perforistas especializados. En el Anexo 2 se ofrece un estudio detallado de métodos de perforación de pozos.



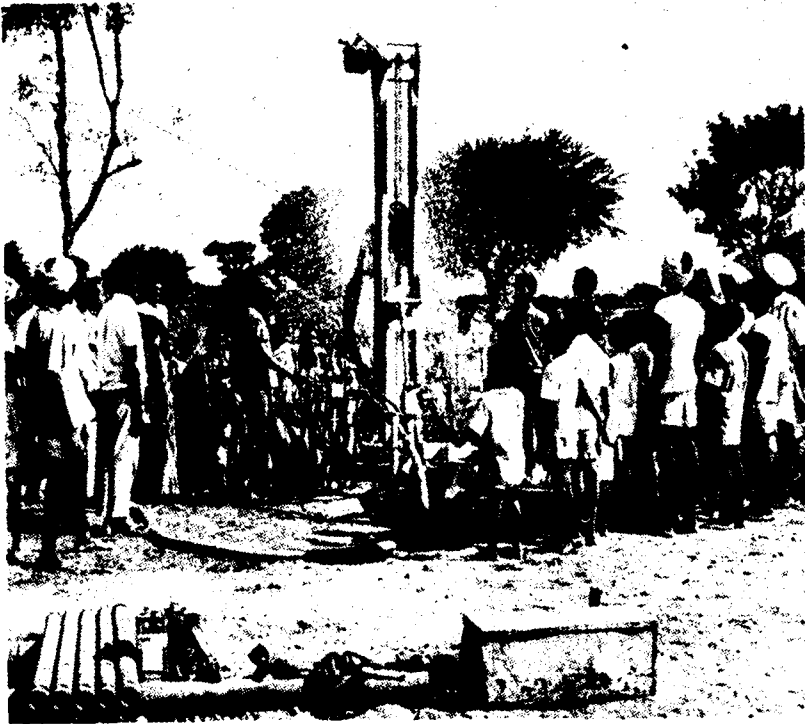


Foto UNICEF por Bash

Figura 7.33  
Perforación de un pozo

Se puede perforar pozos tubulares a más de 200 m de profundidad, aún a través de roca dura. Sin embargo, nunca existe una garantía de que se hallará agua. Por lo tanto, es importante hacer un uso completo de cualquier dato disponible de prospección y de exploración cuando se escoje el sitio en donde se va a perforar un pozo tubular. Es esencial la ayuda de gente experimentada y calificada, junto con la información obtenida a través de estudios hidrogeológicos.

Los pozos clavados (hincados) (Figura 7.34) se hacen mediante la introducción de una punta de hincar con filtros (llamada "puntera") en una formación que contenga agua. Para evitar daños a la puntera cuando se le clava a través de guijarros o capas delgadas de material duro, la punta en el extremo inferior de la criba es hecha de acero sólido, por lo general con diámetro ligeramente mayor que el de la propia criba. La mayoría de las punteras tienen un diámetro dentro de los 30-50 mm. Conforme se prosigue con el clavado y la puntera se hunde en el terreno, se enrosca secciones sucesivas de la tubería en la parte superior, de tal forma que el extremo superior de la envoltura siempre esté sobre la superficie del suelo. La puntera es "clavada" en el terreno usando un mecanismo simple para golpear la parte superior de la tubería. Se puede usar muchos arreglos. La Figura 7.35 es indicativa.

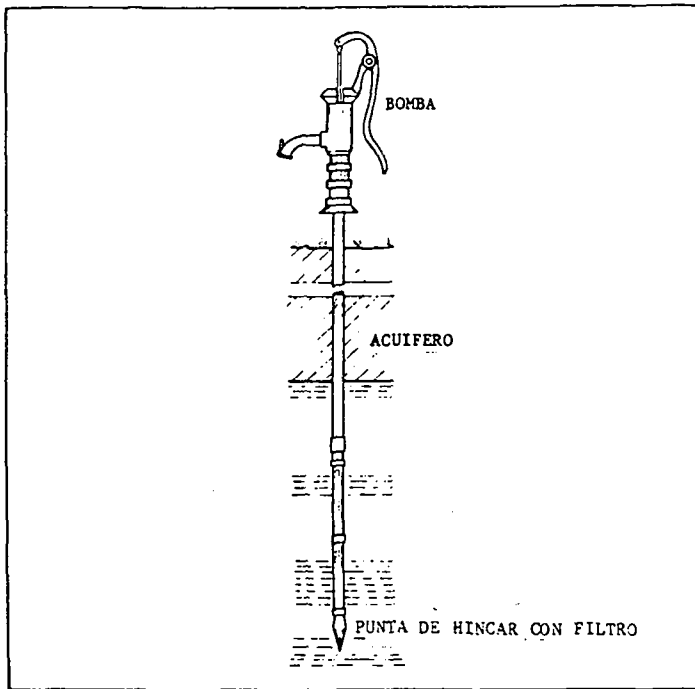


Figura 7.34  
Pozo clavado

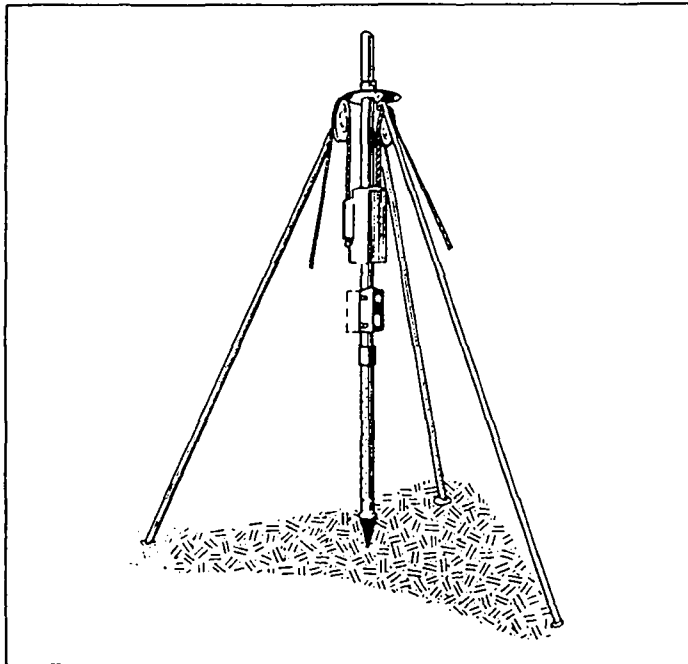


Figura 7.35  
Arreglo para clavado de pozo

Cualquiera que sea el método que se use, es esencial asegurar que los golpes sean rectos y verticales, de lo contrario, se doblará y quizás se romperá la tubería. Ya que es la tubería la que transmite los golpes a la punta, se debe usar una tubería fuerte, de paredes gruesas, particularmente cuando se espera una perforación difícil en formaciones duras.

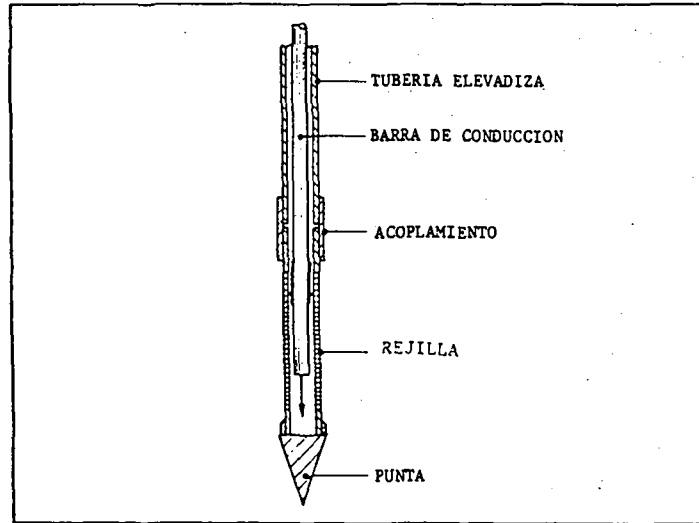


Figura 7.36  
Perforación de pozo con barra interna de conducción

En el método de perforación de pozos que se muestra en la Figura 7.36, la barra "de conducción" se mueve con libertad dentro de la sección filtrante. La tubería es "halada" dentro del terreno en lugar de ser guiada en él, de tal forma que se puede usar tuberías de clases de dureza normal. Los pozos clavados son especialmente adecuados para formaciones de arena suave a las que la punta clavada penetra con facilidad. Los pozos clavados no pueden hacerse en áreas donde se encuentran cantos o guijarros u otros obstáculos en el terreno. En todas las formaciones, la resistencia contra el clavado aumenta con la profundidad. Por lo tanto, la aplicación de pozos clavados está limitada a obras superficiales, de profundidad inferior a los 10-15 m. Por la misma razón, el diámetro es, por lo general, pequeño, variando de una estrechez de 3 cm a un máximo de aproximadamente 10 cm, siendo el más común un diámetro de 5-8 cm. No se puede instalar bombas sumergidas dentro de diámetros tan pequeños. Los pozos clavados también tienen la desventaja de que las aberturas de filtración pueden atorarse con arcilla o material similar durante la conducción. Es casi imposible retirarlos después de la terminación del pozo clavado.

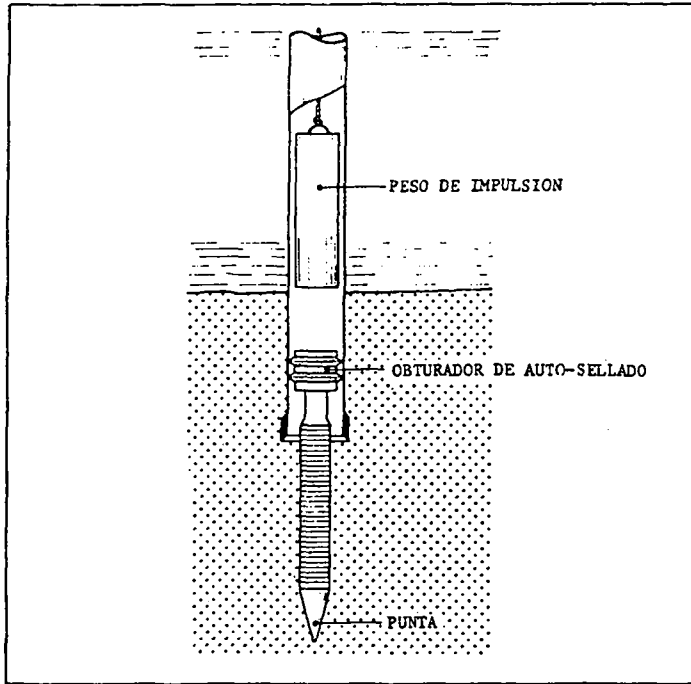
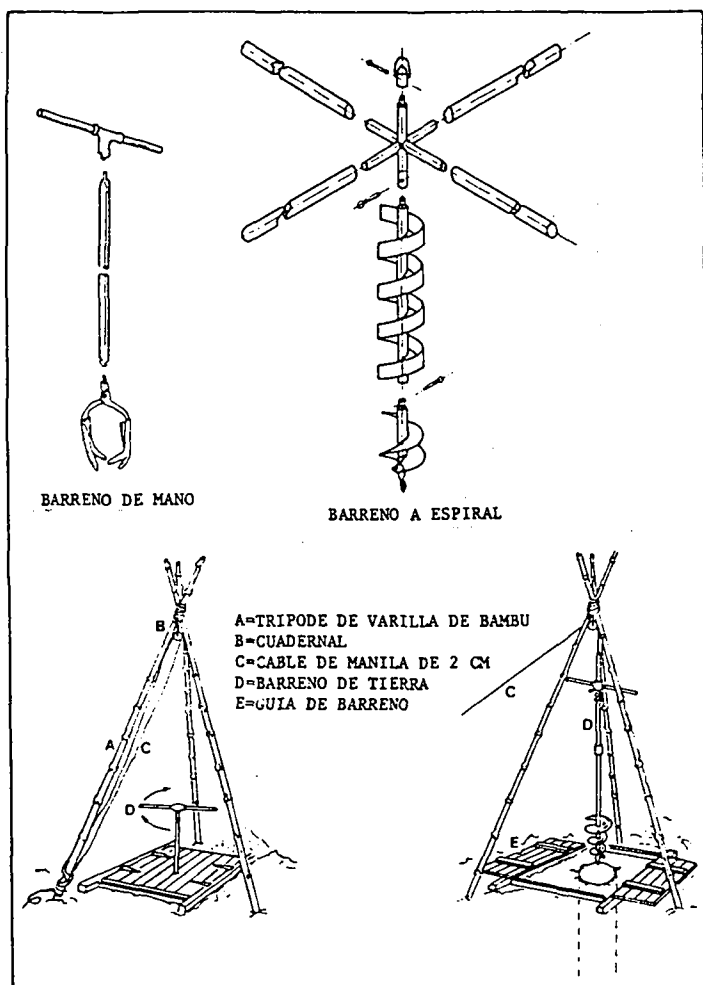


Figura 7.37  
Puntera con unión deslizante

Se puede evitar el atoro de la rejilla del pozo usando una unión deslizante (Figura 7.37). Durante el clavado, la rejilla está dentro de la envoltura y sólo después de alcanzar la profundidad deseada se le saca para ingresar a la formación que contenga agua. Cuando existen formaciones duras directamente por debajo de la superficie del suelo, una solución mejor es empezar con un barrenado de tierra para perforar un hueco lo más profundo posible con un diámetro ligeramente mayor que el tamaño de la punta del pozo que se va a perforar (Figura 7.38). Cuando el hueco está lo suficientemente derecho, vertical y profundo, esto también ayuda a lograr un pozo a plomo, el cual será difícil de obtener de otra forma.

Si luego de la terminación del pozo clavado se desinfecta completamente el interior, el agua de él será bacteriológicamente segura y es probable que permanezca así. Sin embargo, el rendimiento de un pozo clavado es pequeño, entre 0.1 y 1 l/seg. Esto será suficiente sólo para uso domiciliario particular o de una comunidad pequeña. Para un abastecimiento mayor de agua, se puede interconectar un número de pozos clavados con una línea central de succión y se les puede bombear como una unidad, pero esta solución es algo cara. En áreas rurales de países en desarrollo los pozos clavados tienen la ventaja de ser una instalación fácil y rápida, sin necesidad de equipo o conocimientos especializados.



Fuente OMS  
(No. 7462)

Figura 7.38  
Equipo de perforación de pozo

Los pozos perforados a chorro en apariencia no difieren en mucho de los pozos clavados, pero la punta en el extremo inferior de la sección filtrante es hueca en lugar de ser sólida, y el pozo se perfora a través de la acción erosiva de una corriente de agua lanzada desde la punta (Figura 7.39).

Comparada con los pozos clavados, la perforación de pozos con chorros es mucho más rápida. No se necesita fuerza mecánica, de tal forma que se puede usar plástico en vez de acero para la envoltura y la rejilla. Obviamente, los pozos de chorro sólo se pueden hundir en formaciones no consolidadas.

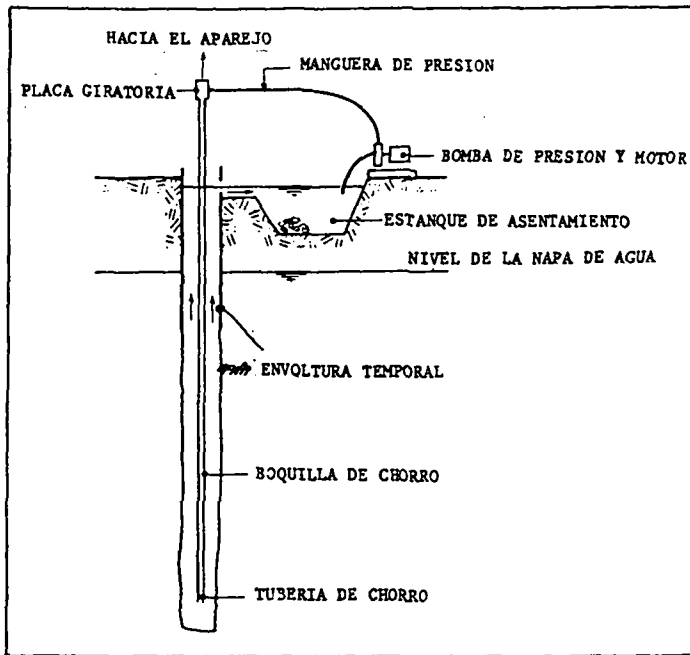


Figura 7.39  
Pozos perforados a chorro

Los acuíferos arenosos son más adecuados para este método; a menudo la arcilla y la tierra endurecida ofrecen demasiada resistencia al chorro de agua. Al igual que con los pozos clavados, no se puede pasar los cantos rodados, pero un proceso simple consiste en revisar la formación subterránea de antemano sondeando con la tubería que se muestra en la Figura 7.40 a la profundidad deseada. Esta tubería también se utiliza en una técnica de perforación a chorro usando una tubería de chorro separada para introducir por "lavado" la envoltura de plástico y la rejilla dentro del terreno. Comparada con el pozo clavado, la profundidad que se puede obtener es, en cierta forma, mayor para los mismos diámetros de aproximadamente 5-8 cm. El atoro de las aberturas de filtración del pozo no constituye un problema.

La perforación de pozos "taladrados" es una técnica que se presta mejor para uso en terrenos blandos, tales como arena y caliza blanda. Así, la perforación por "taladro" es usada particularmente en áreas deltáicas en donde son más comunes estos tipos de suelo. Para profundidades superficiales, se emplea barrenos en espiral como se muestra en la Figura 7.38. Para profundidades mayores se puede aplicar barrenos de tipo cubeta rotados nuevamente desde la superficie por medio de un eje de conducción.

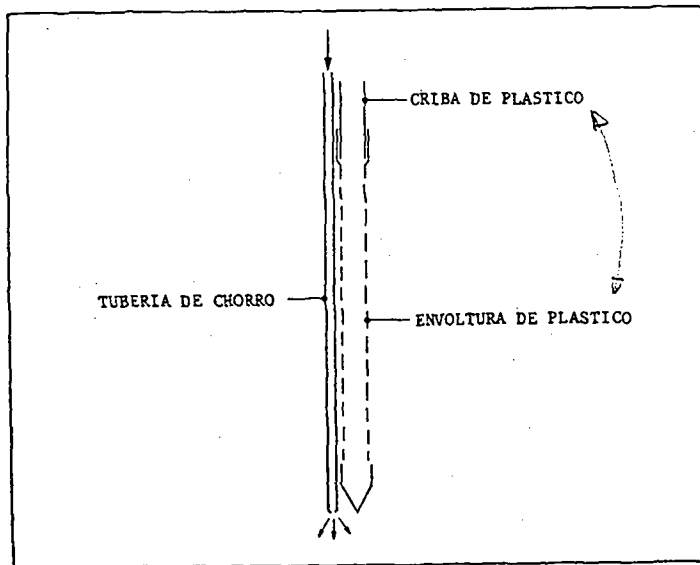


Figura 7.40  
Perforación de pozos con chorro, con una tubería de chorro externa

Este eje se construye de una sección de varilla de acero de 3-6 m de largo y se conecta mediante acoplamientos de acción rápida. La parte superior se llama vástago cuadrado de transmisión y tiene un corte transversal cuadrado para recibir la torsión necesaria de un tablero giratorio. En el fondo, el barreno está provisto de una cara cortante que penetra en el material del hueco y descarga en la cámara cilíndrica que se encuentra encima. Cuando se llena se saca el barreno a la superficie y se abre el fondo articulado. Cada vez que esto sea necesario, se debe desmontar el eje de conducción y acoplar nuevamente. Es una labor tediosa y que ocupa tiempo.

Estará claro que los pozos taladrados son adecuados principalmente en formaciones de suelo blandos no consolidados. En terreno cohesivo, tal como arcilla, a menudo no es necesaria una envoltura temporal para apoyar el hueco por encima de la napa de agua subterránea, pero en terreno "flojo", se debe instalar una envoltura temporal. Por debajo de la napa de agua subterránea el barreno sí rompe las capas de tierra, pero no puede sacar a la superficie el material taladrado, ya que las cortaduras escapan del contenedor cuando se extrae el barreno del fondo del hueco. Se debe emplear un "achicador", el cual se hace descender en el hueco usando un cable, para recolectar las cortaduras. Se mueve hacia arriba y hacia abajo el "achicador" cerca al fondo del hueco; durante el descenso, las cortaduras son atrapadas mediante una válvula de cierre. Toda la operación aumenta grandemente el tiempo requerido para la perforación de un pozo.

## Método de "Poza Lodera" para hundimiento de pozos entubados

El método de "Poza lodera" es una técnica autóctona de bajo costo y de labor intensiva para el hundimiento de pozos entubados en formaciones de terreno aluvial no consolidado, tales como los que se encuentran en áreas deltáicas. Se puede construir pozos entubados con una profundidad de hasta 50 m usando este método bajo condiciones adecuadas. En Bangladesh, el método de "pozo lodera" ha sido y sigue siendo usado extensivamente para el hundimiento de numerosos pozos entubados para captar los abundantes recursos de agua subterránea poco profunda presentes en ese país deltáico.

Para iniciar la operación de perforación, se hace un hueco, una "poza", de aproximadamente 0.6 m de diámetro y 0.5 m de profundidad, en el cual se vacía agua. Se erige un andamio de bambú sobre la pocita. Se coloca verticalmente en el terreno una pieza de tubería de acero y se realiza la perforación moviendo la tubería hacia arriba y hacia abajo con una acción de "golpeteo". Para esto, se opera una cabria o viga inclinada de bambú atada a la tubería y apoyada en el andamio. Al pie de la tubería de perforación, el suelo, aflojado por el agua, ingresa a la tubería permitiéndole a ésta penetrar en el terreno. Como resultado de la acción de "golpeteo" de la tubería de perforación, el suelo aflojado y el agua (el lodo) son impulsados hacia arriba y salen a través de la parte superior o boca de la tubería.

Durante el hundimiento del pozo, un hombre se coloca en el andamio y cuida que la tubería sea introducida en forma perfectamente vertical. En cada golpe hacia arriba, él cierra con su mano la boca de la tubería de perforación, lo que resulta en una acción de succión. Esto ayuda al aflojamiento del suelo al fondo de la tubería y a la salida de la tierra removida. Se agrega más piezas de tubería conforme el cuerpo de secciones de tubería de perforación penetra a mayor profundidad en el terreno.

Conforme continúa el proceso de hundimiento del pozo, se recolectan muestras del terreno tomándolas del flujo del lodo que sale por la boca de la tubería de perforación. Estas muestras se toman después de cada 1.5 m que la tubería de perforación avanza, y luego se les examina. Se detiene la operación de perforación cuando se penetra suficientemente en formaciones que contengan una buena cantidad de agua. Se retira pieza por pieza toda la longitud de la tubería, teniendo cuidado de mantener intacto el hoyo perforado. Inmediatamente después del retiro de los tubos de perforación, se arma la envoltura o "revestimiento" del pozo, consistente en tuberías de plástico completas con sus secciones filtrantes, y se le hace descender en el hoyo hasta la profundidad determinada.

Se puede obtener un indicio del requerimiento de tiempo y labor para el hundimiento de un pozo entubado, usando el método de "pozo lodera" de un ejemplo referente a un pozo hundido en el Distrito de Konaburi en Dacca (Bangladesh) a una profundidad de aproximadamente 28.5 m. Se cita los siguientes datos:



- Tiempo requerido para la perforación del pozo 11 horas
- Tiempo requerido para la construcción de la plataforma 4 horas
- Labor requerida para la perforación del pozo
  - . calificada 2 hombres
  - . no calificada 3 hombres
- Labor requerida para la construcción de la plataforma
  - . calificada 1 hombre
  - . no calificada 1 hombre

EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA

Allsebrock, J.C.P.

WHERE SHALL WE DIG THE WELL

En: Appropriate Technology, Vol. 4(1978) No. 4.

A.W.W.A.

GROUNDWATER

AWWA Manual M21, 130 p.

American Water Works Assoc. New York, 1973

Beyer, M.G.

DRINKING WATER FOR EVERY VILLAGE

En: Assignment Children, UNICEF, 1976, No. 34

Bowen, R.

GROUND WATER

Applied Science Publishers Ltd., 1980, 227 p.

Brown, R.H. (Ed.)

GROUND WATER STUDIES

UNESCO, Paris, 1973-1977

Brush, R.E.

WELLS CONSTRUCTION

Peace Corps, Washington, D.C., 1980

BURGEAP

LA CONSTRUCTION DES PUIITS EN AFRIQUE TROPICALE

Ministère de la Coopération, Paris, 1974

(Series Techniques Rurales en Afrique)

Castany, G.

TRAITE PRATIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

Dunod, Paris, 1967, Second edition

Castany G.

PROSPECTION ET EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

Dunod, Paris, 1968, 717 p.

Campbell, M.D.; Lehr, J.H.

WATER WELL TECHNOLOGY

McGraw-Hill Book Co., New York, 681 p.

Cruse, K.

A REVIEW OF WATER WELL DRILLING METHODS

En: Journal of Engineering Geology, 1979, (Vol. 12), pp. 79-95

Davis, S.N.; De Wiest, R.J.N.

HYDROGEOLOGY

John Wiley & Sons, New York, 1966

Eberle, M.; Persons, J.L.; Lehr, J.H. et al.

APPROPRIATE WELL DRILLING TECHNOLOGIES

National Water Well Assoc., Worthington, Ohio, USA, 95 p.

Freeze, R.A.; Cherry, J.A.  
GROUNDWATER

Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.Y., USA, 1979

Gibson, U.P.; Singer, R.D.  
SMALL WELLS MANUAL

Agency for International Development, Washington, 1969, 156 p.

GROUNDWATER AND WELLS

Johnson Division, UOP, St. Paul, Minnesota,  
(3rd printing), 1975, 440 p.

Holmes, A.

PRINCIPLES OF PHYSICAL GEOLOGY

Thomas Nelson & Sons Ltd., Londres, 1966

Huisman, L.

GROUNDWATER RECOVERY

McMillan, Londres, 1972, 336 p.

Hwindl, L.A. (Ed.)

HIDDEN WATER IN ARID LANDS

Report of a Workshop on Groundwater Research Needs

París, 25 Noviembre 1975.

Association of Geoscientists for International Development (AGID), 1976

Jain, J.K.

HANDBOOK ON BORING AND DEEPENING OF WELLS

Government of India, Ministry of Food and Agriculture, Nueva Delhi, 1962

MANUAL OF WATER WELL CONSTRUCTION PRACTICES

U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1975, 175 p.

(EPA-570/9-75-001)

McJunkin, F.E.

JETTING SMALL TUBEWELLS BY HAND

Washington, D.C., July 1960, p. 3

(Peace Corps Technical Notes No. 1)

Moehrl, K.E.

WELL GROUTING AND WELL PROTECTION

En: Journal of the American Water Works Association, No. 4, 1964(56), pp.  
423-431

Romero, J.A.C.

MANUAL DE POZOS RASOS

Organización Panamericana de la Salud, Washington, D.C., 1977

SHALLOW WELLS

DHV Consulting Engineers, Amersfoort, Netherlands, 1978, P. 189

Slow, D.A.V.; Skidmore, J.; Beyer, A.R.  
PRELIMINARY BIBLIOGRAPHY ON GROUNDWATER IN DEVELOPING COUNTRIES  
Association of Geoscientists for International Development (AGID),  
Noviembre, 1976

Todd, D.K.  
GROUNDWATER HYDROLOGY  
John Wiley & Sons, New York, 1959

Watt, S.B.; Wood, W.E.  
HAND DUG WELLS AND THEIR CONSTRUCTION  
Intermediate Technology Publications Ltd., Londres, 1976, 234 p.



## 8. CAPTACION DE AGUA SUPERFICIAL

### 8.1 CAPTACION DE AGUA DE RIO

En países tropicales, los ríos y arroyos a menudo tienen una gran fluctuación estacional en su caudal. Esto afecta la calidad del agua en períodos de lluvia, el agua puede tener un bajo contenido de sólidos disueltos, pero a menudo tiene una turbiedad elevada. En períodos de seca, el caudal de los ríos es bajo y la carga de sólidos disueltos es menor diluida.

Los arroyos o corrientes montañosas llevan algunas veces una carga elevada de sedimento pero el contenido mineral es generalmente bajo y la contaminación humana está frecuentemente ausente. En llanuras y estuarios, los ríos, por lo general, fluyen lentamente excepto cuando hay una inundación. El agua puede ser relativamente clara pero casi siempre está contaminada y será necesario un tratamiento para hacerla apta para propósitos de bebida y usos domésticos.

Por lo general la calidad de agua de río no diferirá en mucho a través de la amplitud y profundidad del lecho del río; por lo tanto, se puede colocar la captación en cualquier punto adecuado en donde se pueda extraer el agua del río en cantidad suficiente. El diseño de las obras de captación de agua de río debe ser tal que se evite el atoro y la socavación. Se debe asegurar la estabilidad de la estructura de captación aún bajo condiciones de inundación.

En lugares donde el río no transporta pedruzcos o cantos rodados que puedan dañar las obras de captación, estas instalaciones aún sin protección pueden ser adecuadas (Figura 8.1).

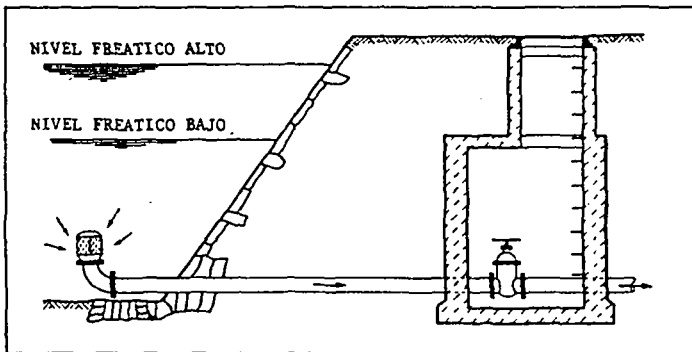


Figura 8.1  
Obras de captación de río no protegidas

En casos en los que se necesite la protección de las instalaciones, las estructuras de captación del tipo mostrado en la Figura 8.2 pueden ser adecuadas.

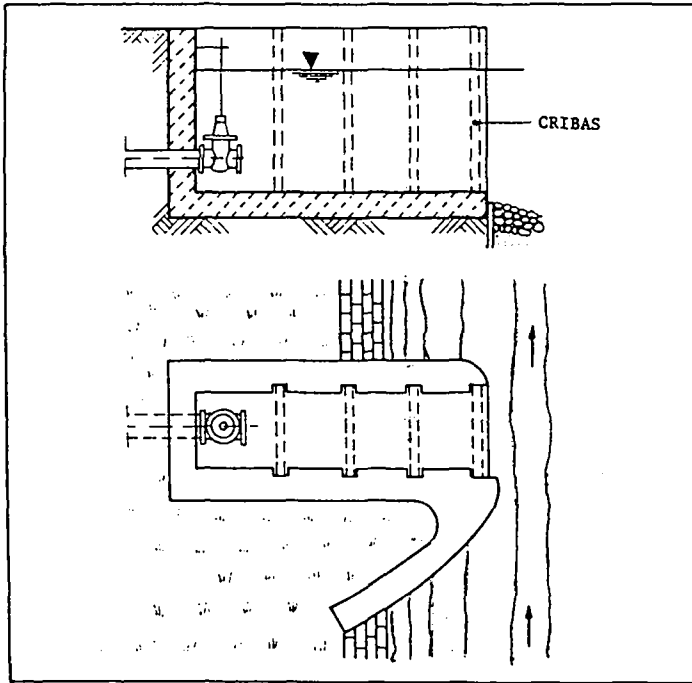


Figura 8.2  
Estructura de una captación de río

El fondo de la estructura de captación debe estar por lo menos 1 m por sobre el lecho del río para evitar el ingreso de cualquier pedruzco o cantos rodados. Se puede necesitar un desviador para evitar los desechos y la materia flotante, tales como troncos y palizadas. Para reducir el ingreso de sedimentos y materia suspendida, la velocidad de flujo a través de la captación debe ser baja, preferiblemente inferior a 0.1 m/seg.

Una captación de río siempre requiere profundidad suficiente de agua en el lecho del río. Pueda que se tenga que construir un vertedero sumergido a través del río, aguas abajo de la captación, para asegurar que se dispondrá de la profundidad necesaria de agua, aún en períodos secos.

Frecuentemente, se necesita de bombeo para la captación del agua de río. Si la variación entre el nivel alto y el nivel bajo de agua en el río no es mayor a los 3.5-4 m, se puede usar una bomba de succión colocada en la ribera del río (Figura 8.3).

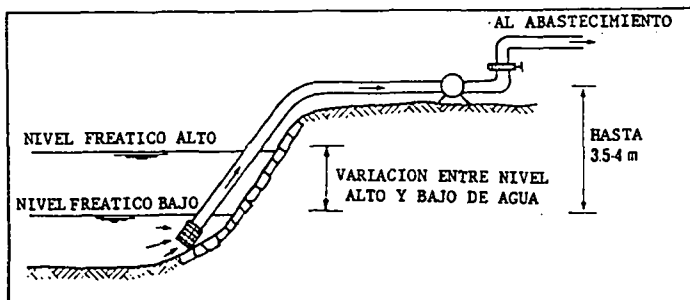


Figura 8.3  
Captación de agua de río mediante bombeo

Se necesitará un arreglo diferente de captación si la carga de bombeo necesaria excede los 3.5-4 m. Un arreglo que merece considerarse usa un pozo-sumidero construido en la ribera del río. Se recolecta el agua del río con drenes de filtración colocados por debajo de su lecho; el agua fluye por gravedad hacia el pozo de recolección. Como el nivel más bajo de agua en el sumidero probablemente estará demasiado profundo para una bomba de succión colocada sobre el suelo, por lo general se extrae el agua con una bomba sumergible o una bomba de eje colocada bien abajo en el pozo-sumidero.

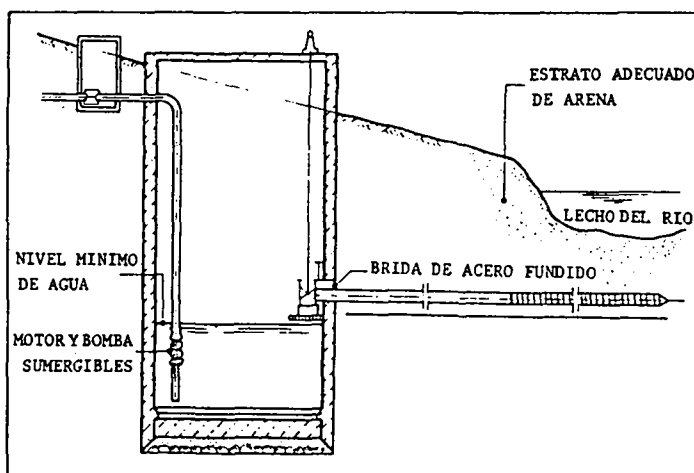


Figura 8.4  
Captación en la ribera del río usando drenes de filtración



## 8.2 CAPTACION DE AGUA DE LAGO

La calidad del agua de lago está influenciada por la auto-purificación que se logra a través de la aeración, procesos bioquímicos y asentamiento de sólidos suspendidos. El agua lacustre puede ser clara, de bajo contenido orgánico y con elevada saturación de oxígeno. Por lo general, la contaminación humana y la animal sólo presentan un riesgo para la salud cerca de las orillas del lago. A cierta distancia de la orilla el agua de lago está generalmente libre de bacterias patógenas y virus. Sin embargo, pueden estar presentes las algas, particularmente en las capas superiores del agua.

En lagos profundos, la acción de las olas y la turbulencia causada por el viento que golpea la superficie, no afectarán los estratos inferiores. No habiendo mezcla, se desarrollará una estratificación termal con las cálidas capas superiores de agua flotando encima de las capas frías, las cuales tienen una mayor densidad de masa. Como resultado de la estratificación termal, puede ser que las capas más profundas de agua difieran en calidad del agua de la parte superior. La estratificación termal puede ser bastante estable, especialmente en condiciones tropicales. La Figura 8.5 nos ofrece un ejemplo.

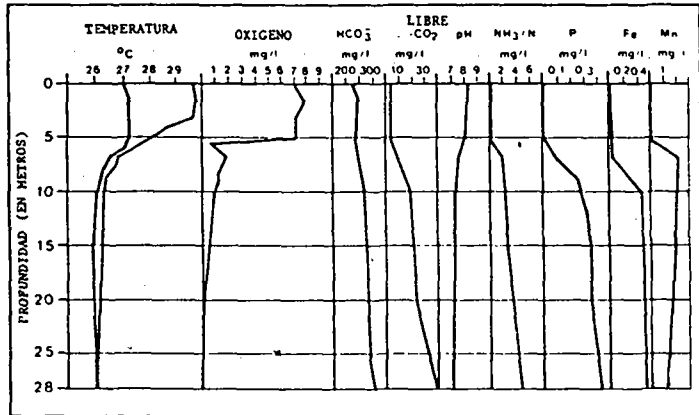


Figura 8.5  
Variación de la calidad del agua con la profundidad en lagos profundos (Indonesia)

Se debe tener en cuenta la estratificación termal cuando se decide sobre la locación y profundidad de una captación de agua de lago para propósitos de abastecimiento de agua. Otro factor importante es la presencia de algas en las capas superiores del agua.

En lagos profundos, con agua de bajo contenido de nutrientes (nitratos) fosfatos, etc.) la calidad química del agua será casi la misma en toda la profundidad. Para propósitos de abastecimiento, el agua de estratos inferiores tendrá la ventaja de una temperatura prácticamente constante. Se debe tomar medidas para extraer el agua a cierta profundidad por debajo de la superficie (Figura 8.6).

Los lagos profundos con agua que tiene un elevado contenido de nutrientes, muestran una marcada diferencia de la calidad del agua a profundidades distintas. Se debe extraer el agua de las capas superiores del lago que tengan el mayor contenido de oxígeno. Sin embargo, como es posible que la capa superior de agua se calienta, la captación de agua para abastecimientos deberá estar preferiblemente a 3-5 m por debajo de la superficie.

En lagos de poca profundidad, la captación debe estar lo suficientemente elevada sobre el fondo del lago como para evitar el ingreso de sedimento (Figura 8.7).

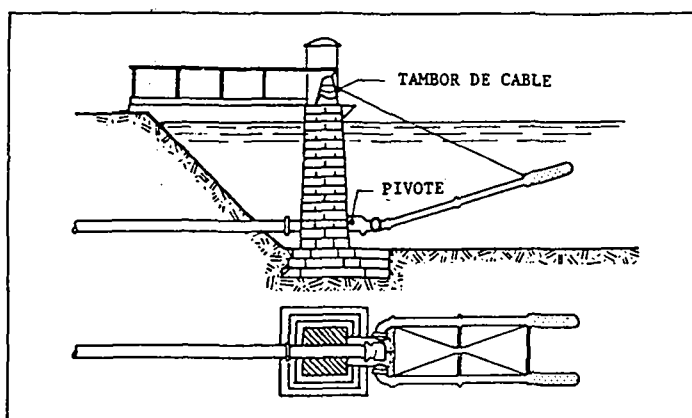


Figura 8.6  
Captación de agua de lago de profundidad variable

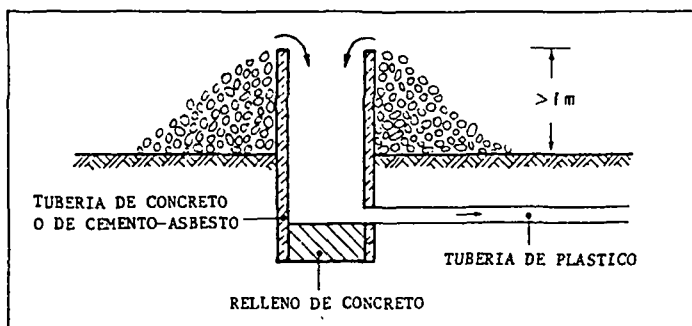


Figura 8.7  
Estructura de captación en el fondo de un lago poco profundo

### 8.3 CONSTRUCCIONES TIPICAS DE CAPTACION

Para abastecimientos de agua de comunidades pequeñas, siendo poca la cantidad de agua necesaria, a menudo se puede usar estructuras de captación muy simples. Con un uso de agua per cápita de 30 litros/día y siendo la captación máxima 4 veces la demanda promedio de agua, 1,000 personas requerirían una capacidad de captación de sólo 1.4 litros/seg. Una tubería de captación de 150 mm sería suficiente para mantener la velocidad de entrada de flujo por debajo de 0.1 m/seg. Si se permite una velocidad de flujo de entrada de 0.5 m/seg, una tubería de tan sólo 60 mm sería adecuada.

Para captaciones de poca capacidad se puede usar arreglos simples usando tuberías flexibles de plástico (Figura 8.8).

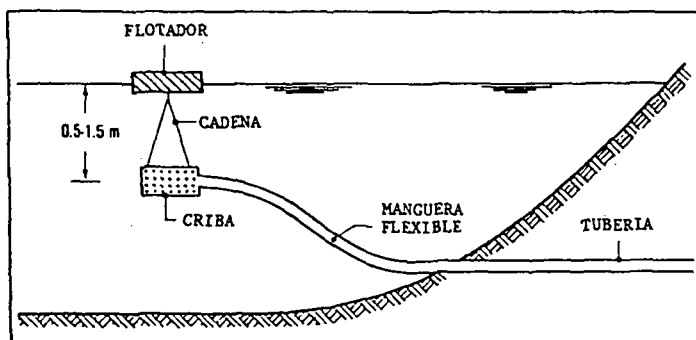


Figura 8.8  
Estructura simple de captación de agua

En la Figura 8.9 se muestra otra construcción de captación, usando un barril flotante para sostener la tubería de captación. El agua se bombea desde el pozo-sumidero.

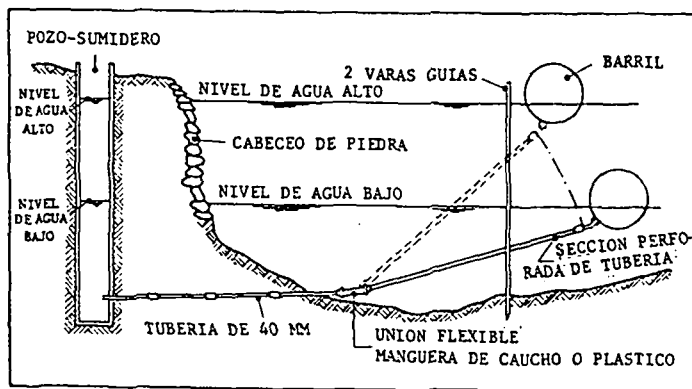


Figura 8.9  
Captación por flotación

#### 8.4 REPRESAS PEQUEÑAS Y RESERVORIO DE PEQUEÑAS COMUNIDADES

Hay muchas comunidades pequeñas cuya única fuente de abastecimiento de agua es una pequeña represa o estanque. Estos reciben el nombre de "hafir" (Sudán), "tapkis" (Nigeria), "reservorios" (América del Sur), "tanque" (India), "estanque" (oriente de África) u otros nombres locales. En este manual nos referimos a todos ellos como reservorios pequeños o estanques de pequeñas comunidades.

Los reservorios pequeños y estanques de pequeñas comunidades varían en área desde pequeños hasta grandes, de varias hectáreas. En origen pueden ser enteramente naturales - depresiones en áreas llanas - o especialmente construidos para el propósito. Si son hechos por el hombre, pueden haber sido excavados para el propósito expreso de conservar agua o pueden ser hoyos de los cuales se tomó arcilla para la construcción. Muchos son una combinación de estanques hechos por el hombre y estanques naturales que han sido ahondados o extendidos con los años para aumentar su capacidad de conservación.

Algunos se van a encontrar dentro de poblados o pueblos pequeños. Muy habitualmente se localizan justo fuera del área de las pequeñas comunidades. En India, a menudo tienen peces que constituyen una valiosa fuente de alimento para los pobladores.

Desafortunadamente, también se les utiliza para lavar y para bañarse. Muy a menudo están contaminados, constituyendo un riesgo en el mejor de los casos, y son propagadores potenciales de epidemias. Con mucha frecuencia albergan bacterias patógenas, virus y parásitos que provocan un número incalculable de enfermedades y muertes, particularmente entre los niños.

El agua puede estar llena de sedimento o materia coloidal en especial inmediatamente después de las lluvias. Algunos estanques de pequeñas comunidades han existido por siglos; pueden estar llenos de vegetación acuática. Algunos son recipientes de desechos de toda clase. Otros tienen una conservación relativamente buena, hermosos en apariencia, y constituyen una característica distintiva del paisaje.

En la práctica, es imposible evitar la contaminación de estos pequeños reservorios y estanques de pequeñas comunidades. Por su naturaleza se encuentran en el punto más bajo del área circundante y todo el drenaje de las pequeñas comunidades encuentra su camino hacia ellos.

En un estanque de excavación reciente, la construcción de obras de captación no presenta dificultad si se realiza antes de que se llene el tanque. En un estanque ya establecido se tiene que realizar el trabajo mientras el agua está en uso. Probablemente todo el trabajo será hecho a mano y no se dispondrá de herramientas especiales.

En estanques en donde el agua tiene turbiedad elevada, se le extrae mejor justo por debajo de la superficie. Un dispositivo flotante de captación puede ser adecuado. Se puede usar tuberías de plástico en lugar de hierro

galvanizado para la tubería de recolección; también se puede usar el bambú para este propósito. El soporte flotante puede estar hecho de bambú o de otros materiales localmente disponibles.

La presencia de algas y de otra vegetación acuática, así como de peces en el estanque, hará necesario fijar una criba alrededor de la captación. Si se quiere evitar el sifonaje, el nivel de la abertura de la captación debe estar por debajo del punto más bajo de extracción. Se puede cavar un pozo cerca a la ribera y la tubería de captación puede ser empujada (usando una gata pesada) o conducida desde el pozo hasta el estanque. Entonces se recubre la tubería mientras el pozo es revestido con mampostería o concreto y la captación flotante es fijada. Se debe ahondar el pozo para formar un sumidero que permitirá cierto asentamiento de la materia suspendida.

## 8.5 CRIBAS

El cribado del agua se hace pasándola a través de barras estrechamente espaciadas, rejillas o planchas perforadas. El cribado no cambia la calidad química o bacteriológica del agua. Sirve para retener material grueso y materia suspendida de mayor tamaño que las aberturas de las cribas. Aún cuando el material de cribado pueda formar una capa de filtro de depósitos, el cribado es aún de naturaleza puramente mecánica.

En ingeniería de abastecimiento de agua, se usan cribas para propósitos diferentes:

- (i) Retiro de materia flotante y materia suspendida de gran tamaño que, de lo contrario, podría atorar las tuberías, malograr las bombas y otro equipo mecánico, o interferir con la operación satisfactoria del proceso de tratamiento. Las cribas fijas se usan para este propósito y se limpian en el sitio, manual o mecánicamente.
- (ii) Clarificación del agua mediante el retiro de materia suspendida incluso de tamaño pequeño, para aligerar la carga en los subsecuentes procesos de tratamiento, en particular se les usa para evitar que los filtros se atoren con demasiada rapidez.

Por lo general las cribas de barra, o rejilla, consisten en fajas de acero o barras con un espaciamiento de 0.5 a 5 cm. Si la cantidad de material que se espera cribar es pequeña, las barras son colocadas de modo muy empinado en un ángulo de 60-75° con la horizontal, y la limpieza se hace manualmente usando rastrillos. Si se retiene cantidades mayores, la limpieza manual aún es factible. Para facilitar el trabajo de limpieza se debe colocar las barras en un ángulo de 30-45° con la horizontal (Figura 8.10).

El agua debe fluir hacia la criba de barras (rejilla) a una velocidad bastante baja, 0.1-0.2 m/seg. Una vez que el agua ha pasado por la rejilla, la velocidad de flujo debe ser por lo menos de 0.3-0.5 m/seg para evitar el asentamiento de materia suspendida.

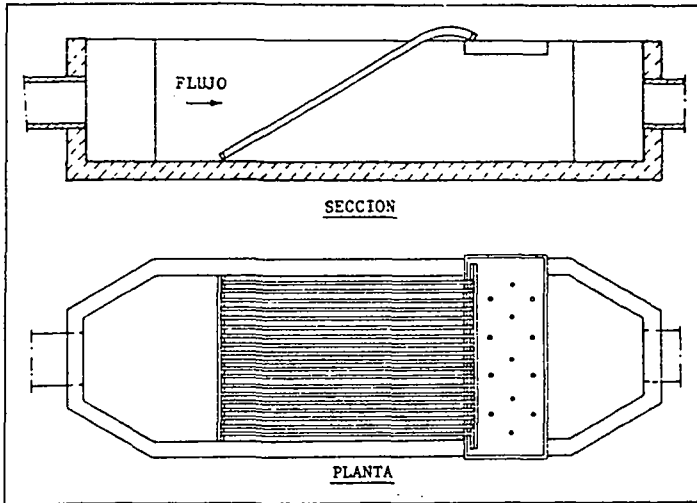


Figura 8.10  
Criba de barras fijas o rejilla

En las aberturas entre las barras, la velocidad de flujo debe estar limitada a 0.7 m/seg; de lo contrario la materia blanda deformable será obligada a pasar a través de las aberturas de la criba. Una rejilla limpia permitirá al agua pasar con una pérdida de carga de sólo unos pocos centímetros. Sin embargo, la pérdida de carga se eleva grandemente cuando el atoro de la rejilla aumenta. Una limpieza regular debe limitar la pérdida de carga a 0.1-0.2 m de la carga de agua. Teniendo en cuenta el retraso en la limpieza y las fallas mecánicas, es una buena práctica diseñar una criba de barra para una pérdida de carga de 0.5-1.0 m.



CAPTACION DE AGUA SUPERFICIAL

DESIGN OF SMALL DAMS

U.S. Bureau of Reclamation, Washington, D.C. 1973

Instituto de Ingeniería Sanitaria

ABASTECIMIENTOS DE AGUA POTABLE A COMUNIDADES RURALES

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 1971

Institute of Water Engineers

MANUAL OF BRITISH WATER ENGINEERING PRACTICE (4th Edition)

W. Heffer & Sons Ltd., Cambridge, 1969

Wood, J.L.; Richardson, J.

DESIGN OF SMALL WATER STORAGE AND EROSION CONTROL DAMS

Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1975, 74 p.

LIBRARY  
INTERNATIONAL REFERENCE CENTRE  
FOR COMMUNITY WATER SUPPLY AND  
SANITATION (ICWS)





## 9. RECARGA ARTIFICIAL

### 9.1 INTRODUCCION

El agua subterránea tiene, por lo general, la gran ventaja sobre el agua superficial de ríos y lagos de que está libre de bacterias y organismos patógenos que causan enfermedades relacionadas con el agua. Sin embargo, no siempre se dispone de agua subterránea y, por lo general, las cantidades que se puede captar son muy limitadas. Como se indicó anteriormente, la extracción de agua subterránea no puede, a la larga, exceder la cantidad de recarga natural. Por lo tanto, cuando esta recarga es pequeña, el rendimiento seguro del acuífero también es pequeño. Es posible, bajo condiciones adecuadas, complementar la recarga natural de un acuífero y de esta forma añadir a su capacidad de rendimiento seguro. A esto se llama la recarga artificial. Esto incluye tomar medidas para alimentar agua de ríos o lagos al acuífero, ya sea directamente o esparciendo el agua sobre el área de filtración, permitiendo que percole hacia abajo, hasta el acuífero. La recarga artificial puede tener un gran potencial para mejorar los abastecimientos de agua a las comunidades pequeñas en muchas partes del mundo.

Aparte de añadir al rendimiento de un acuífero, la recarga artificial también aporta purificación del agua filtrada. Cuando el agua de un río o lago fluye a través de una formación de suelo granular (Figura 9.1), se realizará el proceso de filtración, con el resultado de una remoción sustancial de las impurezas suspendidas y coloidales, bacterias y otros organismos. El acuífero actúa como un filtro lento de arena.

Siempre que se recupere el agua a una distancia suficiente desde el punto de recarga, preferiblemente a más de 50 m, el agua fluirá subterráneamente durante un tiempo considerable, normalmente dos meses o más. Como resultado de los procesos bioquímicos de adsorción y filtración, el agua se volverá clara y segura para el uso doméstico. En muchos casos se la puede usar sin ningún otro tratamiento.

Los principales métodos de recarga artificial de los acuíferos son la filtración ribereña y el esparcimiento del agua sobre superficies permeables de suelo.

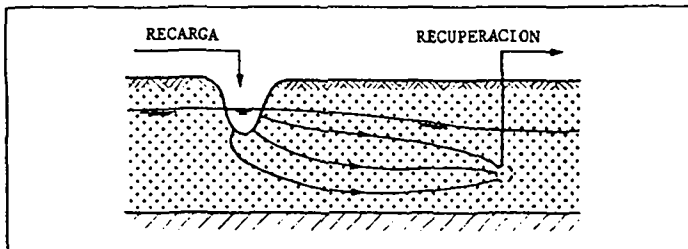


Figura 9.1  
Recarga artificial del acuífero.

Si se combina la recarga artificial con el almacenamiento subterráneo del agua, el agua tomada de un río en la estación húmeda se podría almacenar en el acuífero y recuperar durante el período seco cuando el flujo del río sea pequeño o esté totalmente ausente (Figura 9.2). A menudo será mucho más fácil y más económico proveer ese almacenamiento subterráneo de agua en vez de proveer reservorios de superficie. Esto es particularmente cierto en el caso de áreas llanas. Otras ventajas adicionales son la gran reducción de las pérdidas de agua por evaporación y la prevención del crecimiento de algas.

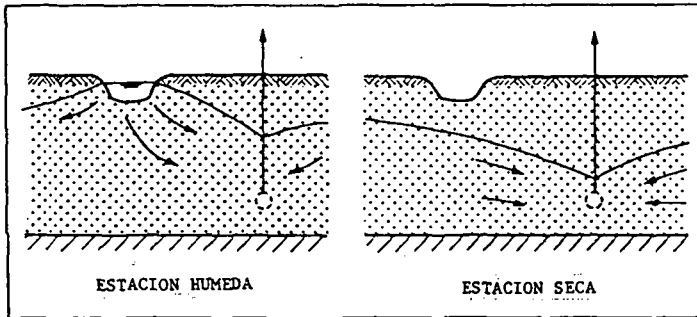


Figura 9.2  
Recarga artificial con almacenamiento subterráneo de agua

### 9.2 FILTRACION RIBEREÑA

Para la filtración ribereña (recarga inducida) se construyen galerías o líneas de pozos paralelos a la ribera de un río o lago, a una distancia suficiente. Esto se muestra en la Figura 9.3.

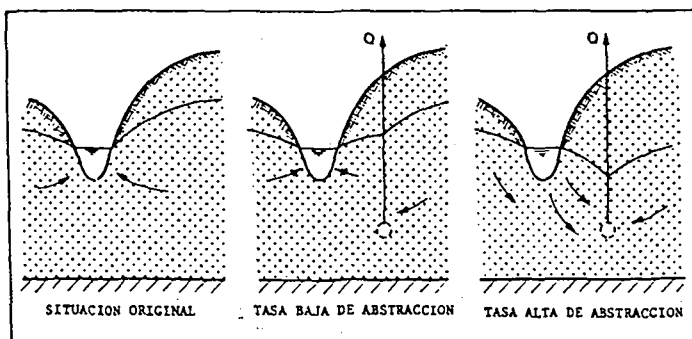


Figura 9.3  
Filtración ribereña

En la situación original, el efluente proveniente del agua subterránea alimenta el caudal del río. Cuando se extraen cantidades de agua subterránea, disminuye el flujo de agua subterránea hacia el río. La extracción de agua resulta en un descenso de la napa de agua subterránea. Para tasas elevadas de abstracción, se puede hacer descender la napa de agua subterránea cerca a la orilla por debajo del nivel de agua en el río. El agua del río será entonces inducida a ingresar al acuífero. Siempre que la permeabilidad del lecho sea adecuada, se podrán recuperar cantidades considerables de agua sin afectar mucho la napa de agua subterránea más profunda (Figura 9.4). El agua abstraída será, en su mayor parte, recarga inducida, es decir, agua que se origina desde el río.

Además de los factores hidrogeológicos, el diseño de un esquema de recarga inducida está gobernado por dos factores: la tasa de extracción del agua subterránea ( $q$ ) de la galería o línea de pozos, y la distancia ( $L$ ) (véase Figura 9.4). Para dar tiempo suficiente para los procesos de purificación no debe ser menor a los 20 m y preferiblemente debe ser de 50 m o más. El parámetro importante es el tiempo en que el agua viaja subterráneamente. El mínimo es tres semanas, y cuando sea posible debe ser de dos meses o más. Evidentemente, el tiempo de viaje no depende solamente de la distancia  $L$  sino también de la tasa de extracción ( $q$ ) y del espesor y porosidad del acuífero.

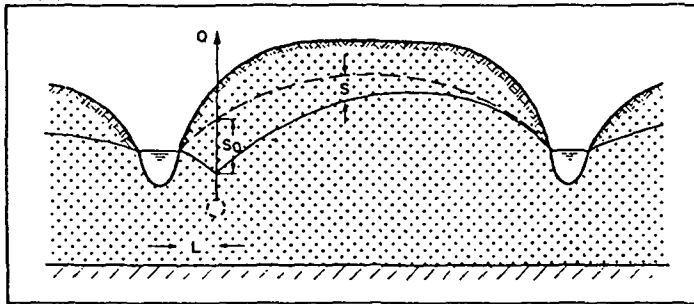


Figura 9.4  
Recarga inducida

La recarga inducida es particularmente útil en casos en que la recarga natural de un acuífero sea pequeña, por ejemplo, un acuífero estrecho que consiste en franjas delgadas (de poco espesor) de formaciones de suelo permeables que corren a lo largo del río (Figura 9.5). El rendimiento seguro de un acuífero de esta naturaleza, obtenido únicamente de la recarga natural, será muy limitado, pero se puede extraer grandes cantidades de agua cuando se practica la recarga inducida.

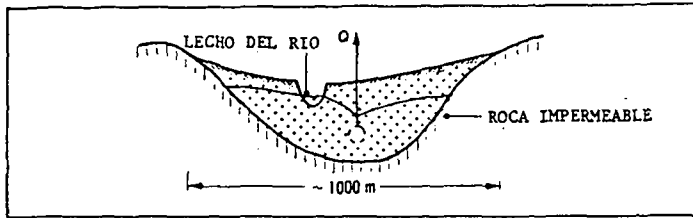


Figura 9.5  
Recarga inducida y recuperación de agua subterránea de un acuífero de ancho pequeño

Los medios o elementos para recuperar (extraer) el agua recargada pueden también colocarse en el mismo lecho del río. La Figura 9.6 muestra una línea de pozos de chorro hincados (well points), interconectados mediante una línea central de succión. Otra opción es un dren horizontal recolector colocado bajo el lecho del río (Figura 9.7).

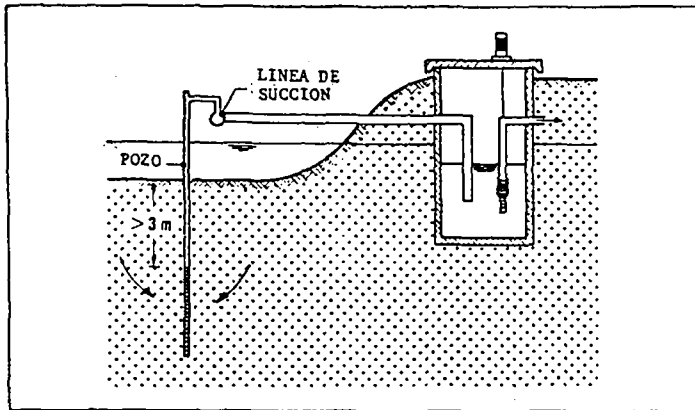


Figura 9.6  
Línea de pozos elevados en el mismo lecho del río

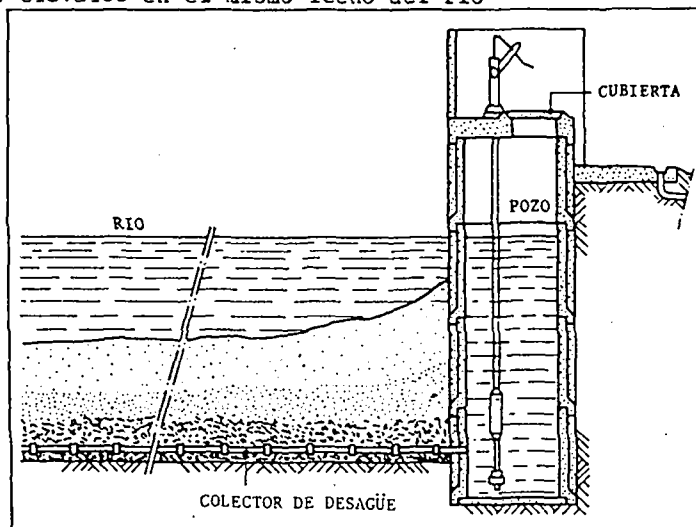


Figura 9.7  
Dren recolector horizontal bajo el lecho del río

Mediante la recarga inducida, se hace que el agua del río ingrese al acuífero a través del mismo lecho de la corriente. En el lecho del río se producirá cierto "taponamiento", como resultado de los depósitos de partículas suspendidas y de la precipitación de sólidos disueltos. Este taponamiento o "atoro" creará gradualmente una pérdida de carga por filtración (véase Figura 9.8).

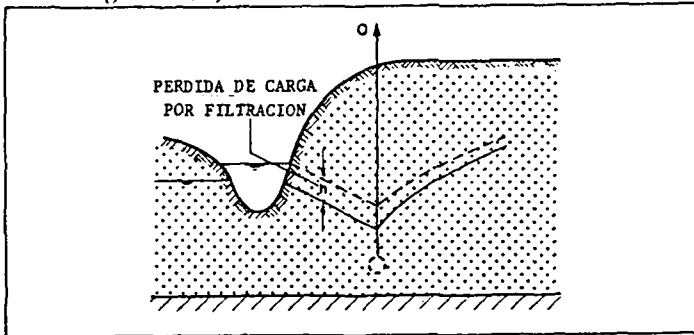


Figura 9.8  
Pérdida de carga por filtración en el lecho del río debida a colmatación

Por lo general, el "taponamiento o colmatación" del lecho del río no presenta problemas serios, ya que los flujos de "avenidas" o crecientes del río limpiarán las riberas del río y se llevarán los depósitos. Sin embargo, en ríos que tengan represas para control de inundaciones o crecientes, la limpieza de las riberas por arrastre puede estar ausente o ser poco frecuente. Entonces, la colmatación del área de filtración puede aumentar hasta el punto en que se reduzca grandemente la tasa de recarga inducida. En teoría, esto se podría remediar mediante una limpieza del lecho del río pero esto es difícil y a menudo no es practicable.

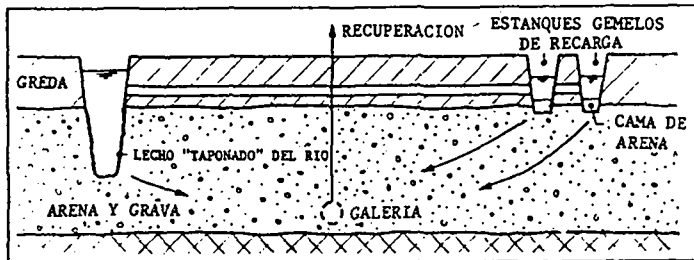


Figura 9.9  
Estanques para recarga del acuífero usando el agua del río

En esos casos, puede ser ventajoso construir estanques de infiltración gemelos que se llenan con agua del río (Figura 9.9). El fondo de estos estanques está cubierto con una capa de arena de grueso medio, aproximadamente 0.5 m de espesor. Ahora el área de colmatación quedará restringida a las capas superiores de este lecho y se le podrá remover fácilmente mediante rastrilleo.

### 9.3 ESPARCIMIENTO DE AGUA

La filtración ribereña descrita en la sección anterior sólo puede ser usada en lugares donde un acuífero adecuado se encuentre adyacente a una fuente de agua superficial. Algunas veces, ambos, el acuífero adecuado y la fuente de agua, están presentes, pero a cierta distancia. La recarga artificial puede practicarse entonces, pero el agua del río, luego a otra fuente tiene primero que ser transportada a los lugares donde se dispone de formaciones de suelo adecuadas para filtración y flujo subterráneo necesarios. Esto representa ciertamente una complicación en el esquema de recarga, pero se logran importantes ventajas adicionales.

- (i) Se puede detener la captación de agua cuando el agua del río está contaminada o, por otro lado, cuando es de pobre calidad.
- (ii) Se puede lograr un ahorro en el costo cuando el esquema de recarga está situado cerca al área de distribución del agua.

Un esquema englobante de recarga artificial mediante el esparcimiento de agua se muestra en la Figura 9.10. Este incluye el pretratamiento del agua antes de la recarga en un estanque de filtración, y un nuevo tratamiento después de la recuperación.

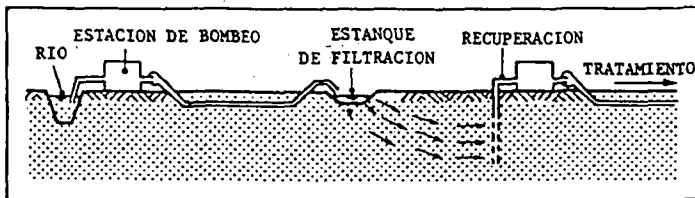


Figura 9.10  
Esquema para recarga y recuperación artificiales

El pretratamiento puede ser necesario para evitar que el sedimento se deposite en la tubería o que se forme un lúgamo microbiológico que podría reducir grandemente la capacidad de transporte de la tubería. El pretratamiento también reducirá la colmatación del estanque de recarga, de tal forma que se necesitará una limpieza menos frecuente. Más aún, protegerá al acuífero evitando que sustancias orgánicas de desecho lo ensucien. Es necesario el tratamiento del agua recuperada del esquema de recarga en el caso en que la calidad del agua aún no sea satisfactoria. Por ejemplo, este puede ser el caso del agua, durante su viaje subterráneo, se vuelve anaeróbica y recoge hierro y manganeso del subsuelo.

El diseño de un esquema de recarga artificial depende de tres factores:

- (i) La tasa de filtración del agua en los estanques de infiltración. Esta tasa debe ser tan baja que requiera la limpieza de los estanques sólo después de un período considerable de tiempo, de por lo menos varios meses y preferiblemente un año o más.
- (ii) El tiempo de viaje y la longitud del flujo subterráneo del agua.
- (iii) La máxima diferencia permisible entre el nivel del agua en los estanques de infiltración y el nivel de la napa de agua subterránea.

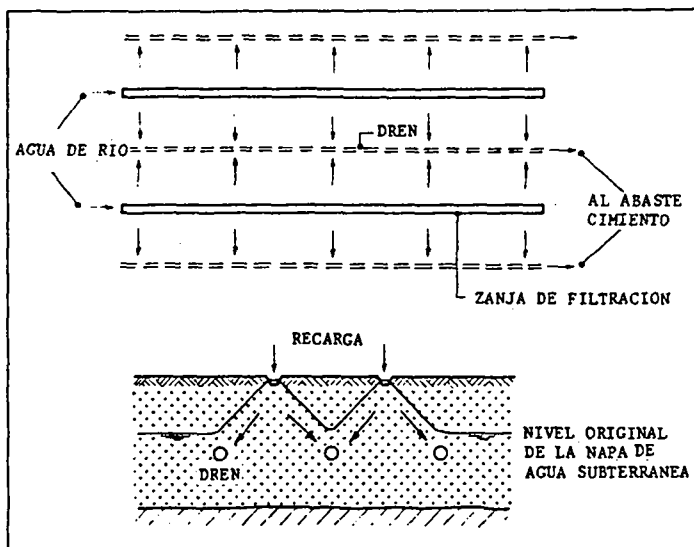


Figura 9.11  
Recarga de agua en acuífero de poca profundidad usando zanjas y drenes de infiltración

Analizados en forma conjunta, estos factores indican que para la recarga artificial de acuíferos superficiales, particularmente acuíferos con composición de grano fino, los estanques de infiltración deben ser construidos como zanjas, con galerías para la recuperación del agua subterránea, construidas paralelamente a los estanques (Figura 9.11). Para acuíferos profundos, particularmente los que tengan una composición de grano grueso, el estanque de esparcimiento preferiblemente debe ser construido como un estanque rodeado por una batería de pozos de recuperación (Figura 9.12).

Los esquemas de recarga artificial descritos anteriormente son bastante aptos para abastecimientos de agua a pequeñas comunidades especialmente en áreas rurales. Para las cantidades limitadas de agua que requieren estos abastecimientos, el tratamiento del agua no es a menudo una proposición factible. Para servir a 200 personas que tienen un uso de agua per cápita de 15 litros/día, la capacidad requerida será únicamente de  $3 \text{ m}^3/\text{día}$ . Usando la recarga artificial, esto se puede obtener con facilidad. Para proveer un tiempo de retención del agua subterránea de 60 días (2 meses), un acuífero que tenga una abertura de poros de 40%, necesitaría tener un volumen de  $450 \text{ m}^3$  para servir a este propósito. Suponiendo un espesor saturado promedio de 2 m, el área de superficie sería de  $225 \text{ m}^2$ ; por ejemplo, 7.5 de ancho y 30 m de largo. Esto se puede construir fácilmente en forma de una excavación de 3 m de profundidad revestida con una capa de arcilla batida o con revestimiento de plástico para evitar pérdidas por percolación (Figura 9.13).



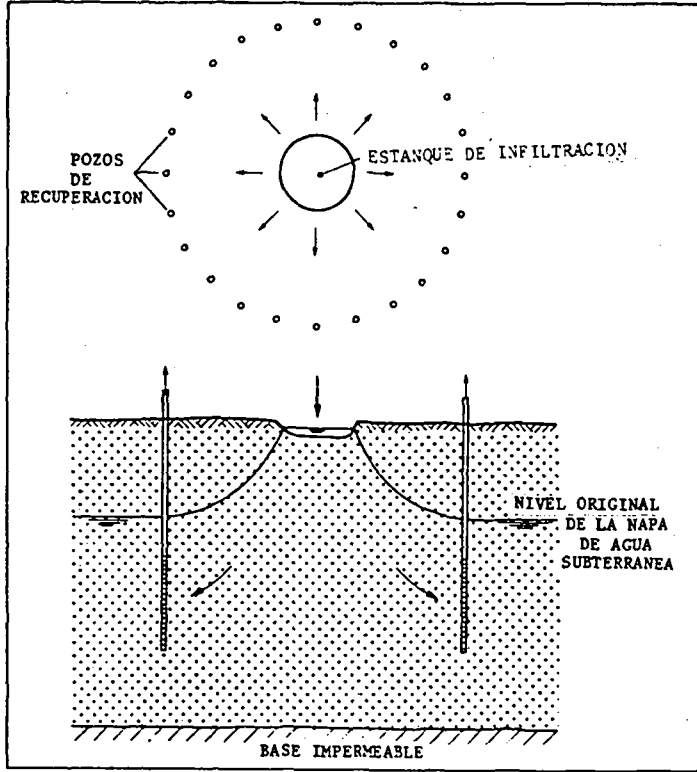


Figura 9.12  
 Recarga de un acuífero profundo usando un estanque de infiltración y pozos de recuperación

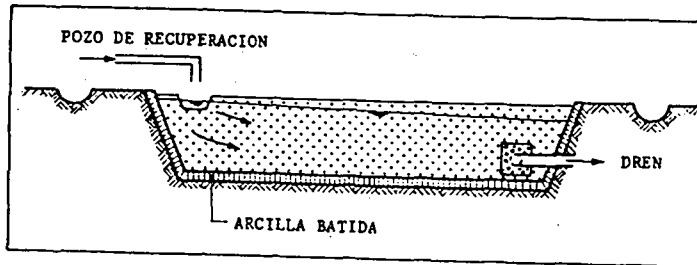
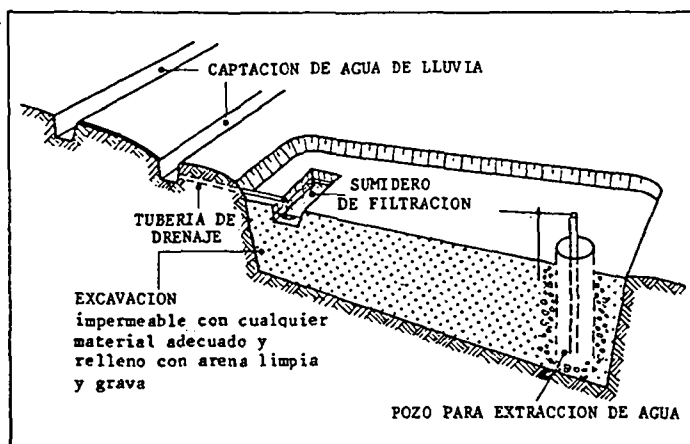


Figura 9.13  
 Esquema de recarga de pequeña capacidad

En la Figura 9.14 se muestra la posible utilización del agua pluvial para propósitos de recarga.



Fuente: ITDG

Figura 9.14  
Recarga artificial usando agua de lluvia

#### 9.4 REPRESAMIENTOS DE ARENA

Los represamientos de arena son reservorios rellenos con arena gruesa, piedras o rocas sueltas. El agua es almacenada en los poros de la cama de arena. Esto reduce grandemente las pérdidas de agua por evaporación. Por lo tanto, los represamientos o reservorios de arena son particularmente útiles en áreas en donde las tasas de evaporación son elevadas. Se les ha construido en muchas de las áreas semi-áridas de África y América. Se puede almacenar el agua durante largos períodos, e incluso bajo condiciones de sequía total, los represamientos pueden proveer agua del volumen de arena almacenada.

El agua se extrae de la "represa" de arena mediante una tubería de drenaje o un pozo excavado en el lecho de arena cerca a la "represa" (Figura 9.15). Por lo general, se puede usar el agua sin tratamiento, ya que ésta es filtrada mientras fluye a través del lecho de arena.

En las áreas semi-áridas en donde el uso de reservorios de arena es más adecuado, las aguas de avenida transportan a menudo una gran carga de sedimento porque hay muy poca vegetación para prevenir la erosión del suelo. Las aguas de avenida o inundación transportan cantidades considerables de arena y grava. Así, cuando se construye la pared del represamiento para un reservorio de almacenamiento en el lecho del río, durante la estación seca, las aguas de avenida en la estación lluviosa depositarán la arena y la grava detrás de ellas. Las aguas de avenida también transportarán cantidades sustanciales de barro. Para asegurar que, principalmente, la arena y la grava sean depositadas detrás de la represa, se debe construir inicialmente la pared de la represa a una altura aproximada de sólo 2 m. Posteriormente, se elevará la pared conforme aumenten los depósitos de arena y grava. La elevación por etapas de la "represa" permitirá que el barro no ingrese a ella mediante el derrame de las aguas de inundación. Después de cuatro o cinco años puede ser que la "represa" alcance su altura total (por lo general 6-12 m).

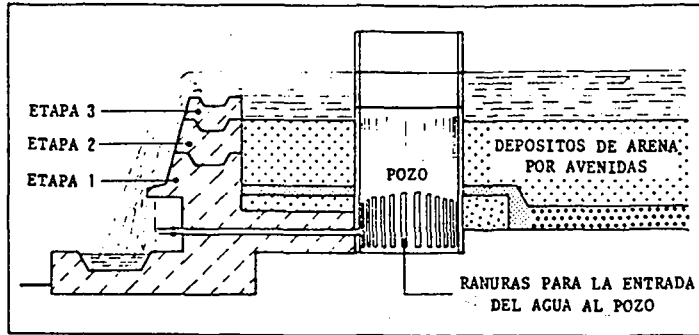


Figura 9.15  
"Represa" de arena (corte)

Se pueden usar los represamientos rellenos con arena con particular ventaja para la recarga artificial, porque permiten que la mayoría de sedimentos finos en el agua de avenida o inundación sean removidos por el rebose. Así, se evita, por este medio, la colmatación de los acuíferos con aguas cargadas de sedimento, lo cual puede ocasionar problemas en los sistemas de recarga.

RECARGA ARTIFICIAL

ARTIFICIAL RECHARGE AND MANAGEMENT OF AQUIFERS

Report of Symposium, Haifa, 1967

International Association of Scientific Hydrology, 1968

(Publication No. 72)

Bieze, J.; Bourguet, L.; Lemoine, J.

L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES SOUTERRAINES

Masson et Cie, Paris, 1972

Buckan, S.

ARTIFICIAL REPLENISHMENT OF AQUIFERS

En: Journal of Institution of Water Engineers, 1955, pp. 111-163

GROUNDWATER STORAGE AND ARTIFICIAL RECHARGE

United Nations, Nueva York, 1975, 270 p.

(Natural Resources/Water Series No. 2/ST/ESA/13)

Huisman, L.

ARTIFICIAL RECHARGE

En: Proceedings Sixth International Water Supply Congress, Estocolmo, 1964

International Water Supply Association, pp. 11-18

Jansa, M.

ARTIFICIAL REPLENISHMENT OF UNDERGROUND WATER

En: Proceedings Second International Water Supply Congress, Paris, 1952

International Water Supply Association, pp. 149-191

Meinzer, R.

GENERAL PRINCIPLES OF ARTIFICIAL GROUNDWATER RECHARGE

En: Economic Geology, 1946, pp. 191-201

Muckel, D.C.

REPLENISHMENT OF GROUNDWATER SUPPLIES BY ARTIFICIAL MEANS

United states department of Agriculture, 1959

(Technical Bulletin No. 1195)



## 10. BOMBEO

### 10.1 INTRODUCCION

La tecnología de bombeo de agua se desarrolló paralela a la disponibilidad de fuentes de energía. Efectivamente, se puede decir que el primero de nuestros ancestros que juntó sus manos y cogió agua de una corriente, escogió la técnica de "bombeo" que le era apropiada. Los dispositivos modernos, tales como las bombas centrífugas, han alcanzado un alto estado de desarrollo y son profusamente usados, particularmente en países desarrollados, sólo gracias a que se dispone de fuentes de energía adecuadas, tales como motores diesel o motores eléctricos.

En pequeñas comunidades de países en desarrollo, la energía humana y la animal son a menudo la energía que con mayor facilidad se dispone para el bombeo del agua, particularmente en áreas rurales. Bajo condiciones adecuadas, la energía eólica es importante. La energía solar puede tener un uso potencial. Los motores diesel y los motores eléctricos sólo deberían usarse si se dispone del suministro necesario de combustible o electricidad y si su provisión está asegurada. Junto a esto debe haber un mantenimiento adecuado y repuestos.

### 10.2 FUENTES DE ENERGIA PARA EL BOMBEO

#### Energía humana

Un dispositivo manual de bombeo\* (incluidos los dispositivos operados con el pie) es cualquier dispositivo simple accionado mediante energía humana. Ellos son capaces de impulsar cantidades relativamente pequeñas de agua. Usar la energía humana para el bombeo de agua tiene ciertas características que son importantes bajo las condiciones existentes en comunidades pequeñas y rurales en países en desarrollo:

- Puede satisfacer los requerimientos de energía dentro del grupo de usuarios;
- El costo de capital de bombas operadas manualmente es bajo;
- La capacidad de descarga de uno o más dispositivos manuales de bombeo es, por lo general, adecuada para satisfacer los requerimientos domésticos de agua de una pequeña comunidad.

La energía disponible que proviene del esfuerzo humano depende del individuo, del medio y la duración de la tarea. La energía disponible para trabajos de larga duración, por ejemplo, 8 horas diarias, con un hombre saludable, frecuentemente es estimada en 60 a 75 vatios (0.08 a 0.10 caballos de fuerza). Se debe reducir este valor para las mujeres, niños y

---

\* A menudo referido como "bomba de mano"

personas de edad. También se debe reducir cuando hay altas temperaturas y ambientes de trabajo con elevada humedad. En lugares donde se da un pobre complemento entre el usuario y la bomba, se desperdicia mucha de la energía usada; por ejemplo, cuando una persona opera una bomba desde una posición encorvada.



Foto: Matthijs de Vreede

Figura 10.1  
Abastecimiento de agua con bomba de mano (Bangladesh)

### Energía animal

Los animales de tracción son una fuente común y vital de energía en muchos países en desarrollo. La energía animal no es muy apta para operar dispositivos de bombas de diámetro pequeño colocadas en pozos cubiertos. Los animales son usados ampliamente con el fin de elevar agua para irrigación de pozos abiertos de gran diámetro, pero estos pozos no deben usarse para propósitos de abastecimiento público de agua. El uso más eficiente de los animales es en lugares fijos en donde mueven paletas y norias circulares. Los dos métodos requieren engranajes y bombas de movimiento lento y de desplazamiento largo. Los bueyes y los burros son los animales mayormente empleados.

### Energía eólica

El uso de la energía eólica para el bombeo de agua sería factible si:

- Se presentan vientos de por lo menos 2.5-3 m/seg el 60% o más del tiempo;
- Se puede bombear continuamente la fuente de agua sin un abatimiento excesivo del nivel;
- Se provee un almacenamiento de, típicamente, por lo menos tres días de demanda, para absorber períodos de calma sin viento;

- Se asegura un flujo libre del viento hacia el molino, es decir, si se coloca el molino de viento por encima de obstrucciones que lo rodean, tales como árboles o edificios dentro de un radio de 25 metros; preferiblemente se debe colocar el molino de viento en una torre de 4.5 a 6 metros de altura.
- Se dispone de equipo de molino de viento que pueda operar relativamente desatendido por largos períodos de tiempo, por ejemplo, seis meses o más. El mecanismo de propulsión debe estar cubierto y contar con un sistema de lubricación adecuado. Las aspas, y las piezas que conforman el conjunto de velas del molino deben estar bien protegidas contra la acción de la intemperie.

El tipo más común de bombas accionadas con energía eólica es, la rueda de viento de funcionamiento lento que acciona una bomba de pistón. Generalmente, la bomba está equipada con una varilla que está conectada con el eje de propulsión del molino de viento. Se debe tomar provisiones para el bombeo manual durante períodos de calma.

Los molinos de viento varían en diámetro de aproximadamente 2 a 6 metros. Aunque los molinos de viento en sí tengan que importarse, por lo general se puede construir torres resistentes de materiales locales.

Los molinos de viento modernos están diseñados para asegurar que se orienten automáticamente hacia el viento cuando se bombea. También están equipados con un dispositivo para desviar automáticamente la rueda cuando el viento es excesivo, más fuerte que 13/15 m/seg, lo que podría dañar el molino. Las "velas" u "hojas de ventilador" pueden diseñarse de modo tal que se plieguen automáticamente para evitar que la rueda rote con demasiada rapidez con vientos fuertes. Normalmente, el molino de viento no empezará a bombear hasta que la velocidad del viento sea aproximadamente de 2.5-3 m/seg. La Figura 10.2 muestra varios arreglos típicos para sistemas de abastecimiento de agua bombeada con molinos de viento.

### Motores eléctricos

Los motores eléctricos generalmente necesitan menos mantenimiento y son más confiables que los motores Diesel. Por lo tanto, son preferibles como equipos para el bombeo si se dispone de un abastecimiento confiable de energía eléctrica. En tales casos, se puede usar motores eléctricos para accionar bombas. El motor eléctrico debe tener la capacidad de absorber la carga de trabajo que le será impuesta, tomando en consideración las diversas condiciones adversas de operación bajo las cuales tiene que trabajar la bomba. Si el requerimiento de energía de una bomba excede la carga segura de operación del motor eléctrico, el motor puede dañarse o quemarse. También se debe prestar atención a las características del motor y al voltaje abastecido.

Hay una tendencia a usar los motores para todo tipo de trabajo que los fabricantes ofrecen sin prestar la debida consideración a las características de la bomba en particular, y esto conduce a fallas frecuentes o al deterioro del motor. Los motores de "jaula de ardilla" son seleccionados en la mayoría de las veces para accionar bombas centrífugas, ya que son los motores eléctricos más simples.



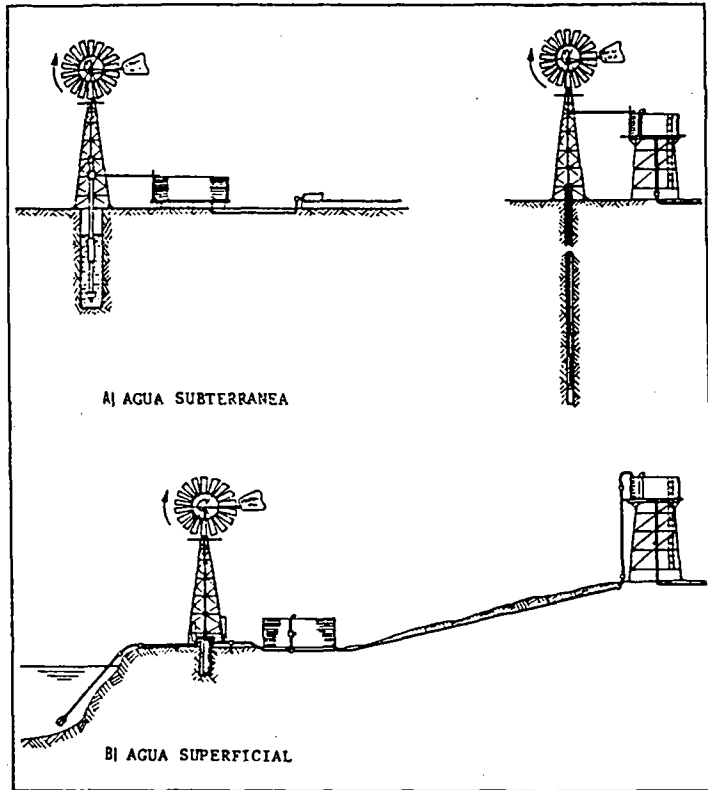


Figura 10.2  
Sistema de abastecimiento de agua bombeada con molinos de viento

### Motores Diesel

Los motores Diesel tienen la importante ventaja de que pueden operar independientemente en lugares remotos. El requerimiento principal es el abastecimiento de petróleo y lubricantes y, una vez que se obtiene estos, se les puede transportar fácilmente a casi cualquier lugar. Debido a su capacidad de funcionar con independencia del abastecimiento de energía eléctrica, los motores Diesel son especialmente adecuados para accionar unidades de bombeo aisladas, tales como bombas de captación de agua cruda.

Una máquina Diesel opera mediante la alta compresión de aire, en sus cámaras de combustión. Como resultado de la compresión, se eleva la temperatura del aire a más de  $1,000^{\circ}\text{C}$ . Cuando se inyecta petróleo a las cámaras a través de las boquillas, la mezcla comprimida (aire-petróleo) se enciende.

Se puede usar los motores Diesel para accionar bombas reciprocantes de émbolo así como bombas centrífugas. Una transmisión con engranaje, o cualquier otra transmisión, conecta el motor a la bomba. Para cualquier

instalación de bomba accionada con Diesel, por lo general es prudente seleccionar un motor con energía adicional de 25-30% para tomar en cuenta una labor posiblemente más dura que la que se da bajo condiciones normales.

### 10.3 TIPOS DE BOMBAS

Las principales aplicaciones de bombas en sistemas de abastecimiento de agua a pequeñas comunidades son:

- Bombeo de agua desde pozos;
- Bombeo de agua desde captaciones de agua superficial;
- Bombeo de agua hacia reservorios de almacenamiento y al sistema de distribución, si existieran.

Basados en los principios mecánicos pertinentes, se puede clasificar estas bombas como sigue:

- Recíprocantes\*;
- Rotativas (desplazamiento positivo);
- De flujo axial (helicoidal);
- Centrífugas;
- Elevadora de agua por aire.

Otro tipo de bomba, con aplicación limitada en sistemas de abastecimiento de agua, es el ariete hidráulico.

En la Figura 10.3 se puede obtener una indicación del tipo de bomba que se debe seleccionar para una aplicación particular. El Cuadro 10.1 proporciona características de los diversos tipos de bombas.

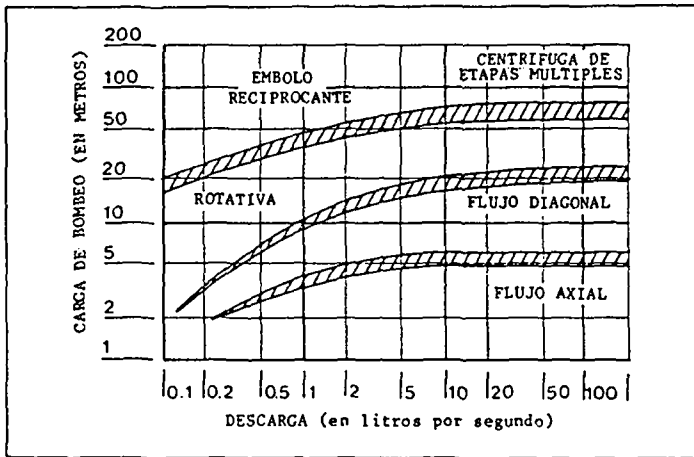


Figura 10.3  
Gráfico de selección del tipo de bomba

\* Las bombas recíprocantes tienen un émbolo (o pistón) que se mueve hacia arriba y hacia abajo (movimiento recíproco) en un cilindro cerrado para el desplazamiento positivo del agua. En el golpe ascendente el émbolo obliga al agua a salir a través de una válvula de salida y, al mismo tiempo, se capta agua en el cilindro a través de una válvula de entrada. El golpe descendente hace que el émbolo regrese a su posición inicial y puede iniciarse nuevamente el ciclo de operación

Cuadro 10.1  
 Información sobre tipos de bombas

Tipo de bomba	Escala usual de profundidad	Características y aplicabilidad
1. RECIPROCANTE (émbolo)		Baja velocidad de operación; accionadas manualmente, viento, o motores; baja eficiencia (escala del 25-60%).
a. Succión (pozo poco profundo)	hasta 7 m	Escala de capacidad: 10-50 l/min; adecuada para bombear contra cargas variables, las válvulas y sellos de copa requieren atención de mantenimiento.
b. Elevadora (pozo profundo)		
2. ROTATORIA (Desplazamiento positivo)		Baja velocidad de operación; accionada manualmente, animales o viento.
a. Bomba de cadena y balde	hasta 10 m	Escala de capacidad: 5-30 l/min, descarga constante bajo cargas variables.
b. Rotor helicoidal	25-150 m por lo general sumergida	Usa engranaje accionado manualmente, por viento o motor; buena eficiencia; más adecuada para bombeo de baja capacidad - elevada altura.
3. DE FLUJO AXIAL	5-10 m	Bombeo de gran capacidad-baja altura; puede bombear agua que contenga arena o sedimento.
4. CENTRIFUGA		Alta velocidad de operación, suave, descarga pareja, la eficiencia (escala de 50-85%) depende de la velocidad de operación y de la carga de bombeo.
a. Etapa simple	20-35 m	Requiere mantenimiento calificado, no adecuada para operación manual; accionada mediante motor a combustión o eléctrico.
b. Etapa múltiple accionada con eje	25-50 m	Como en la de etapa simple. Motor sobre el suelo, alineamiento y lubricación del eje es crítico; escala de capacidad de 25-10,000 l/min.
c. Etapa múltiple sumergible	30-120 m	Como en la de etapa múltiple, accionada con eje; mantenimiento difícil, la reparación del motor o bomba requiere retirar la unidad del pozo; gran amplitud en las escalas de capacidad y cargas; sujeta a desgaste rápido cuando se bombea agua arenosa.
5. ELEVADORA DE AGUA POR AIRE	15-50 m	Gran capacidad a baja altura de bombeo; muy baja eficiencia especialmente en elevaciones mayores no hay partes móviles de la bomba dentro del pozo; la verticalidad de la envoltura o camiseta del pozo no es factor crítico.

## 10.4 BOMBAS RECIPROCANTES

El tipo de bomba usado con mayor frecuencia para abastecimientos pequeños de agua es la bomba recíproca (émbolo)\*. Se puede distinguir varios grupos:

- De succión; acción elevadora
- De libre rendimiento; acción de fuerza
- De acción simple; de acción doble.

### Bombas de succión (pozo poco profundo)

En la bomba de succión, el émbolo y su cilindro están situados sobre el nivel de agua, por lo general dentro del soporte mismo de la bomba (Figura 10.4).

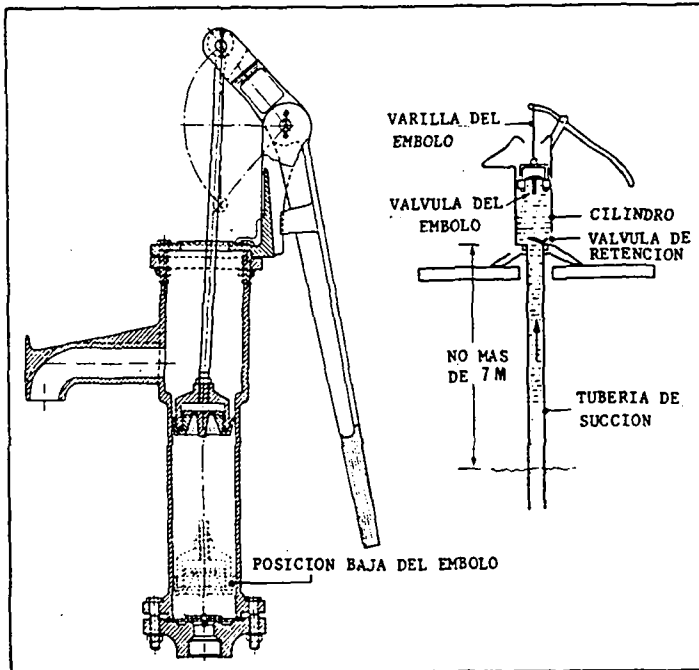


Figura 10.4  
Bomba de succión (pozo poco profundo)

La bomba de succión se basa en la presión atmosférica para empujar el agua hacia arriba al cilindro. Contrario a la creencia popular, este tipo de bomba no "eleva" el agua de la fuente. En lugar de esto, la bomba reduce

\* Mientras que esta sección se concentra sobre la bomba recíproca de émbolo, los principios trazados también se aplican a otros tipos de bombas de desplazamiento positivo.

la presión atmosférica que se ejerce sobre el agua dentro de la tubería de succión, y la presión atmosférica que se ejerce sobre el agua fuera de la tubería de succión "empuja" el agua hacia arriba. Debido a que se basa en la presión atmosférica, la utilización de una bomba de succión está limitada a condiciones en las que el nivel freático esté dentro de 7 m de la válvula de succión durante el bombeo. Teóricamente, la presión atmosférica permitiría que una bomba de succión extraiga agua de una profundidad de hasta 10 metros, pero en la práctica el límite es 7 m.\*

#### Bombas elevadoras (pozo profundo)

En términos de selección de bombas, el pozo profundo o de poca profundidad, se refiere a la profundidad del nivel freático en el pozo, no a la profundidad hasta el fondo del pozo entubado o la longitud del revestimiento o camiseta del pozo.

En la bomba de pozo profundo el cilindro y el émbolo se sitúan por debajo del nivel freático dentro del pozo. Esta bomba puede elevar agua de pozos con una profundidad de hasta 180 m e incluso más. Las fuerzas creadas por el trabajo de bombeo aumentan con la profundidad de la napa freática, y los problemas relacionados con el acceso hasta el cilindro ubicado en el fondo del pozo, hacen más dificultoso su mantenimiento y reparación que en el caso de las bombas de pozos de poca profundidad. De este modo, el diseño de bombas para uso en pozos profundos es más crítico y complicado que el de bombas de succión.

En la Figura 10.5 se muestra un ejemplo de una bomba elevadora (pozo profundo).

La característica principal de todas las bombas elevadoras (pozo profundo) es la ubicación del cilindro. Preferiblemente el cilindro debería estar sumergido en el agua, para asegurar el arrastre de agua de la bomba.

---

\* Dependiendo de la altitud del lugar donde es operada la bomba.

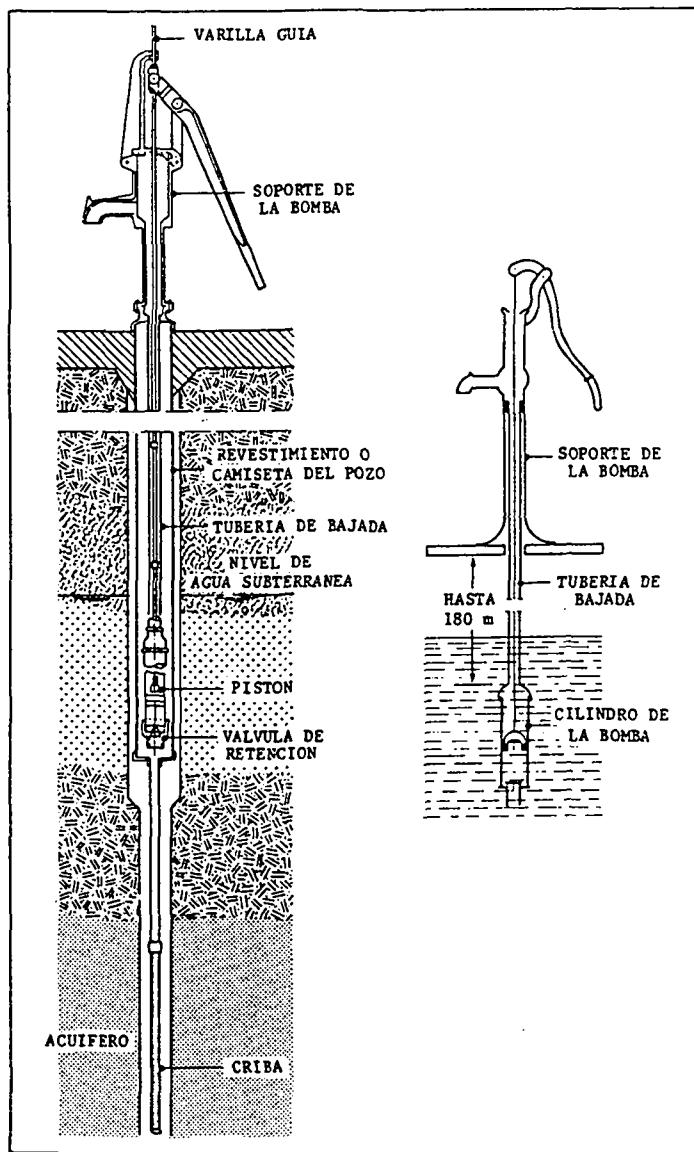


Figura 10.5  
 Bomba elevadora (pozo profundo)

## Bombas de fuerza o impelentes

Las bombas impelentes se diseñan para bombear agua desde una fuente y para descargarla, ya sea libremente a una elevación mayor o ya sea contra presión. Todos los sistemas de agua a presión utilizan bombas impelentes. Estas son cerradas de tal forma que se puede forzar al agua a fluir contra presión. Las bombas impelentes están disponibles para ser usadas en pozos poco profundos y profundos (Figura 10.6).

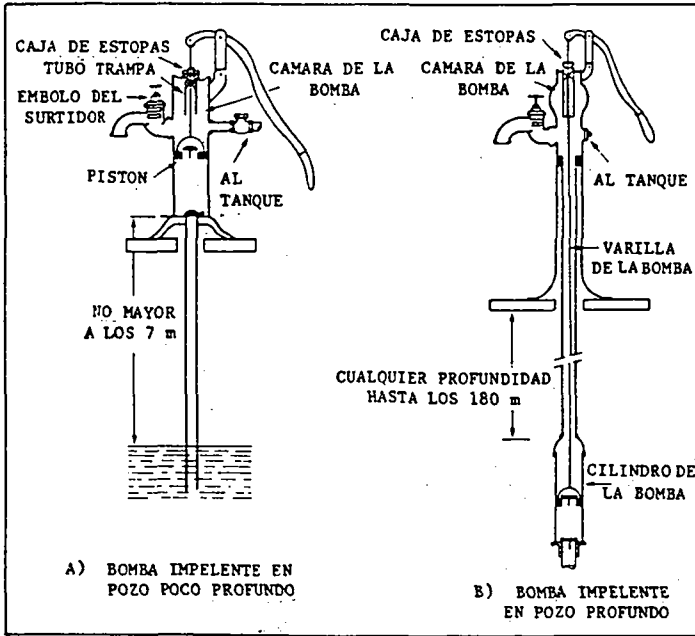


Figura 10.6  
Bombas impelentes

En la Figura 10.6A se muestra una bomba impelente de pozo poco profundo. su principio de operación es el mismo que la bomba recíprocante de émbolo de la que se trató anteriormente, excepto en que está cerrada en la parte superior y, por lo tanto, se le puede usar para "forzar" el agua hacia alturas mayores que las de la bomba de succión. Es para esto que se coloca una conexión separada o una manguera o tubería en el surtidor.

Por lo general, las bombas impelentes tienen una cámara de aire para mantener parejo el flujo de descarga. Cuando el émbolo asciende se comprime el aire de la cámara de aire, y cuando desciende el aire se expande para mantener el flujo de agua mientras el émbolo desciende. El tubo-trampa sirve para atrapar el aire en la cámara de aire, evitando que se escape alrededor de la varilla del émbolo. La aplicación de una bomba impelente para pozos profundos es la misma (Figura 10.6B).

La diferencia principal radica en la localización del cilindro. Cuando el cilindro baja en el pozo, la bomba puede elevar agua desde profundidades superiores a los 7 m.

### Bombas de diafragma

Las bombas de diafragma son bombas de desplazamiento positivo. La parte principal de la bomba es el diafragma, un disco flexible hecho de goma o metal. A la entrada y a la salida tiene fijadas válvulas de no retorno o retención (Figura 10.7).

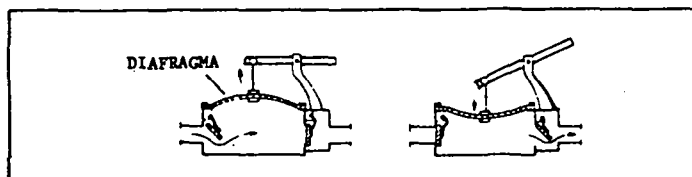


Figura 10.7  
Bomba de diafragma

El borde del diafragma está empernado al borde de la cámara de agua, pero el centro es flexible. Una varilla fijada al centro lo mueve hacia arriba y hacia abajo. Conforme se eleva el diafragma se absorbe el agua a través de la válvula de entrada, y cuando se le presiona el agua es obligada a salir a través de la válvula de salida. La velocidad de bombeo es por lo general de aproximadamente 50-70 golpes por minuto. Estas bombas son de auto-cebado.

El principio de bombeo de diafragma es usado en un número de diseños nuevos de bombas de mano. Estas bombas están siendo desarrolladas y probadas en el campo para su uso en abastecimientos rurales de agua (por ejemplo, la hidrobomba Vergnet; la bomba Petro, etc.)

## 10.5 BOMBAS ROTATIVAS (DESPLAZAMIENTO POSITIVO)

### Bombas de cadena

En la bomba de cadena, se halan hacia arriba discos de un material adecuado (por ejemplo, caucho) unidos a una cadena sin fin que, en la parte superior, corre sobre una rueda dentada; estos discos se halan hacia arriba dentro de una tubería para elevar el agua mecánicamente hasta la boca de salida. Este tipo de bomba se puede usar solamente en cisternas y pozos poco profundos, y se puede adaptar fácilmente para su fabricación por artesanos de poblados (Figura 10.8). Una bomba pequeña de cadena que utilice una tubería de 20 mm de diámetro, con discos de caucho espaciados con intervalos de 1 m, descargará agua en una escala de 5 a 15 l/minutos, dependiendo el caudal de la velocidad de rotación de la rueda operadora (30 a 90 rpm).



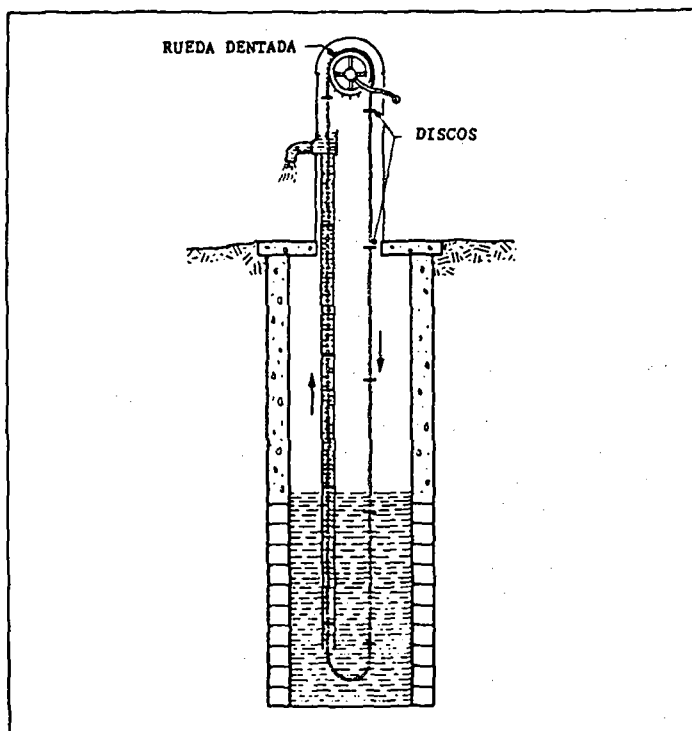


Figura 10.8  
Bomba de cadena

Las bombas de cadena que usaban salientes tipo cuchara y bolas en lugar de discos fueron usadas comúnmente para drenar minas en Europa Occidental en el siglo XVI. En Asia se utilizan bombas de cadena accionadas por animales para el bombeo de agua con fines de irrigación.

#### Bomba de rotor helicoidal

La bomba de rotor helicoidal consiste en un rotor helicoidal de una sola rosca que rota dentro de un "manguito" helicoidal de doble rosca llamado estator (Figura 10.9). Las superficies helicoidales encajadas obligan al agua a ascender creando un flujo uniforme. La producción de agua es proporcional a la velocidad de rotación y se la puede variar simplemente cambiando una polea. Como el rotor y el estator juntos proporcionan un sello efectivo y continuo, la bomba de rotor helicoidal no requiere válvulas. Las bombas de rotor helicoidal se encuentran disponibles para uso en pozos entubados de 4 pulgadas (100 mm) o más. Aunque son relativamente caras, estas bombas han dado un buen servicio en pozos profundos en ciertas regiones de África y Asia, en donde se les conoce como la bomba "Mono", tomando este nombre de su fabricante británico.

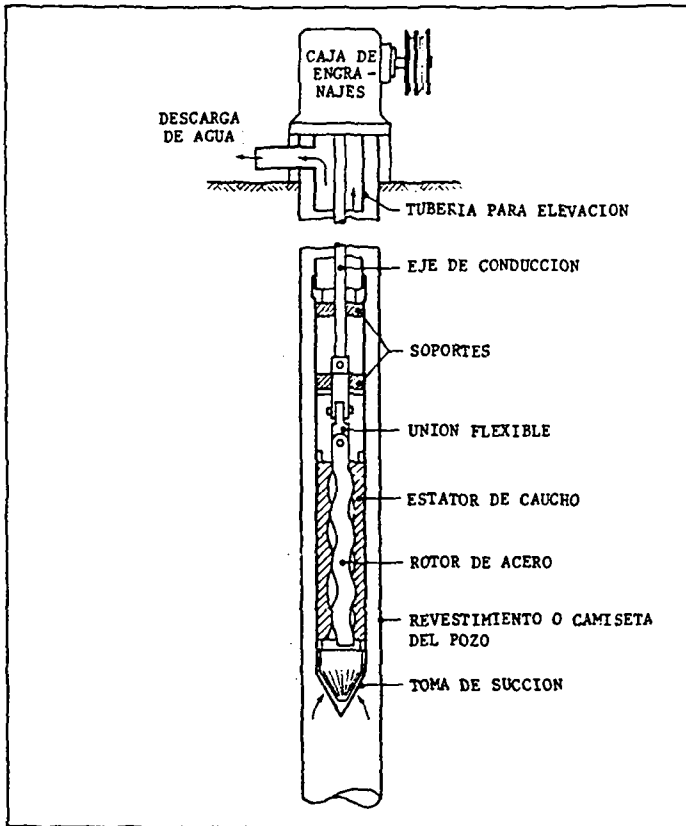


Figura 10.9  
Bomba de rotor helicoidal

Las disposiciones adecuadas para accionar las bombas de rotor helicoidal son: operación manual, motores eléctricos, motores Diesel y motores de gasolina. Se dispone de diferentes cabezales conductores. Si existe amplio espacio, se puede usar un cabezal estándar con una correa en V. Cuando se requiere una unidad compacta, se instalan cabezales de engranaje para impulsarlas con motores Diesel o motores eléctricos.

#### 10.6 BOMBAS DE FLUJO AXIAL

En el tipo de bomba de flujo axial, se monta aletas o paletas radiales en un impulsor o rueda, la cual rota en un compartimiento estacionario (llamado caja o cuerpo) (Figura 10.10).

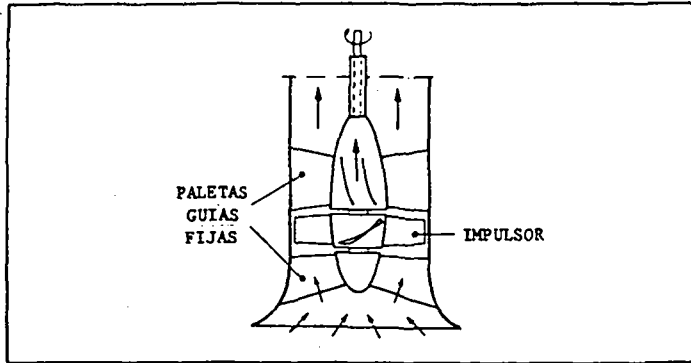


Figura 10.10  
Bomba de flujo axial

La acción de la bomba consiste en levantar mecánicamente el agua mediante el impulsor giratorio. Las paletas guías fijas aseguran que el flujo de agua no tenga una velocidad de "remolino" cuando ingrese al impulsor o cuando salga del impulsor.

### 10.7 BOMBAS CENTRIFUGAS

Los componentes esenciales de una bomba centrífuga son el impulsor y la caja o cuerpo de la bomba (Figura 10.11).

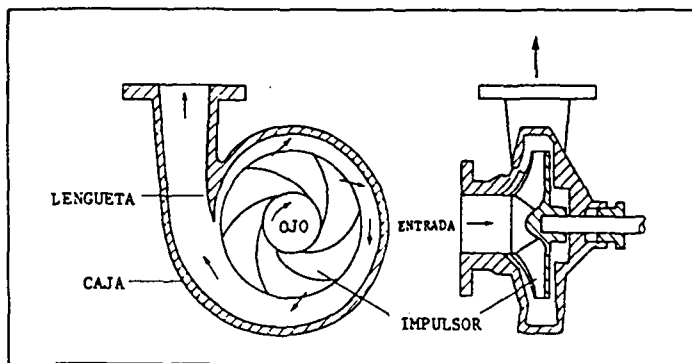


Figura 10.11  
Bomba centrífuga (caja de tipo Voluta)

El impulsor es una rueda que tiene paletas que irradian desde el centro hacia la periferia. Cuando rotan a una velocidad lo suficientemente elevada, el impulsor imparte energía cinética al agua y produce un flujo hacia el exterior debido a las fuerzas centrífugas. La caja tiene una forma tal que la energía cinética del agua que sale del impulsor se convierte parcialmente en presión útil. Esta presión obligará al agua a ingresar a la tubería de entrega. El agua que ingresa al ojo del impulsor crea una succión; esa agua será reemplazada por el agua extraída de la fuente y será forzada a ingresar a la caja bajo carga estática.

Al impulsor y a su sección de caja correspondiente se les llama "etapa". Si la presión de agua requerida de una bomba centrífuga en un caso particular es mayor de lo que puede posiblemente producir una sola etapa, se puede colocar un número de etapas en serie (bomba de etapas múltiple). Los impulsores son fijados a un eje común y por lo tanto rotan a la misma velocidad. El agua pasa a través de las etapas sucesivas, con un aumento de presión en cada una de ellas. Normalmente, se usa las bombas centrífugas de etapa múltiple para alturas de bombeo elevadas.

La velocidad de rotación de una bomba centrífuga tiene un efecto considerable en su rendimiento. La eficiencia de bombeo tiende a mejorar conforme aumenta la velocidad de rotación. Sin embargo, una velocidad mayor puede conducir a una atención de mantenimiento más frecuente. Lo que se debe buscar es un balance adecuado entre el costo inicial y los costos de mantenimiento. Se necesita efectuar un estudio completo de las características de la bomba antes de la selección final.

En las bombas centrífugas, el ángulo entre la dirección de entrada y la de salida del flujo de agua es de  $90^{\circ}$ . En una bomba de flujo axial (Sección 10.6), el flujo de agua continúa a través de la bomba en la misma dirección sin desviación alguna ( $0^{\circ}$ ). El término "bomba de flujo mixto" se usa para aquellas bombas centrífugas en las que la variación del ángulo se encuentra entre  $0^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ , y éstas pueden ser de etapa simple o múltiple.

## 10.8 ARREGLOS PARA EL ACCIONAMIENTO DE BOMBAS

Existen dos tipos diferentes de accionamiento para el bombeo de agua de pozos profundos: con eje y con motor eléctrico sumergible acoplado en forma compacta.

### A. ACCIONAMIENTO CON EJE

El cigüeñal, o el motor, se coloca en la superficie del suelo y da energía a la bomba usando un eje vertical de accionamiento o varilla rotatoria (Figura 10.12). Un eje de accionamiento largo necesitará soporte a intervalos regulares a todo su largo y acoplamientos flexibles para eliminar cualquier esfuerzo debido a desalineamiento. La ventaja de un eje de accionamiento es que el mecanismo puede ser colocado sobre el suelo o en un pozo seco y así será fácilmente accesible para mantenimiento y reparación. Es necesario un alineamiento preciso; no es posible instalar un eje de accionamiento en pozos entubados torcidos.

B. MOTOR ELECTRICO SUMERGIBLE ACOPLADO EN FORMA COMPACTA

En este arreglo de accionamiento de bomba, se conecta una bomba centrífuga directamente a un motor eléctrico en una misma "caja", siendo el motor y la bomba una sola unidad. Esta unidad se construye para la operación sumergida en el agua que se va a bombear (Figura 10.13).

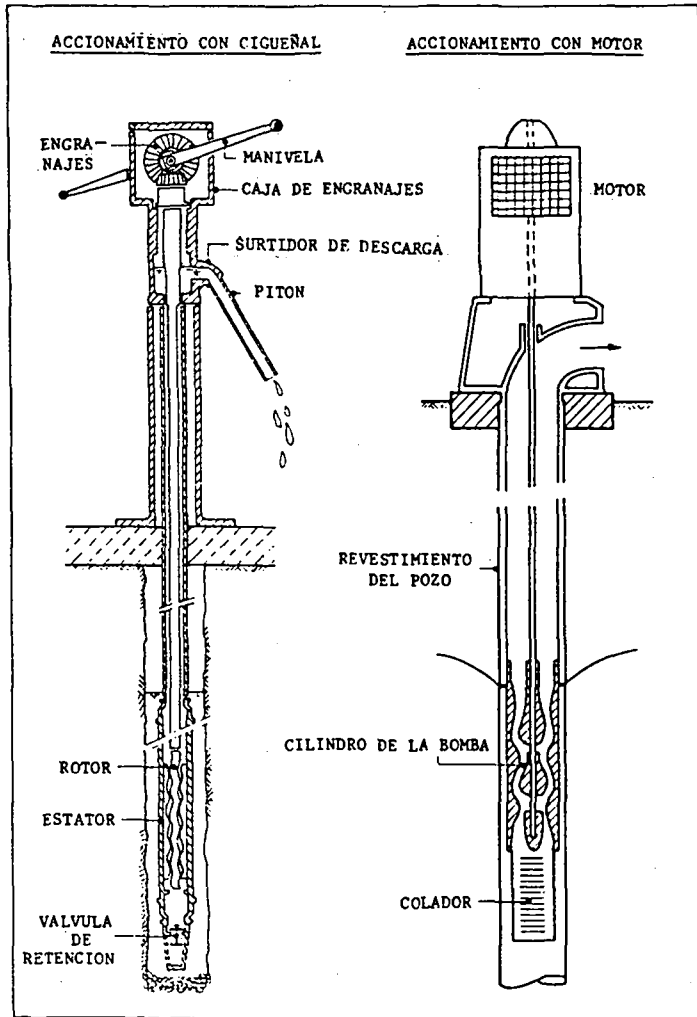


Figura 10.12  
Bombas accionadas con eje

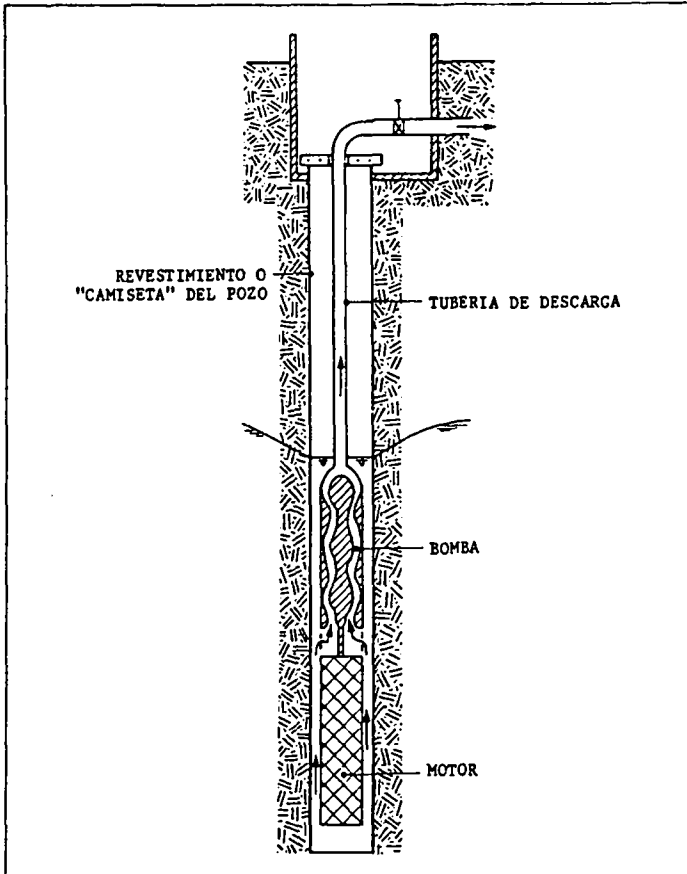


Figura 10.13  
 Accionamiento de bomba mediante motor eléctrico sumergible acoplado en forma compacta

Se hace descender la unidad bomba-motor (a la que a menudo nos referimos como "bomba sumergible") dentro del revestimiento del pozo, y se le coloca a una profundidad adecuada por debajo del nivel más bajo de abatimiento del agua en el pozo. A menudo las bombas sumergibles tienen un acomodo "estrecho" en un pozo entubado, ya que su diámetro exterior es, por lo general, sólo 1 ó 2 cm menor que el diámetro interior de la envoltura o "camiseta" del pozo. En consecuencia, se necesita que las operaciones de instalación o retiro de estas bombas se hagan con gran cuidado.

Un cable eléctrico impermeable conecta el motor con la caja de control, interruptor y conexión de energía. El control eléctrico se debe conectar a tierra adecuadamente para reducir al mínimo el riesgo de corto circuito y daño del motor. La Figura 10.14 muestra una bomba sumergible en vista esquemática.

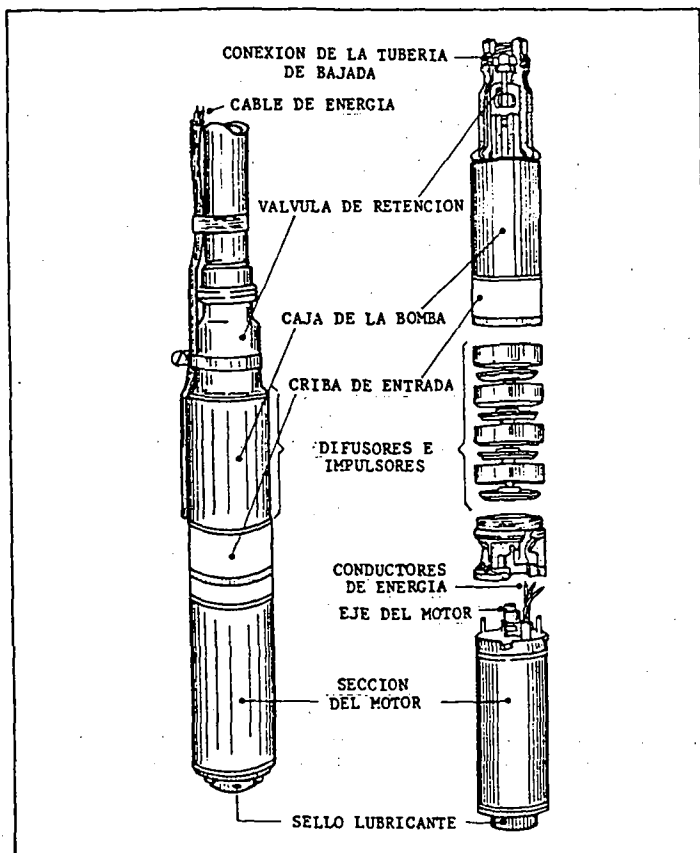


Figura 10.14  
Bomba sumergible (vista esquemática)

La tubería de descarga, que conduce el agua bombeada hacia la tubería de conexión o al tanque, por lo general presta soporte a la unidad sumergible bomba-motor. Cuando se encuentra o se anticipa la presencia de arena en la fuente de agua, se debe tomar precauciones especiales antes de usar una bomba sumergible. La acción abrasiva de la arena durante el bombeo acortaría considerablemente la vida de la bomba.

#### 10.9 BOMBAS ACCIONADAS POR AIRE

Una bomba accionada por aire eleva el agua mediante la inyección de pequeñas burbujas de aire comprimido, distribuidas en forma muy pareja, al pie de la tubería de descarga que se fija dentro del pozo. Esto requiere un compresor de aire. Siendo la mezcla aire-agua más ligera que el agua que está fuera de la tubería de descarga, esta mezcla de aire-agua es forzada a ascender por la carga hidrostática (Figura 10.15).

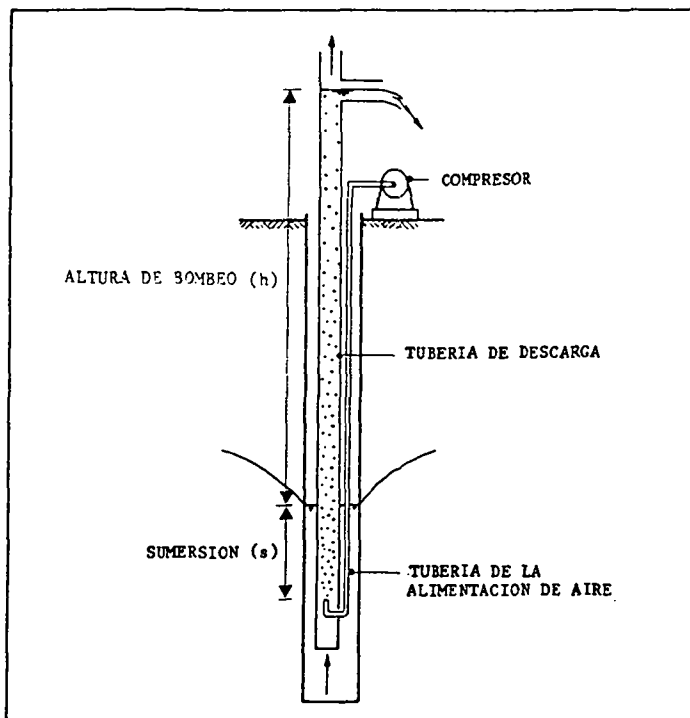


Figura 10.15  
Bomba elevadora de agua por aire (vista esquemática)

La carga o altura de bombeo ( $h$ ), contra la cual una bomba accionada por aire puede elevar agua, se relaciona directamente con la sumersión ( $s$ ) de la tubería de descarga. Una alta carga de bombeo requiere una inmersión considerable a una profundidad por debajo del menor nivel de abatimiento del agua en el pozo. El punto de inyección de aire comprimido también se encuentra a esta profundidad, de tal forma que se necesita una presión de aire lo suficientemente grande. La mayor desventaja de las bombas accionadas por aire es su baja eficiencia mecánica en la utilización de la energía que se entrega para elevar el agua. La eficiencia de una bomba accionada por aire es en sí de aproximadamente 25-40%. Las pérdidas de energía en el compresor son adicionales a considerar. En conjunto, no se utiliza en forma efectiva más del 15-30% del consumo total de energía.

Sin embargo, las bombas accionadas por aire también tienen ventajas importantes. Son simples de operar y no las afecta la arena o el sedimento del agua bombeada. Todo el equipo mecánico (el compresor) está sobre el suelo. Se puede operar, usando un solo compresor, varias bombas accionadas por aire instaladas en pozos adyacentes. Se puede obtener agua bombeada por aire de pozos con una profundidad de hasta 120 m en cantidad considerable.



Así, se debe tener en cuenta a las bombas accionadas por aire para aquellas aplicaciones en las que sus ventajas superen las desventajas que tienen de un elevado consumo de energía debido a la baja eficiencia mecánica. Se les debe considerar, particularmente, en áreas en donde el agua subterránea contiene mucha arena o sedimento y para el bombeo de aguas ácidas (bajo pH).

El Cuadro 10.2 ofrece una guía preliminar para la selección de bombas accionadas por aire.

Cuadro 10.2

Guía preliminar en la selección de bombas accionadas por aire

Elevación (m)	Sumersión (m)	Relación de flujo aire-agua (volumen/volumen)	Presión de aire requerida (m H <sub>2</sub> O)
10	12	3.0	20
20	20	4.7	30
30	25	6.8	40
40	28	7.9	45
60	40	9.6	65
80	49	11.6	85
100	58	13.3	105
120	71	14.8	125

Capacidad de bombeo (l/seg)	Diámetro de tubería de descarga (mm)	Diámetro de la tubería de aire (mm)	Energía del compresor (HP)
2.5	75 (3")	25 (1")	1.5
5.0	100 (4")	40 (1.1/2")	2.5
7.5	100 (4")	40 (1.1/2")	4
10.0	125 (5")	50 (2")	5
15.0	150 (6")	50 (2")	7.5
20.0	150 (6")	60 (2.1/2")	10
40.0	200 (8")	75 (3")	20

## 10.10 ARIETE HIDRAULICO

El ariete hidráulico no necesita fuente externa de energía. El ariete utiliza la energía contenida en el flujo de agua que corre a través del mismo ariete, para elevar un pequeño volumen de esta agua a un nivel más alto. El fenómeno que está involucrado es el de la onda de presión que se desarrolla cuando una masa de agua en movimiento se detiene bruscamente. Se requiere que la disponibilidad de agua y el caudal, sea estable y confiable con una caída o pendiente suficiente para hacer funcionar el ariete hidráulico. En la mayoría de los casos, se encuentra las condiciones favorables en áreas serranas y montañosas. Los arietes hidráulicos no son adecuados para el bombeo de agua de pozos.

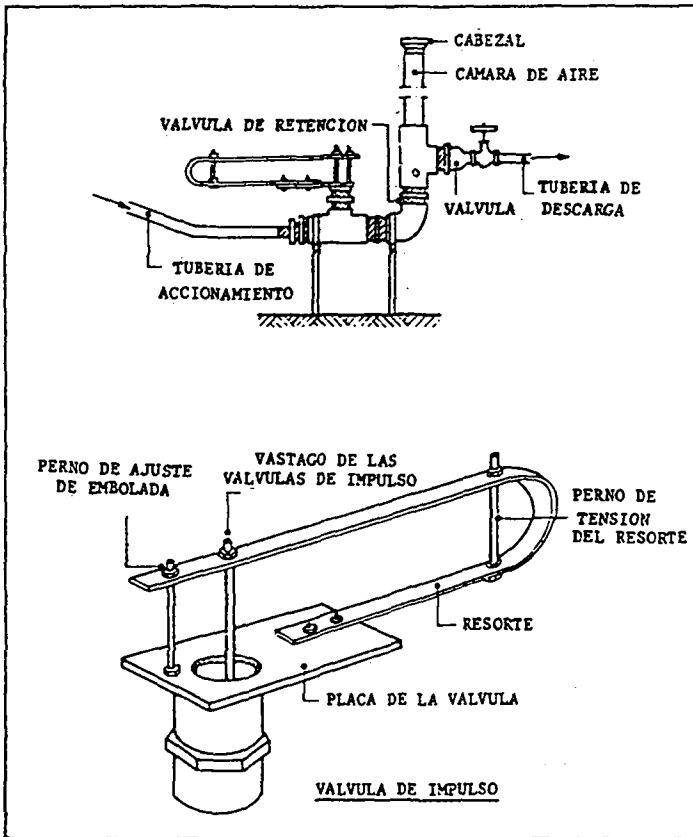


Figura 10.16  
Ariete hidráulico típico

Fuente: S.B. Watt  
A Manual on the Hydraulic  
Ram for Pumping Water,  
Publicaciones I.T. Ltda., 1974

El ariete opera en base a un flujo de agua que corre desde la fuente, a través de la tubería de conducción, hasta la cámara de la bomba. El agua escapa a través de la válvula de impulso abierta (válvula de evacuación). Cuando el flujo de agua a través de la válvula de impulso es lo suficientemente rápido, la fuerza hacia arriba en la válvula excederá la tensión del resorte del ajuste de esta y cerrará violentamente la válvula de impulso. La masa de agua en movimiento se detiene, produciendo una onda de presión a lo largo de la tubería de accionamiento. Debido a la onda de presión, el agua es forzada a través de la válvula de no-retorno (de descarga) y asciende a la tubería de descarga. El agua fluye a través de la válvula de no-retorno hasta que se agota la energía de la onda de presión en la tubería de accionamiento. La cámara de aire sirve para suavizar el flujo de descarga del agua, ya que absorbe parte de la onda de presión que se libera después de la inicial.

Cuando se agota completamente la onda de presión, una ligera succión, creada por el momento del flujo de agua junto con el peso del agua en la tubería de descarga, cierra la válvula de no-retorno y evita que el agua regrese hacia la cámara de la bomba. El resorte de ajuste abre entonces la válvula de impulso, el agua empieza a escapar a través de ella, y se inicia así un nuevo ciclo de operación.

Una vez realizado el ajuste de la válvula de impulso, el ariete hidráulico no necesita atención, siempre que el flujo de agua de la fuente de abastecimiento sea continuo y tenga un caudal adecuado, y que ninguna materia extraña ingrese a la bomba lo que bloquearía las válvulas.

Se proporciona una válvula de aire para permitir que una cierta cantidad de aire ingrese y mantenga cargada la cámara de aire. El agua bajo presión absorberá aire, y sin una válvula de aire adecuada, la cámara de aire pronto estará llena de agua. El ariete hidráulico dejaría entonces de funcionar.

Las ventajas del ariete hidráulico son:

- No necesita fuentes de energía y sus costos de mantenimiento son bajos;
- Es simple de fabricar. Se puede usar materiales locales y poco equipo de taller;
- Consta de dos partes móviles.

Una pequeña provisión de agua que tenga bastante caída permitirá que un ariete hidráulico eleve tanta agua como si se trataría de un flujo grande de agua con una caída pequeña. La mayoría de los arietes hidráulicos trabajarán con su mejor eficiencia si la carga hidráulica a la entrada es aproximadamente  $1/3$  de la carga hidráulica de entrega. Cuanto mayor sea la carga de bombeo requerida, menor será la cantidad de agua descargada.

En algunos casos, cuando la capacidad de bombeo requerida es mayor de la que puede proporcionar un ariete hidráulico, se puede usar un conjunto de varios arietes en paralelo, siempre que la fuente de abastecimiento tenga la capacidad suficiente (Figura 10.17).

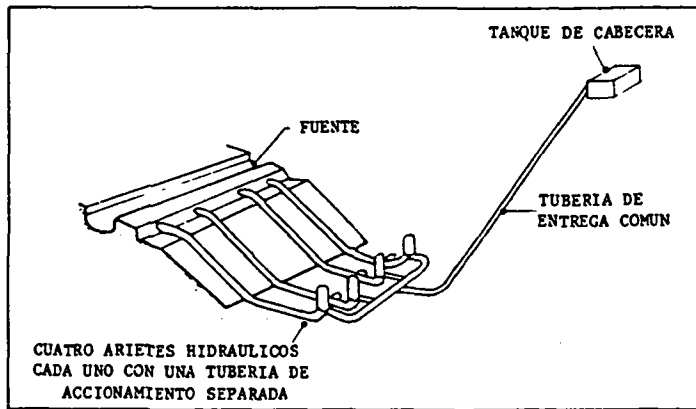


Figura 10.17  
Arietes hidráulicos colocados en paralelo

El mantenimiento que requiere un ariete hidráulico es muy pequeño y ocasional. Incluye:

- Reemplazo de las empaquetaduras de la válvula cuando se desgastan;
- Afinamiento (regulación del acabado);
- Ajuste de los pernos que trabajan sueltos.

Ocasionalmente, el ariete hidráulico puede necesitar que se le desmantele para su limpieza. Es esencial que la menor cantidad posible de residuos sólidos ingrese a la tubería de conducción. Por esto, es necesario proporcionar una parrilla o malla para retener las hojas flotantes y otros desechos.



BOMBEO

Addison, H.  
THE PUMP USERS HANDBOOK  
Pitman & Sons Ltd., Londres, 1958, 122 p.

Addison, H.  
CENTRIFUGAL AND OTHER ROTODYNAMIC PUMPS  
Chapman and Hall, Londres, 1956 (3rd Edition)

Benamur, A.  
LES MOYENS D'EXHAURE EN MILIEU RURAL  
Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.),  
Ouagadougou, Alto Volta, 1979

L'EQUIPEMENT DES VILLAGES EN PUITES ET FORAGES  
Commission de Communautés Européenes, Bruselas, 1978

Karassik, I.J.; Krutzch, W.C.; Fraser, W.H.; et al  
PUMP HANDBOOK  
McGraw-Hill, Nueva York, 1958

McJunkin, F.E.  
HANDPUMPS FOR USE IN DRINKING WATER SUPPLIES IN DEVELOPING COUNTRIES  
International Reference Centre for Community Water Supply,  
La Haya, 1977, 230 p. (Technical Paper Series No. 10)

Pacey, A.  
HAND PUMP MAINTENANCE  
Intermediate technology Publications Ltd., Londres, 1976, 38 p.

Romero, J.A.C.  
MANUAL DE POZOS RASOS  
Organización Panamericana de la Salud, Washington, D.C., 1977

Ross Institute  
SMALL WATER SUPPLIES  
London School of Hygiene and Tropical Medicine, Londres, 1964, 67 p.

Silver, M.  
USE OF HYDRAULIC RAMS IN NEPAL  
UNICEF, Kathmandu, Nepal, setiembre 1977, 46 p.

Thanh, N.C.; Pescod, M.B.; Venkitachalam, T.H.  
DESIGN OF SIMPLE AND INEXPENSIVE PUMPS FOR VILLAGE WATER SUPPLY SYSTEMS  
Asian Institute of Technology, 1979. (Final Report No. 67)

UNICEF Guide List OLGA  
UNICEF, Nueva York, 1975, 324 p. (under revision)

Watt, S.B.  
A MANUAL ON THE HYDRAULIC RAM FOR PUMPING WATER  
Intermediate Technology Publications Ltd., Londres, 1974, 37 p.



## 11. TRATAMIENTO DEL AGUA

### 11.1 INTRODUCCION

Habrá situaciones en las que será necesario el tratamiento del agua para hacerla apta para la bebida y el uso doméstico. La provisión de cualquier forma de tratamiento en un sistema de abastecimiento de agua requerirá un gasto de capital que puede ser relativamente sustancial. Lo que es más importante, aumentará grandemente los problemas de mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua y los riesgos de error. Algunos procesos de tratamiento de agua son más fáciles de operar y mantener que otros, pero todos necesitan supervisión y atención regular. Cuando se diseña una planta de tratamiento de agua, los requerimientos de operación y mantenimiento son factores claves que se deben considerar cuidadosamente.

El propósito del tratamiento del agua es convertir agua tomada de una fuente subterránea o superficial, "el agua cruda", en agua potable adecuada para el uso doméstico. Lo más importante es la remoción de organismos patógenos y sustancias tóxicas, tales como metales pesados, que provocan riesgos para la salud. También puede ser necesario remover otras sustancias o por lo menos reducirlas considerablemente. Estas incluyen: las materias suspendidas que causan la turbiedad, los compuestos de hierro y manganeso que imparten un sabor amargo o manchan la ropa, y el dióxido de carbono excesivo que corroe las partes de concreto y metal. Para abastecimientos de agua a comunidades pequeñas por lo general serán menos importantes otras características de la calidad del agua, tales como dureza, total de sólidos disueltos y contenido orgánico. Se les debe reducir a niveles aceptables, pero el grado en el cual se tratar  el agua estará limitado por consideraciones económicas y técnicas. Las pautas de calidad para el agua potable presentadas en el Capítulo 3, deberán ser una guía cuando se determina el grado de tratamiento necesario.

Se ha desarrollado varios procesos de tratamiento de agua (llamados también "operaciones unitarias"). Algunos sirven a un solo propósito, otros tienen un múltiple campo de aplicación. A menudo se puede obtener un resultado de tratamiento en diferentes maneras (Cuadro 11.1). En los Capítulos 12-17 se trata sobre los procesos de tratamiento mencionados. La recarga artificial (tratada en el Capítulo 9) también puede ser considerada como un proceso de tratamiento de agua.

El almacenamiento de agua puede ser considerado como tratamiento. Por ejemplo, la esquistosomiasis cercariae normalmente no puede sobrevivir a 48 horas de almacenamiento. El número de coliformes fecales y estreptococo fecal será reducido considerablemente cuando el agua cruda est  sujeta a almacenamiento. El almacenamiento también permite que se realice la sedimentación, reduciendo el contenido de sólidos asentables del agua. Sin embargo, el almacenamiento puede promover el crecimiento de algas en el agua. A menudo otra desventaja es la pérdida de agua a través de la evaporación. Estos efectos serán reducidos al mínimo si se cubre los tanques de almacenamiento, lo que también evitar  que el polvo, los insectos y la contaminación por el aire y por pequeños animales contaminen el agua almacenada.



Cuadro 11.1  
 Efectividad de los procesos de tratamiento de agua en la remoción de diferentes impurezas

+++ etc. = efecto positivo en aumento  
 o = ningún efecto  
 - = efecto negativo

Proceso de tratamiento	Aeración	Coagulación y Floculación Química	Sedimentación	Filtración rápida	Filtración lenta	Clorinación
Contenido de oxígeno disuelto	+	o	o	-	--	+
Remoción de dióxido de carbono	-	o	o	+	++	+
Reducción de turbidez*	o	+++	+	+++	++++	o
Reducción de color	o	++	+	+	++	++
Remoción de sabor y color	++	+	+	++	++	+
Remoción de bacterias	o	+	++	++	++++	++++
Remoción de hierro y manganeso	++	+	+	++++	++++	o
Remoción de materia orgánica	+	+	++	+++	++++	+++

\* La turbidez del agua es causada por la presencia de materia suspendida que dispersa y absorbe los rayos de luz y así, le da al agua una apariencia no transparente y lechosa.

Frecuentemente, se tiene que usar un número de procesos de tratamiento de agua en combinación, para obtener el resultado deseado. Para el agua subterránea y para el agua superficial clara, probablemente será suficiente uno o unos pocos procesos. Generalmente, el agua superficial ligeramente contaminada puede ser tratada suficientemente usando unos pocos procesos; el agua fuertemente contaminada requiere muchos procesos de tratamiento, uno después del otro, para hacerla segura para la bebida y el uso doméstico. Para sistemas de abastecimiento de agua a pequeñas comunidades los esquemas complicados de tratamiento no son adecuados y en tales casos una solución mejor puede ser desarrollar otra fuente no contaminada de agua aún cuando se le pueda encontrar únicamente a una distancia mayor. Una alternativa puede ser el uso de formaciones subterráneas para el almacenamiento del agua y el mejoramiento de la calidad (recarga artificial).

Una vez que se ha seleccionado la fuente de agua, y que se ha evaluado la variación en su calidad, el ingeniero puede decidir cuál tratamiento debe aplicarse. Los siguientes capítulos proporcionan información y guía. Para abastecimientos de agua a pequeñas comunidades, las consideraciones de diseño más importantes son:

- Bajo costo;
- Utilización de un mínimo de equipo mecánico;
- Evitar el uso de sustancias químicas, cuando sea posible;
- Facilidad de operación y mantenimiento

Los arreglos simples pueden ser efectivos, siempre que estén bien diseñados. El diagrama de proceso de tratamiento de agua que se muestra en la Figura 11.1 es ilustrativo.

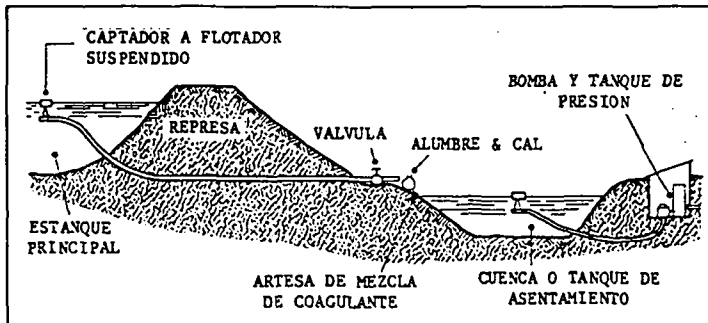


Figura 11.1  
Arreglos simples para la captación de agua, mezcla de coagulante y asentamiento

## 11.2 CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AGUA SUBTERRANEA

En su mayoría, el agua subterránea se origina del agua pluvial filtrada que, después de llegar al acuífero, fluye a través del subsuelo. Durante la filtración, el agua recogerá muchas impurezas tales como partículas de suelo inorgánicas y orgánicas, desechos de la vida vegetal y animal, microorganismos, fertilizantes naturales o hechos por el hombre, pesticidas, etc. Sin embargo, durante su flujo subterráneo ocurrirá una gran mejora en la calidad del agua, las partículas suspendidas son removidas mediante filtración, las sustancias orgánicas son degradadas mediante la oxidación y los microorganismos mueren debido a la falta de nutrientes. Los compuestos de mineral del agua puede aumentar considerablemente a través del deslave de las sales de las capas subterráneas.

Si se extrae adecuadamente el agua subterránea, ésta estará libre de turbiedad y de organismos patógenos. Cuando se origina en un acuífero de arena limpia, también estarán ausentes otras sustancias riesgosas u objetables. En estos casos, puede permitir el uso directo del agua como agua potable sin ningún tratamiento. Cuando el agua proviene de un acuífero que contiene materia orgánica, el oxígeno habrá sido consumido y es probable que el contenido de dióxido de carbono sea alto. Entonces, el agua será corrosiva a menos que esté presente, de una forma u otra, el carbonato del calcio. En los casos en que la cantidad de materia orgánica en el acuífero sea elevada, el contenido de oxígeno puede haberse agotado completamente. El agua que no contiene oxígeno (agua anaeróbica) disolverá el hierro, manganeso y metales pesados del subsuelo. Se puede remover estas sustancias a través del tratamiento, por ejemplo mediante aeración. El tipo de aerador hará que el contenido de dióxido de carbono del agua sea reducido o permanezca invariable. Una reducción es deseable si el agua es corrosiva pero en otros casos puede resultar en depósitos problemáticos de carbonato de calcio.

Algunas veces, el agua subterránea contiene cantidades excesivas de hierro, manganeso y amoníaco. En Europa, donde el agua subterránea es escasa, aún esas fuentes de agua subterránea son extraídas y tratadas con coagulación química y floculación o filtración seca para hacerlas aptas para la bebida y propósitos domésticos. Sin embargo, estos procesos son muy complicados para abastecimientos de agua a pequeñas comunidades en países en desarrollo y deberían evitarse cuando sea posible. El Cuadro 11.2 resume los procesos de tratamiento descritos anteriormente.

Cuadro 11.2  
Tratamiento de agua subterránea

CALIDAD DEL AGUA	Aeración para		Sedimentación Llana	Filtración (Rápida)	Cloración Segura o Post- Cloración
	Incrementar O <sub>2</sub>	Reducir CO <sub>2</sub>			
Aeróbica, aceptablemente dura, no corrosiva					0
Aeróbica, blanda y corrosiva		X			0
Anaeróbica, aceptablemente dura, no corrosiva	X				0
Sin hierro ni manganeso					
Anaeróbica, aceptablemente dura, no corrosiva	X		0	X	0
Con hierro y manganeso					
Anaeróbica, blanda, corrosiva	X	X			0
Sin hierro ni manganeso					
Anaeróbica, blanda, corrosiva	X	X	0	X	0
Con hierro y manganeso					

(X = necesario, 0 = opcional)

### 11.3 CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL

Se puede extraer el agua superficial de arroyos, ríos, lagos o canales de irrigación. En tales fuentes superficiales, el agua se origina en parte de los flujos subterráneos y en parte del agua pluvial que ha fluido sobre el suelo hacia los cuerpos receptores de agua superficial. Los flujos de agua

subterránea llevarán sólidos disueltos al agua superficial, la escorrentía de la superficie es la conductora principal de turbiedad y materia orgánica, así como de organismos patógenos. En los cuerpos del agua superficial, las partículas minerales disueltas permanecerán inalterables pero las impurezas orgánicas serán degradadas a través de procesos químicos y microbianos. La sedimentación en el agua superficial embalsada o de flujo lento resultará en la remoción de sólidos suspendidos. Los organismos patógenos morirán debido a la falta de alimento adecuado. Sin embargo, es probable que se produzca una fuerte contaminación del agua superficial como resultado de afluentes de desechos y crecimiento de algas.

En áreas escasamente pobladas, puede que el agua clara de ríos y lagos no requiera tratamiento para hacerla apta para la bebida. Sin embargo, tomando en cuenta el riesgo de contaminación incidental, se debe proveer la clorinación como medida de seguridad cuando sea factible. El agua superficial no contaminada de baja turbiedad puede ser purificada mediante la filtración lenta en arena como único proceso de tratamiento, o mediante la filtración rápida seguida únicamente de la cloración. Los filtros lentos de arena, particularmente en áreas rurales de países en desarrollo, tienen la gran ventaja de que los trabajadores los pueden construir con materiales disponibles localmente y sin mucha supervisión experta.



Foto: OMS por J. Magee

Figura 11.2

El agua superficial necesita tratamiento antes de ser usada para propósitos de bebida y domésticos

Cuando la turbiedad del agua que va a ser tratada es elevada o cuando están presentes las algas, los filtros lentos de arena se atorarán rápidamente. Se necesitará un pretratamiento, tal como la sedimentación, la filtración rápida o ambos procesos en combinación. Para las partículas coloidales suspendidas, se puede mejorar grandemente la remoción mediante el asentamiento a través de la coagulación química y floculación. Mediante la precloración se promueve la remoción de algas. En muchos casos en los que el contenido de materia orgánica del agua cruda es elevado, se requerirá todos estos procesos. El agua de ríos y lagos es de una amplia variedad en cuanto a composición y es imposible describir en detalle todos los sistemas de tratamiento requeridos en cada caso.

El Cuadro 11.3 muestra los sistemas más aplicables en abastecimientos de agua a pequeñas comunidades sin considerar los procesos complicados.

Cuadro 11.3  
Tratamiento de agua superficial

Calidad del agua	Proceso de tratamiento	Precloración	Coagulación quím. y floculación	Sedimentación	Filtración rápida	Filtración lenta en arena	Cloración segura o posterior
Clara y no contaminada							0
Ligeramente contaminada, baja turbidez					0	X	0
Ligeramente contaminada, turbidez media				0	X	X	0
Ligeramente contaminada, alta turbidez			X	X	X	X	0
Ligeramente contaminada, muchas algas	X	X	X	X	X		X
Fuertemente contaminada, poca turbidez	X				X	X	0
Fuertemente contaminada, mucha turbidez	X	X	X	X	X		X

(X = necesario, 0 = opcional)

## TRATAMIENTO DEL AGUA

American Water Works Association  
WATER QUALITY AND TREATMENT  
McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1971 (3rd Edition)

Azevedo Netto, J.M.  
TRATAMENTO DE AGUAS DE ABASTECIMENTO  
Editora de Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 1966

Cox, C.R.  
OPERATION AND CONTROL OF WATER TREATMENT PROCESSES  
World Health Organization, 1964, 392 p.  
(Monograph Series No. 49)

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.  
WATER AND WASTE WATER ENGINEERING (2 Tomos)  
John Wiley, Londres, 504; 664 p.

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.  
ELEMENTS OF WATER SUPPLY AND WASTE DISPOSAL  
John Wiley, Londres, 1972

Mann, H.T.; Williamson, D.  
WATER TREATMENT AND SANITATION  
Intermediate Technology Publications Ltd., Londres, 1968, 92 p.

MANUAL ON WATER SUPPLY AND TREATMENT  
Government of India Ministry of Works & Housing (Central Public Health  
Environmental Engineering Organization),  
Nueva Delhi, 1976 (2nd Edition)

Sanks, R.C.  
WATER TREATMENT PLANT DESIGN FOR THE PRACTICING ENGINEER  
Ann Arbor Science, Ann Arbor, USA, 1978

Smethurst, G.  
BASIC WATER TREATMENT  
Thomas Telford Ltd., Londres, 1979

TEORIA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACION DEL AGUA  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima,  
1974 (Serie Técnica 13)

VILLAGE TECHNOLOGY HANDBOOK  
Volunteers in Technical Assistance  
Mount Rainer, Maryland, USA, 1977

## 12. AERACION

### 12.1 INTRODUCCION

La aeración es el proceso de tratamiento mediante el cual se lleva el agua a un contacto íntimo con el aire con el propósito de: (a) aumentar el contenido de oxígeno; (b) reducir el contenido de dióxido de carbono, y (c) remover el sulfuro de hidrógeno, metano y varios compuestos orgánicos volátiles responsables del sabor y el olor. Los resultados de los tratamientos mencionados en (a) y (c) siempre son útiles en la producción de agua potable buena. Sin embargo, reducir el contenido de dióxido de carbono puede cambiar el equilibrio carbonato-bicarbonato en el agua de tal forma que se formen depósitos de carbonato de calcio, que pueden provocar problemas.

La aeración es ampliamente usada para el tratamiento del agua subterránea que tenga contenido demasiado elevado de hierro y manganeso. Esas sustancias imparten un sabor amargo al agua, decoloran el arroz que se cocina en ella y producen manchas marrón-negruczas en la ropa lavada con ella. El oxígeno atmosférico que se lleva al agua a través de la aeración reaccionará con los compuestos disueltos de hierro y manganeso convirtiéndolos en hidratos óxido férricos y mangánicos insolubles. Estos pueden ser separados mediante la sedimentación o filtración. Es importante resaltar que la oxidación de los compuestos de hierro y manganeso en el agua no siempre se logra con facilidad. Particularmente cuando el agua contiene materia orgánica, es probable que la formación de precipitados de hierro y manganeso, a través de la aeración, no sea muy efectiva. Entonces pueda que se requiera la oxidación química, un cambio en la alcalinidad o filtros especiales para la remoción del hierro y manganeso. Sin embargo, estos métodos de tratamiento son caros y complejos, y para las áreas rurales de países en desarrollo, sería mejor buscar otra fuente de agua. La aeración sólo sería útil para el tratamiento del agua superficial, cuando ésta tenga un alto contenido de materia orgánica. Por lo general, la calidad total de este tipo de agua será pobre y lo apropiado sería probablemente buscar otra fuente de agua.

Se puede obtener el contacto íntimo entre agua y aire necesario para la aeración de muchas formas. Para el tratamiento del agua de bebida se logra mayormente dispersando el agua a través del aire en capas delgadas o gotas finas (aeradores de cascada) o mezclando el agua con aire disperso (aerador de burbuja). En ambos casos el contenido de oxígeno del agua puede elevarse al 60-80% del contenido máximo de oxígeno que el agua puede contener cuando está completamente saturada. En los aeradores de cascada, se efectúa una liberación apreciable de gases del agua; en los aeradores de burbuja este efecto es ínfimo. La reducción del dióxido de carbono mediante los aeradores de cascada puede ser considerable, pero no siempre es suficiente cuando se trata agua muy corrosiva. Para este tipo de agua se requerirá un tratamiento químico, tal como la dosificación de cal o filtración sobre mármol o dolomita quemada.



## 12.2 AERADORES DE CASCADA

El aerador de bandejas múltiples que se muestra en la Figura 12.1 ofrece un arreglo muy simple y económico que ocupa poco espacio.

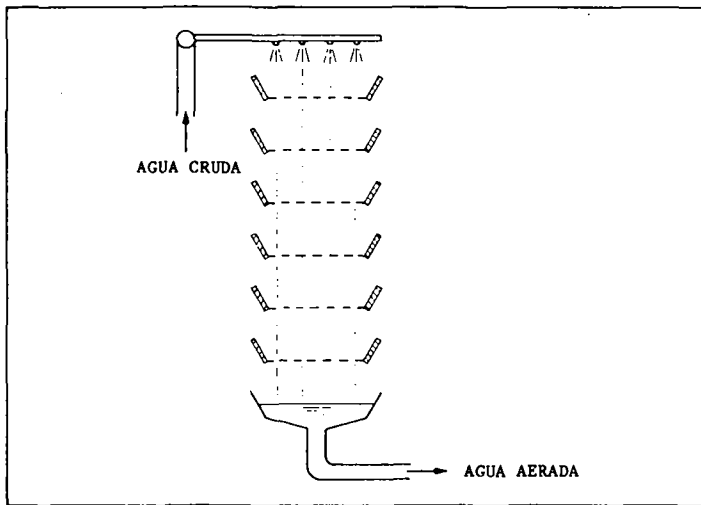


Figura 12.1  
Aerador de bandeja múltiple

Este tipo de aerador consiste en 4-8 bandejas con fondos perforados en intervalos de 30-50 cm. A través de las tuberías perforadas se divide el agua en forma pareja sobre la bandeja superior desde donde desciende escurriéndose a una escala de  $0.02 \text{ m}^3/\text{seg}$  por  $\text{m}^2$  de superficie de la bandeja. Se dispersa las gotas y se les recolecta en cada bandeja siguiente. Las bandejas pueden estar hechas de cualquier material apropiado, tal como láminas de cemento-asbesto con perforaciones, tuberías de plástico de diámetro pequeño o tablillas paralelas de madera (Figura 12.2). Para dispersión más fina del agua, se puede llenar las bandejas del aerador con grava gruesa de aproximadamente 10 cm de profundidad. Algunas veces se utiliza una capa de coque, la cual actúa como catalizador y promueve la precipitación del hierro del agua. En la Figura 12.3 se muestra una unidad de aeración/filtración operada manualmente para el tratamiento de agua con un alto contenido de hierro y manganeso.

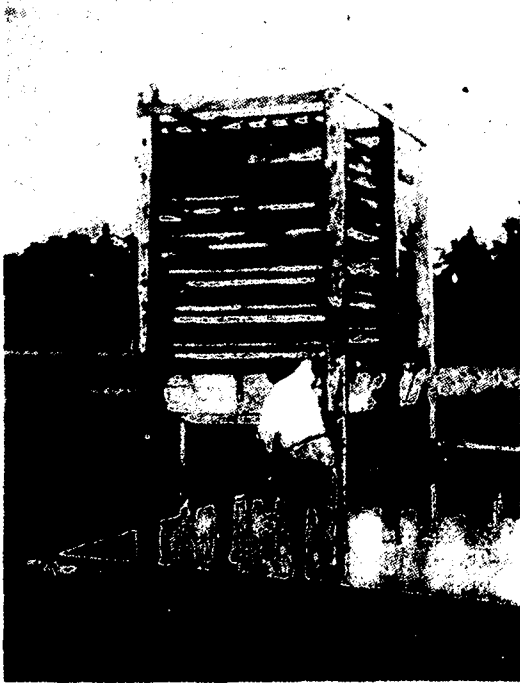
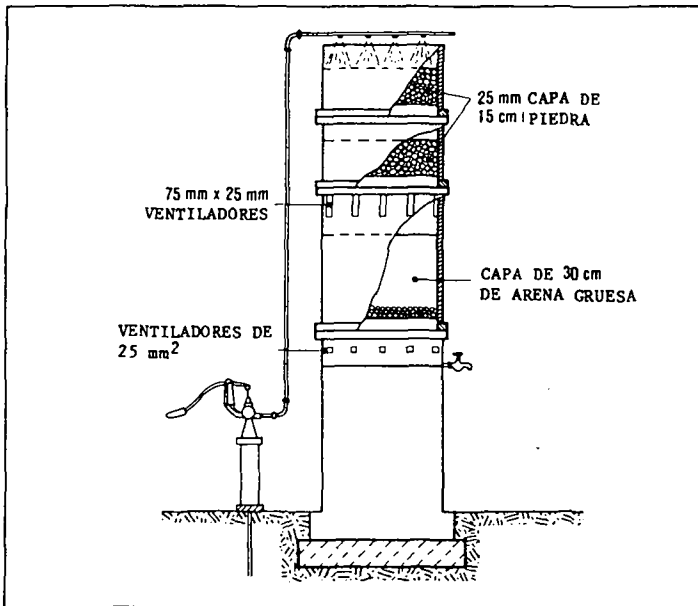


Figura 12.2  
Instalación de aerador



Ref.: NEERI, India

Figura 12.3  
Unidad de aeración/filtración operada manualmente

El aerador de escalones (Figura 12.4) es un tipo de aerador con características similares. Esencialmente este aerador consiste en un tramo de 4-6 escalones, cada uno de aproximadamente 30 cm de altura, con una capacidad aproximada de  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  por metro de ancho. Para producir turbulencia y así promover la eficiencia de aeración, a menudo se coloca obstáculos al borde de cada escalón. Comparado con los aeradores de bandeja, los requerimientos de espacio de los aeradores de escalones son algo mayores pero la pérdida general de carga es menor. Otra ventaja es que no se necesita ningún mantenimiento.

Un aerador de plataforma múltiple utiliza los mismos principios. Se forma capas de caída de agua para una exposición completa del agua al aire (Figura 12.5).

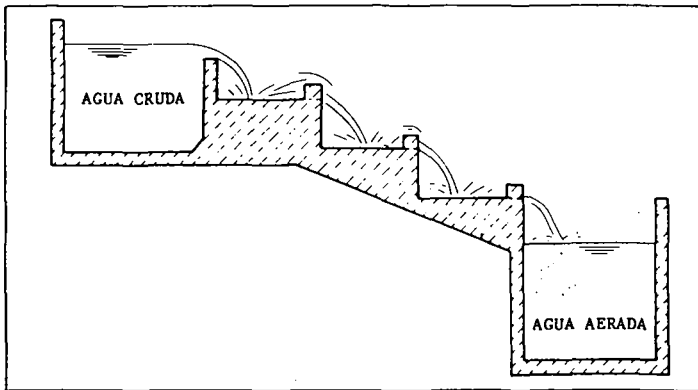


Figura 12.4  
Aerador de escalones

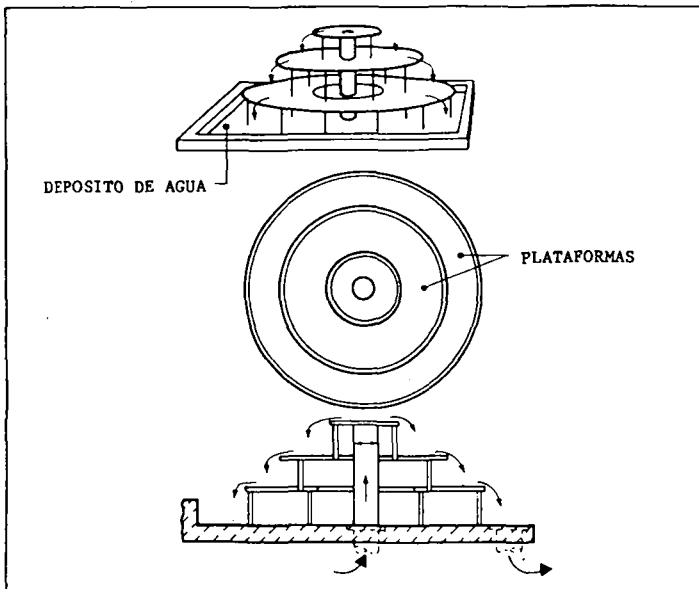


Figura 12.5  
Aerador de plataforma múltiple

Los aeradores a rocío consisten en boquillas estacionarias conectadas a una rejilla de distribución a través de la cual se rocía el agua hacia el aire circundante, a velocidades de 5 a 7 m/seg.

En la Figura 12.6 se muestra un aerador a rocío muy simple que descarga el agua hacia abajo a través de piezas cortas de tubería de unos 25 cm de longitud y con un diámetro de 15-30 mm. A unos pocos centímetros por debajo del extremo de cada tubería se coloca un disco circular, de modo que se formen finas películas circulares de agua que luego se dispersan en un fino rocío de gotas de agua.



Figura 12.6  
Aerador a rocío

Otro tipo de aerador a rocío utiliza boquillas fijadas a tuberías de alimentación, las cuales rocían el agua hacia arriba (Figura 12.7). Por lo general, los aeradores a rocío se colocan sobre el tanque de asentamiento o las unidades de filtración, de tal forma que se ahorre espacio, y que se evite la necesidad de un depósito colector separado para el agua aerada.

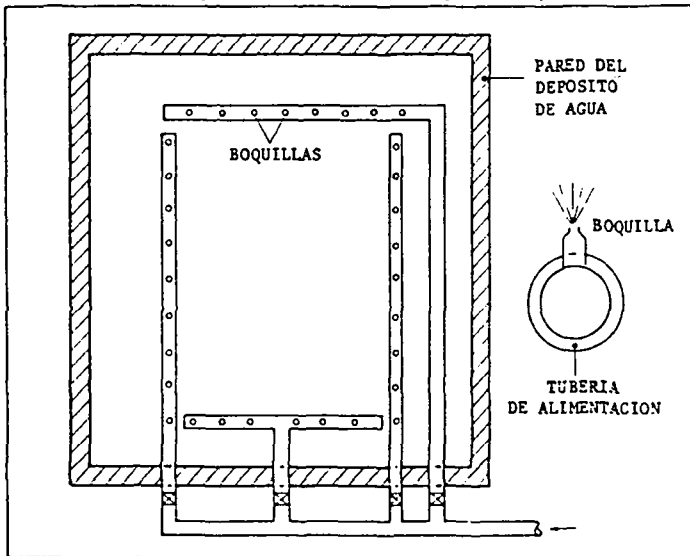


Figura 12.7  
Aerador a rocío con boquillas

Para evitar el atoro, las aberturas de las boquillas deben ser bastante grandes, más de 5 mm, pero al mismo tiempo su construcción debe ser de forma tal que el agua se disperse en gotas finas. Se ha desarrollado muchos diseños para satisfacer estos requerimientos. En la figura 12.8 se muestra un simple aerador a rocío que utiliza una placa de desviación.

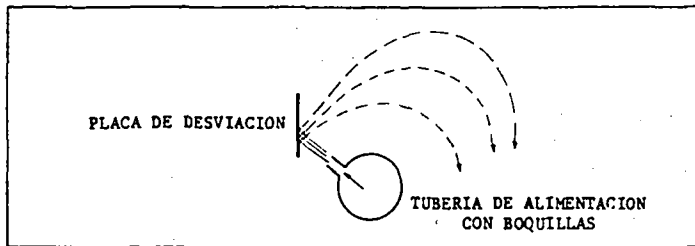
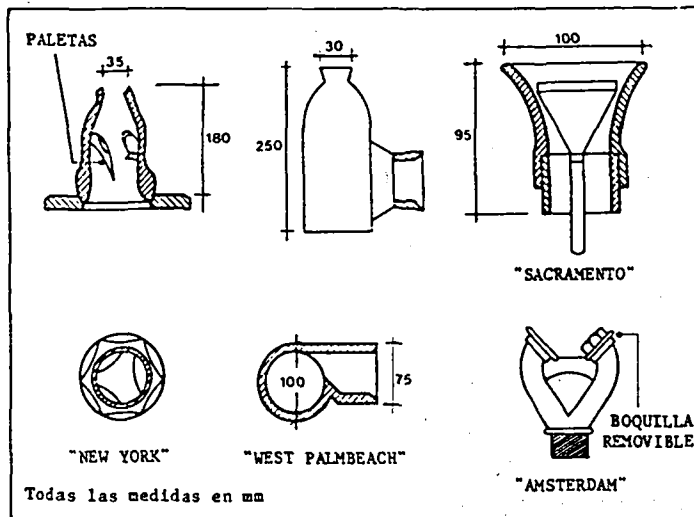


Figura 12.8  
Aerador simple a rocío con placa de desviación

La Figura 12.9 presenta varios ejemplos de boquillas diseñadas especialmente.



Según: Fair, Geyer & Okun, 1968

Figura 12.9  
Boquillas para aeradores a rocío

### 12.3 AERADORES DE BURBUJA

La cantidad de aire requerido para la aeración del agua por burbujas, es muy pequeña, no supera los  $0.3-0.5 \text{ m}^3$  de aire por  $\text{m}^3$  de agua, y se puede obtener estos volúmenes con facilidad mediante una succión de aire. Esto lo demuestra mejor el aerador Venturi que se muestra en la Figura 12.10. Se

coloca el aerador más arriba de la tubería que transporta el agua cruda. En la garganta del Venturi la velocidad de flujo es tan elevada que la presión de agua correspondiente cae por debajo de la presión atmosférica. De aquí que el aire es absorbido dentro del agua. Luego de pasar por la garganta del Venturi, el agua fluye a través de una sección de tubería que se va ensanchando y la velocidad de flujo disminuye con una correspondiente elevación de la presión del agua. Las finas burbujas de aire se mezclan con el agua. Se absorbe el oxígeno de las burbujas de aire al agua. La liberación de dióxido de carbono en este tipo de aerador es insignificante debido a que el volumen de aire de las burbujas es bastante pequeño.

Comparado con los aeradores a rocío, los requerimientos de espacio de los aeradores Venturi son pocos; la pérdida de carga general es casi la misma.

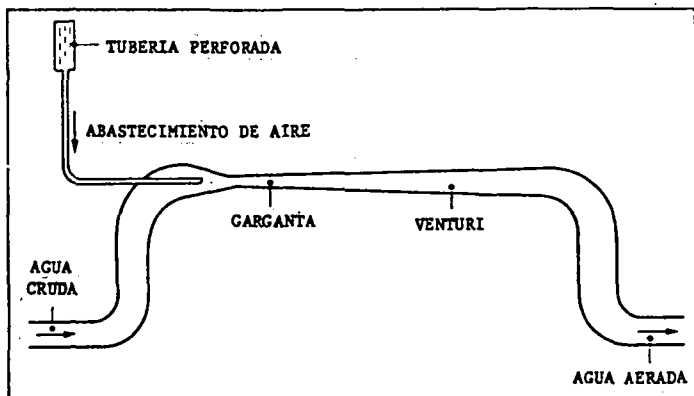


Figura 12.10  
Aerador Venturi

El aerador sumergido de escalones de la Figura 12.11 opera atrapando el aire en las plataformas de caída del agua, las cuales lo transportan hacia el agua profunda colectada en los pasantes. Entonces el oxígeno es transferido de las burbujas de aire hacia el agua. La caída total es aproximadamente de 1.5 m subdivididos en 3-5 escalones. La capacidad varía entre 0.005 y 0.05 m<sup>3</sup>/seg por metro de ancho.

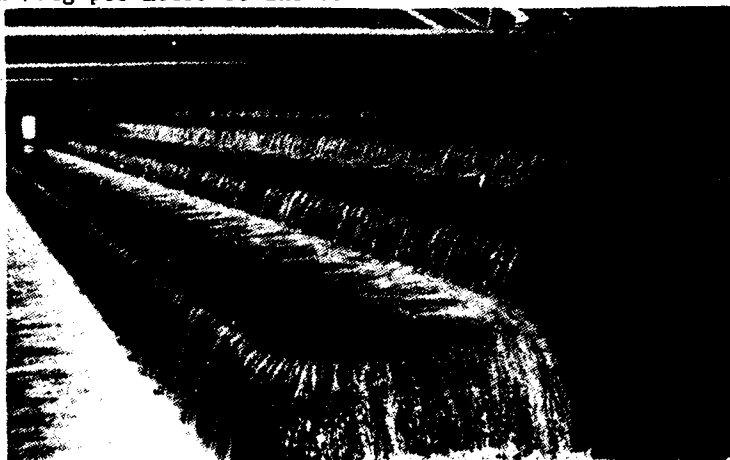


Figura 12.11  
Aerador sumergido de escalones

AERACION

American Water Works Association: Committee on Aeration  
AERATION OF WATER

En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 47 (1975) No. 5, pp. 873-893

Azevedo Netto, J.M

TRATAMIENTO DE AGUAS DE ABASTECIMIENTO

Editora de Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 1966

CURSO SOBRE TECNOLOGIA DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA PAISES EN DESARROLLO  
CEPIS, Lima, 1977

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.

WATER AND WASTEWATER ENGINEERING

Vol. 2, Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal

John Wiley & Sons, Nueva York, 1968

Haney, P.D.

THEORETICAL PRINCIPLES OF AERATION

En: Journal Am. Water Works Assoc., Vol. 24 (1932) No. 62

Langelier, S.

THE THEORY AND PRACTICE OF AERATION

Journal Am. Waterworks Assoc. Vol. 24 (1932) No. 62

## 13. COAGULACION Y FLOCULACION

### 13.1 INTRODUCCION

La coagulación y la floculación proveen el proceso de tratamiento de agua mediante el cual la materia coloidal finamente dividida y suspendida en el agua se aglomera y forma flóculos. Esto permite retirarlos mediante sedimentación o filtración. El tamaño de las partículas coloidales (coloides)\* se encuentra entre los sólidos disueltos y la materia suspendida. Mediante la repulsión electrostática y la hidratación se mantiene a los coloides en suspensión ("estabilizados"). La repulsión electrostática ocurre porque usualmente los coloides tienen una superficie cargada debido a la presencia de una capa doble de iones alrededor de cada partícula. Así, el coloide tiene una carga eléctrica mayormente negativa. La hidratación es la reacción, en la superficie de las partículas, con el agua circundante. Los aglomerados de partículas de agua resultantes tienen una gravedad específica que difiere en muy poco de la del agua.

Las sustancias que frecuentemente serán removidas mediante la coagulación y la floculación, son aquellas que causan la turbiedad y el color. A menudo las aguas superficiales en países tropicales son turbias y contienen material colorante. La turbiedad puede ser el resultado de la erosión del suelo, del crecimiento de algas o de los desechos animales transportados por la escorrentía superficial. El color puede ser impartido por sustancias lixiviadas de materia orgánica descompuesta, hojas o suelo, tal como turba. Mayormente tanto la turbiedad como el color están presentes en forma de partículas coloidales.

La repulsión electrostática entre las partículas coloidales elimina en forma efectiva las fuerzas de atracción de masas (fuerzas de Van der Waals) que harían que se junten las partículas. Ciertas sustancias químicas (llamadas agentes coagulantes) tienen la capacidad de comprimir la capa doble de iones alrededor de las partículas coloidales. Estas controlan la repulsión electrostática y permiten así que las partículas se floculen; es decir, que formen flóculos. Estos flóculos pueden alcanzar un tamaño suficiente y un peso específico que permita removerlos mediante el asentamiento o la filtración.

Generalmente, los procesos de tratamiento de agua que incluyen el uso de sustancias químicas no son muy adecuados para abastecimientos de agua para pequeñas comunidades. Se les debería evitar en lo posible. Se debería utilizar la coagulación química y la floculación sólo cuando no se pueda lograr el resultado necesario de tratamiento con otro proceso que no utilice sustancias químicas. Si la turbiedad y el color del agua cruda no son mucho mayores de lo permisible para el agua potable, podría evitarse la coagulación

\* Escala de tamaño:  $5 \cdot 10^{-6}$  -  $2 \cdot 10^{-4}$  milímetros.



química en el tratamiento de agua. Un proceso como la filtración lenta en arena serviría tanto para reducir la turbiedad y el color a niveles aceptables, como para mejorar las otras características de la calidad del agua en una sola unidad. Si fuera necesario, un filtro preliminar puede servir para reducir la carga de turbiedad en el filtro lento de arena.

### 13.2 COAGULANTES

La alúmina ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ ; sulfato de aluminio) es, con mucho, el coagulante más ampliamente usado, pero las sales de hierro (por ejemplo, el cloruro férrico,  $FeCl_3O$ ) también pueden ser usadas y, en algunos casos, tienen ventajas sobre el sulfato de aluminio. Una ventaja significativa de las sales de hierro sobre la alúmina es la escala más amplia de pH\* disponible para una buena coagulación. Así, en el tratamiento de aguas moderadamente coloreadas en donde se obtiene mejor la remoción con pH menores, se pueden preferir las sales de hierro como coagulantes. También se debe tomar en cuenta a las sales de hierro para la coagulación con pH elevados debido a que el hidróxido férrico es altamente insoluble en contraste con las sales de aluminio que forman iones solubles de aluminio con pH elevados. Para coagulación con pH medios se utiliza mayormente aluminato de sodio. Se dispone de los polielectrolitos sintéticos orgánicos como coagulantes pero, por lo general, no son económicos para sistemas pequeños de abastecimiento de agua ni tampoco se dispone de ellos con prontitud.

Coagulantes tales como las sales de hierro y aluminio solubles reaccionan con la alcalinidad del agua y se hidrolizan en ella. Por ejemplo, la alúmina reacciona para formar flóculos de aluminio-hidróxido  $Al(OH)_3$ , un precipitado gelatinoso. La alcalinidad requerida puede estar presente naturalmente en el agua o se la tiene que añadir a través de la dosificación de cal,  $Ca(OH)_2$  o de carbonato de sodio,  $Na_2CO_3$  (también llamado "ceniza de soda").

Para una buena coagulación, se debe alimentar en el agua la dosis óptima de coagulante y se le debe mezclar adecuadamente con ella. La dosis óptima variará dependiendo de la naturaleza de agua cruda y de su composición general. No es posible calcular matemáticamente la dosis óptima de coagulante para un agua cruda particular. Un experimento de laboratorio llamado "la prueba de jarra" es usado generalmente para la determinación periódica de la dosis óptima. Se puede describir brevemente la prueba de jarra de la siguiente manera:

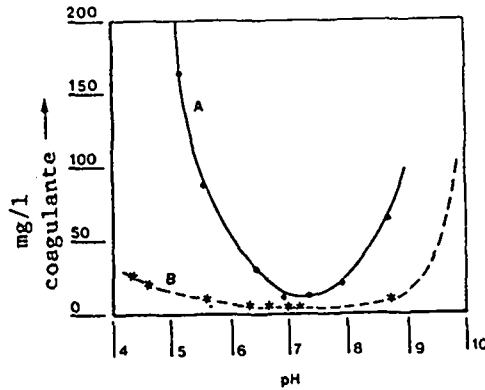
Se coloca una serie de muestras de agua en un agitador múltiple especial y se dosifican las muestras con una escala de coagulantes, por ejemplo, 10, 20, 30, 40 y 50 mg/l; se les agita fuertemente por aproximadamente un minuto.

---

\* Medida de la acidez/alcalinidad del agua. El agua ácida tiene un pH inferior a 7, el pH del agua alcalina es superior a 7.

Luego sigue una agitación suave (10 minutos), después de la cual se permite a las muestras estabilizarse y asentarse durante 30 a 60 minutos. Luego se examina el color y la turbiedad de las muestras y se anota la dosis menor de coagulante que proporciona una clarificación satisfactoria del agua.

Una segunda prueba incluye la preparación de muestras con el pH regulado de tal forma que las muestras cubran una escala (por ejemplo, pH = 5; 6; 7 y 8). La dosis de coagulante determinada previamente es añadida en el caso anterior. Después de esto, se examinan las muestras y se determina el pH óptimo. Si fuera necesario, se puede hacer una nueva verificación de la dosis mínima de coagulante.



Coagulación de 50 mg/l de caolín con sulfato de aluminio y sulfato férrico. Comparación de zonas pH de coagulación de turbiedad obtenida con barro, mediante sulfato de aluminio, curva A y sulfato férrico, curva B. Los puntos en las curvas representan la dosificación de coagulante requerida para reducir la turbiedad a la mitad de su valor original.

(Adaptado de R.F. Packham)

Figura 13.1  
Relación zona de pH-coagulación

Como se mencionó anteriormente, las sales de hierro y aluminio tienen diferencias considerables en sus zonas de pH de buena coagulación. Para la alúmina, la zona de pH para una coagulación óptima es bastante estrecha, variando desde aproximadamente 6.5 a 7.5. La escala comparable para el sulfato férrico es considerablemente más amplia, una escala pH de aproximadamente 5.5 a 9.0 (Figura 13.1). Cuando se grafica los resultados de la "prueba de jarra", este tipo de curva es típico.

El método más común de dosaje de la alúmina o del sulfato férrico es en forma de solución. Tal solución (por lo general concentraciones de 3 a 7%) se prepara en tanques especiales con una capacidad de contención de 10 o más horas de requerimiento de alimentación de coagulante. Se necesitan dos tanques, uno en operación mientras se prepara la solución en el otro.

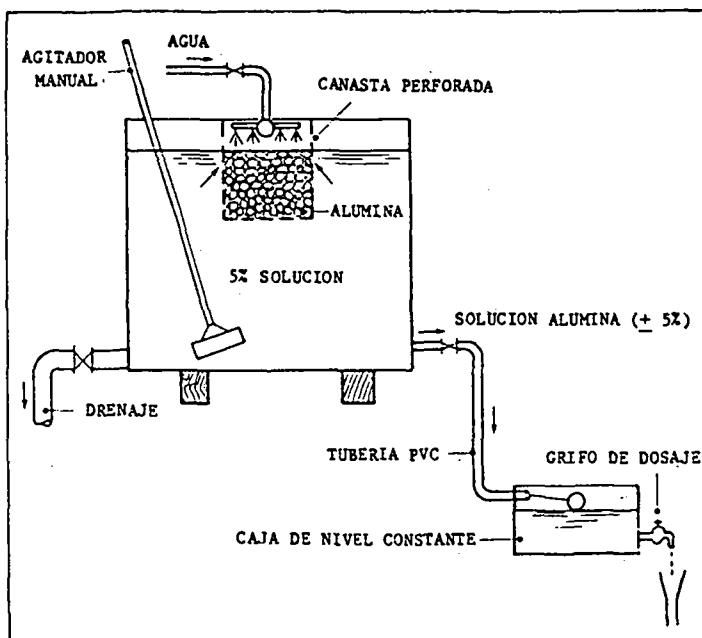


Figura 13.2  
 Tipo de alimentación de sustancias químicas para la alúmina

Cuando se usa la alúmina, se debe recordar que en soluciones con una concentración inferior al 1%, la sustancia química se hidroliza (es decir, que reacciona con el agua de dilución) antes de que se le dosifique al agua cruda. Para evitar esto, la solución siempre debe tener una concentración mayor al 1.5%.

Se pueden usar varios tipos de alimentación de sustancias químicas. La Figura 13.2 muestra un ejemplo.

El método más simple de utilización de cal es en la forma de una suspensión llevada a un tanque especial (llamado "saturador de cal") para producir una solución saturada de hidróxido de calcio. El tamaño del tanque depende del dosaje de cal requerido.

Para mayor información sobre sustancias químicas en el tratamiento del agua, véase el Anexo 4.

### 13.3 MEZCLA RAPIDA

La mezcla rápida tiene por finalidad la dispersión inmediata de toda la dosis de sustancias químicas a través de la masa de agua cruda. Para lograr esto, es necesario agitar el agua violentamente e inyectar la sustancia química en la zona más turbulenta para asegurar su dispersión uniforme y rápida.

El mezclado tiene que ser rápido porque la hidrólisis del coagulante es casi instantánea (en pocos segundos). La desestabilización de los coloides también toma muy poco tiempo.

El mezclador rápido debería estar ubicado cerca a la "casa de química" donde se preparan las soluciones de sustancias químicas. En este caso las tuberías de alimentación serán de poca longitud. También es deseable colocar el dispositivo de mezcla rápida cerca de los floculadores. A menudo es bastante difícil combinar ambos requerimientos en la disposición de una planta de tratamiento.

Se utilizan muchos dispositivos para proporcionar una mezcla rápida para la dispersión de sustancias químicas en el agua. Básicamente, existen dos grupos:

- i) Mezcla rápida hidráulica;
- ii) Mezcla rápida mecánica.

### Mezcla rápida hidráulica

Para la mezcla rápida hidráulica se utilizan arreglos tales como canales o cámaras con deflectores que producen condiciones turbulentas de flujo; vertederos con caída libre y saltos hidráulicos (Figuras 13.3; 13.4 y 13.5). También se puede lograr la mezcla rápida mediante la alimentación de sustancias químicas en la succión de una bomba. Con un buen diseño, un mezclador hidráulico puede ser tan efectivo como un dispositivo mecánico de mezclado.

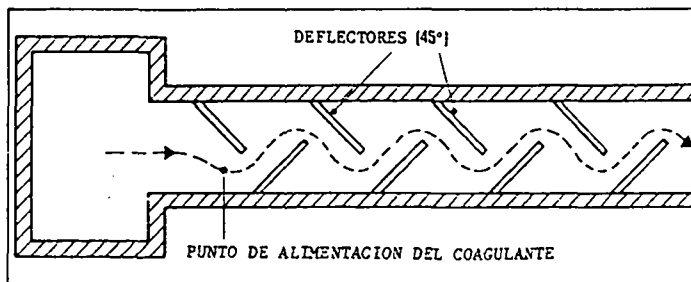


Figura 13.3  
Canal con deflectores para mezcla rápida

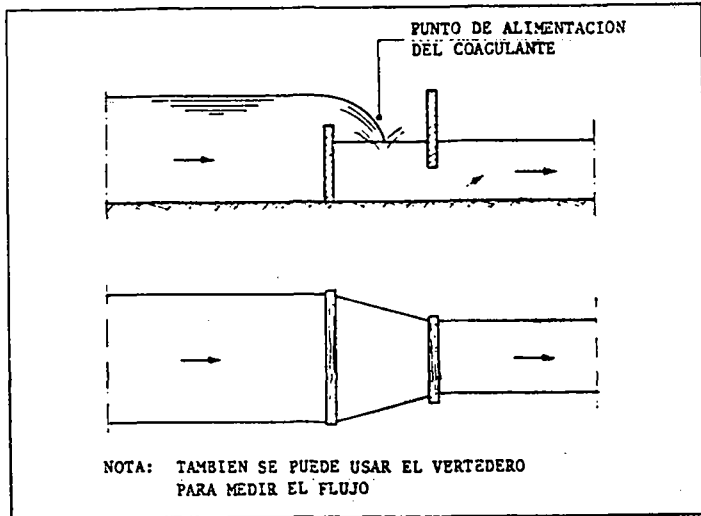


Figura 13.4  
Vertedero rectangular como mezclador

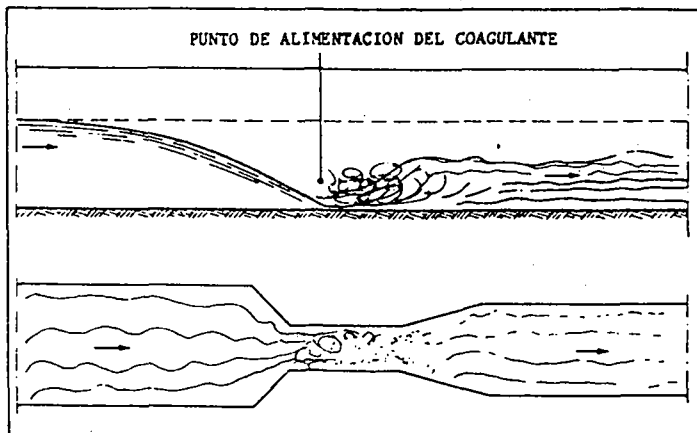


Figura 13.5  
Salto hidráulico



Foto: CIR

Figura 13.6  
Salto hidráulico para la mezcla rápida (Filipinas)

### Mezcla rápida mecánica

Con la mezcla mecánica, la energía requerida para la agitación del agua es impartida mediante impulsores y propulsores o turbinas ("mezcladores rápidos", "mezcladores instantáneos", "turbo-mezcladores"). Véase Figura 13.7.

Generalmente, los mezcladores rápidos mecánicos son menos adecuados para plantas pequeñas de tratamiento que los mezcladores hidráulicos, ya que requieren un suministro confiable y continuo de energía.

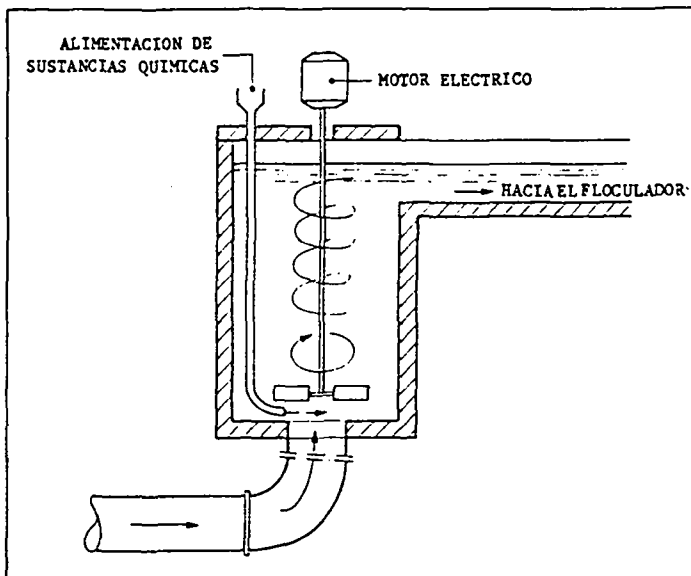


Figura 13.7  
Mezclador mecánico

## 13.4 FLOCULACION

La floculación es un proceso de agitación suave y continua de agua coagulada con el propósito de formar flóculos a través del agregado de las partículas más diminutas presentes en el agua. Consiste en un acondicionamiento del agua para formar flóculos que puedan ser removidos fácilmente mediante sedimentación o filtración. La eficiencia del proceso de floculación está determinada, en gran parte, por el número de colisiones por unidad de tiempo entre las partículas coaguladas más diminutas. Existen floculadores mecánicos e hidráulicos.

En los floculadores mecánicos se logra la agitación del agua con dispositivos tales como paletas, conjuntos de paletas o rastrillos.

Se pueden adaptar estos dispositivos a un eje vertical u horizontal. Por lo general, se colocan los floculadores de eje vertical en un tanque cuadrado con varias cámaras (cuatro o más). Con floculadores de eje horizontal que tengan un flujo transversal, se deben proveer por lo menos 4 hileras de ejes con tabiques divisorios, de tal forma que se eviten los cortocircuitos.

En los floculadores hidráulicos, el flujo de agua está tan influenciado por estructuras hidráulicas pequeñas que da como resultado una acción de agitación. Ejemplos típicos son: canales con paletas, cámaras floculadoras colocadas en serie (por ejemplo: floculador "Alabama") y floculadores de lecho de grava.

Las principales deficiencias de los floculadores hidráulicos son:

- No es posible ajustarlos a los cambios en la composición del agua cruda;
- No es posible ajustarlos a la escala de producción del agua de la planta de tratamiento;
- A menudo la pérdida de carga es apreciable;
- Pueden ser difíciles de limpiar.

### Diseño de floculadores

En el diseño de una instalación de floculación no sólo se debe tomar en cuenta el gradiente de velocidad ( $G$ ), sino también el tiempo de retención ( $t$ ). El producto de  $G \cdot t$  da una medida para el número de colisiones de las partículas, y de la acción de formación de flóculos.

La fórmula para calcular el gradiente de velocidad es:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V}}, \text{ en la que}$$

$G$  = gradiente de velocidad ( $\text{seg}^{-1}$ )

$P$  = energía transmitida al agua (kilovatio)

$V$  = volumen de agua al cual se aplica la energía; en donde sea aplicable el volumen del tanque o cámara de mezcla ( $\text{m}^3$ )

$\mu$  = viscosidad cinemática del agua ( $\text{m}^2/\text{seg}$ )

( $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$  con el agua a una temperatura de  $15^\circ\text{C}$ ;

$1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$  a  $20^\circ\text{C}$ ;  $0.90 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$  a  $25^\circ\text{C}$ ).

Cuadro 13.1  
 Criterios de diseño del floculador

Factor de diseño	G (sec <sup>-1</sup> )	t (sec)	G.t
Escala	10 a 100	1,200 a 1,800	30,000 a 150,000
Valor típico	45 a 90	1,800	50,000 a 100,000

Para cada floculador, el valor G.t óptimo debería ser seleccionado cuidadosamente, y se debe tomar un valor alto para que sea consistente con la formación óptima de flóculos sin causar disolución o desintegración de los flóculos después de que estos se han formado. Se puede mejorar la cohesión interna de los flóculos mediante sustancias químicas tales como sílica activada, o polielectrolitos (ayudantes de coagulación).

13.5 FLOCULADORES HIDRAULICOS

Floculadores de tabiques deflectados

Para floculadores de tabique deflectado de flujo horizontal (Figura 13.8) usualmente el diseño de la velocidad del agua se encuentra en la escala de 0.10 a 0.30 m/seg. Normalmente el tiempo de retención es de 15 a 20 minutos.

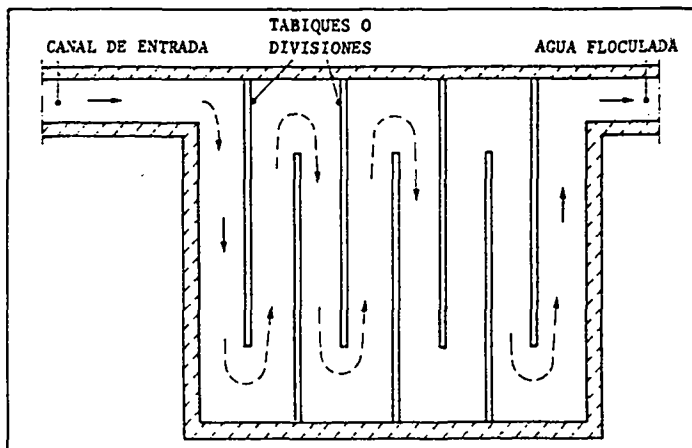


Figura 13.8  
 Floculador de tabiques de flujo horizontal (plano)



Este tipo de floculador se adapta bien a plantas de tratamiento muy pequeñas. Sin embargo, la eficiencia depende mucho de la profundidad del agua en los canales.

Los floculadores de flujo vertical a través de canales conformados con tabiques (Figura 13.9) son usados mayormente para plantas de tratamiento de tamaño medio y grande. La escala de velocidad del flujo de agua es de 0.1-0.2 m/seg. El tiempo de retención es de 10-20 minutos. Se requieren instalaciones para la limpieza debido a los depósitos que se producen en el floculador.

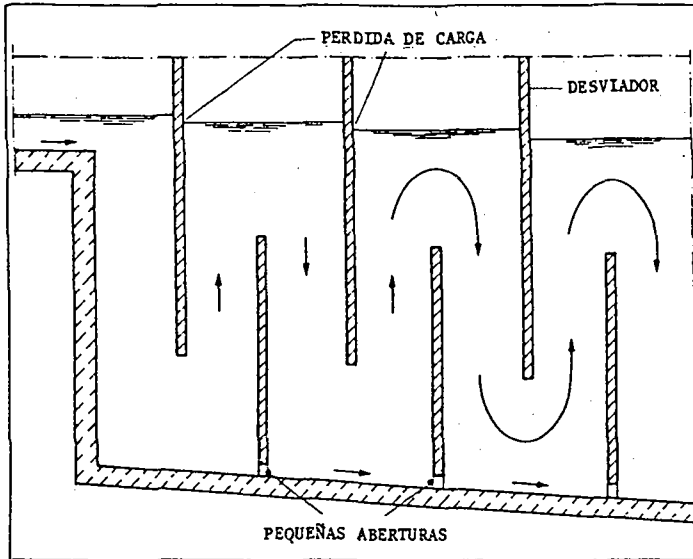


Figura 13.9  
Floculador de flujo vertical (corte transversal)

#### Floculadores tipo "Alabama"

Los floculadores tipo "Alabama" son hidráulicos y tienen cámaras separadas colocadas en serie a través de las cuales fluye el agua en dos direcciones (Figura 13.10). El agua fluye de una cámara a la siguiente, ingresando al fondo de cada división adyacente a través de orificios de salida dirigidos hacia arriba. Este tipo de floculador se desarrolló inicialmente y se le usó en el estado de Alabama (E.U.A.) y posteriormente se le introdujo en América Latina.

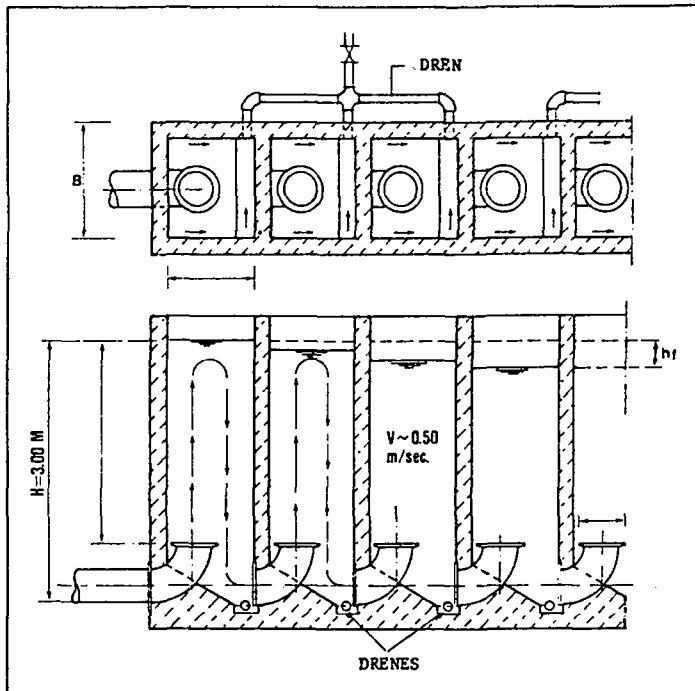


Figura 13.10  
Floculador tipo "Alabama"

Para una floculación efectiva en cada cámara, se deben colocar los orificios de salida a una profundidad de aproximadamente 2.50 m por debajo del nivel de agua.

Los criterios normales de diseño son:

Caudal unitario estimado por cámara:	25 a 50 litros/seg por metro cuadrado
Velocidad en cada etapa	0.40 a 0.60 m/seg
Longitud de la cámara (L)	0.75 - 1.50 m
Ancho (B)	0.50 - 1.25 m
Profundidad (H)	2.50 a 3.50 m
Tiempo de retención (t)	15 a 25 minutos

Normalmente la pérdida de carga en este tipo de floculador es aproximadamente de 0.35 a 0.50 m para toda la unidad. Por lo general el gradiente de velocidad se encuentra en la escala de  $40-50 \text{ seg}^{-1}$ .

El Cuadro 13.2 ofrece una guía práctica para el diseño de un floculador tipo "Alabama".

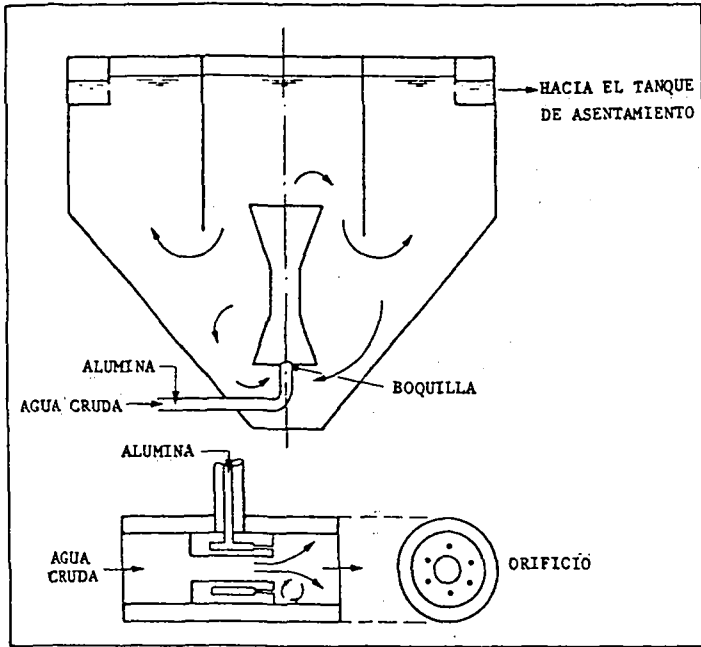


Figura 13.11  
 Floculador hidráulico de chorro

Cuadro 13.2  
 Guía para el diseño del floculador tipo "Alabama"

Escala de flujo Q  1/seg	Ancho B  (m)	Longitud L  (m)	Diámetro D  (mm)	Area de cada cámara  (m <sup>2</sup> )	Volumen de cada cámara  (m <sup>3</sup> )
10	0.60	0.60	150	0.35	1.1
20	0.60	0.75	250	0.45	1.3
30	0.70	0.85	300	0.6	1.8
40	0.80	1.00	350	0.8	2.4
50	0.90	1.10	350	1.0	3.0
60	1.00	1.20	400	1.2	3.6
70	1.05	1.35	450	1.4	4.2
80	1.15	1.40	450	1.6	4.8
90	1.20	1.50	500	1.8	5.4
100	1.25	1.60	500	2.0	6.0

Ejemplo

Flujo Q = 1.2 m<sup>3</sup>/minuto. Tiempo de retención = 15 minutos. Tamaño de la tubería curvada: 250 mm (10"). Medidas de cada cámara 0.60 x 0.75 m<sup>2</sup>. Volumen de cada cámara: 1.3 m<sup>3</sup>. Volumen total requerido: 15 x 1.2 = 18 m<sup>3</sup>. Número de cámaras 18/1.3 = 14.

Floculador y mezclador hidráulico de chorro

En un floculador de chorros, el coagulante (alúmina) es inyectado en el agua cruda usando un dispositivo especial de orificio. Entonces se echa agua en un cilindro en forma de embudo colocado sobre la boquilla. La acción resultante de la elevación del chorro proporciona una suave agitación al agua para la formación de flóculos, y parte de los flóculos formados se reciclan (Figura 13.11). A través de estas dos acciones, en combinación, se puede alcanzar excelentes resultados de floculación.

## COAGULACION Y FLOCULACION

Arboleda, J.

TEORIA, DISEÑO Y CONTROL DE LOS PROCESOS DE CLARIFICACION DEL AGUA  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente  
Lima, 1977

A.W.W.A.

WATER TREATMENT PLANT DESIGN

Am. Water Works Assoc., Nueva York, 1969

Azevedo Netto, J.M. et al

TECNICA DE ABASTECIMIENTO E TRATAMIENTO DE AGUA

Vol. 2 (2nd Edition), CETESB, Sao Paulo, 1977

Camp, T.R.

FLOCCULATION AND FLOCCULATION BASINS

Trans Am. Soc. Civil Engineers, 1955, 120, pp. 1-16

Cox, C.R.

OPERATION AND CONTROL OF WATER TREATMENT PROCESSES

World Health Organization, Ginebra, 1964

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.

WATER AND WASTEWATER ENGINEERING

Vol. 2; Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal,  
John Wiley & Sons, Nueva York, 1968

Gomella, C.; Guerrée, H.

LA TRAITEMENT DES EAUX DE DISTRIBUTION

Editions Eyrolles, Paris, 1973

Hudson, H.E.; Wolfner, J.P.

DESIGN OF MIXING AND FLOCCULATING BASINS

En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 59 (1967) No. 10, pp. 1257-1267

O'Melia, C.R.

A REVIEW OF THE COAGULANT PROCESS

En: Journal of Public Works, No. 3, 1969

Singley, J.E.

STATE-OF-THE-ART OF COAGULATION

OPS Simposio sobre Métodos Modernos de Tratamiento de Agua  
Asunción (Paraguay), Agosto, 1972

Singley, J.E.; Maulding, J.S.; Harris, H.R.

FERRIC SULFATE AS A COAGULANT

Coagulation Symposium, Part III

En: Water Works and Wastes Engineering, Vol. 52 (1965) No. 2

## 14. SEDIMENTACION

### 14.1 INTRODUCCION

La sedimentación es el asentamiento y remoción de partículas suspendidas que ocurre cuando el agua se estanca, se detiene o fluye lentamente a través de un estanque. Debido a la poca velocidad de flujo, por lo general no habrá turbulencia o será insignificante, y se permitirá el asentamiento de partículas que tengan una densidad de masa (peso específico) mayor que la del agua. En última instancia estas partículas serán depositadas en el fondo del tanque formando una capa de lodo. El agua que llegue al orificio de salida del tanque se presentará en condición clarificada.

La sedimentación se produce en cualquier estanque. Los estanques de almacenamiento a través de los cuales el agua fluye muy lentamente, son particularmente efectivos pero no siempre se hallan disponibles. En plantas de tratamiento de agua, se usa ampliamente tanques de sedimentación especialmente diseñados para la sedimentación. El diseño más común provee un flujo horizontal del agua a través del tanque, pero también hay diseños para el flujo vertical\* o radial. Para plantas pequeñas de tratamiento de agua, los tanques rectangulares de flujo horizontal por lo general son simples de construir y adecuados.

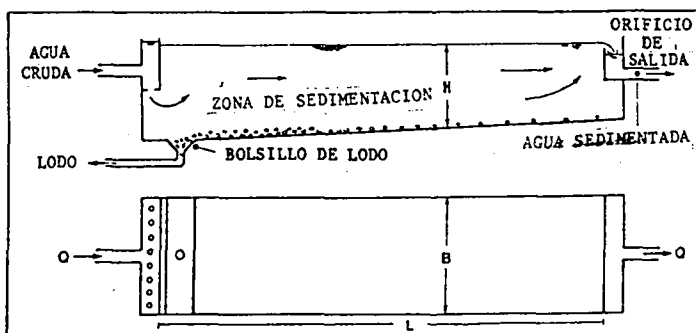


Figura 14.1

Tanque de sedimentación rectangular de flujo horizontal

La eficiencia del proceso de sedimentación se reducirá mucho, si existe turbulencia o circulación cruzada en el tanque. Para evitar esto, el agua cruda debe ingresar al tanque de sedimentación a través de una estructura

\* Los requerimientos de operación de los tanques de sedimentación de flujo vertical del tipo de manto de lodos, son tan estrictos que por lo general no son aptos para plantas pequeñas de tratamiento de agua.

separada de ingreso. Aquí se debe dividir el agua en forma pareja sobre todo el ancho y profundidad del tanque. En forma similar, en el extremo del tanque se requiere una estructura de salida para recolectar el agua clarificada en forma pareja. El material asentado formará una capa de lodo en el fondo del tanque. Los tanques de sedimentación necesitan ser limpiados regularmente. Se puede drenar o remover el lodo de otra manera. Para la limpieza manual (por ejemplo, raspando) se debe primero drenar el tanque.

#### 14.2 DISEÑO DE TANQUES DE SEDIMENTACION

Se puede determinar la eficiencia de un tanque de sedimentación en cuanto a la remoción de partículas suspendidas usando como base la velocidad de sedimentación ( $s$ ) de una partícula, la cual en el tiempo de retención ( $t$ ) atravesará sólo toda la profundidad ( $H$ ) del tanque. Usando estas anotaciones (véase Figura 14.1) la siguiente fórmula es aplicable:

$$s_0 = \frac{H}{T} ; T = \frac{BLH}{Q}, \text{ de modo que } s_0 = \frac{Q}{BL} \text{ (m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hr} = \text{m/hr)}$$

$s_0$  = velocidad de sedimentación (m/hr)

$T$  = tiempo de retención (hr)

$Q$  = caudal (m<sup>3</sup>/hr)

$M$  = profundidad del tanque (m)

$B$  = ancho del tanque (m)

$L$  = longitud (m)

Si suponemos una distribución pareja de todas las partículas suspendidas en el agua en toda la profundidad del tanque (por medio de una estructura de ingreso ideal), las partículas que tengan una velocidad de sedimentación ( $s$ ) mayor a  $s_0$  serán removidas completamente, y las partículas que se asienten con mayor lentitud que  $s_0$  serán removidas en una parte proporcional  $s : s_0$ .

Este análisis muestra que la eficiencia de asentamiento básicamente depende sólo de la relación entre el caudal de entrada y el área de superficie del tanque. A esto se le conoce como "carga de superficie", y es independiente de la profundidad del tanque. En principio, no hay diferencia en la eficiencia de sedimentación entre un tanque poco profundo y uno profundo.

Por consiguiente, se puede mejorar en mucho la eficiencia de sedimentación de un tanque, como se muestra en la Figura 14.11, mediante la instalación de un fondo extra, como se indica en la Figura 14.2. Se aumentará grandemente el área efectiva de superficie y la carga de superficie será mucho menor.

El diseño de un tanque de sedimentación debe basarse adecuadamente en un análisis de las velocidades de sedimentación de las partículas sedimentables en el agua cruda (véase Anexo 3).

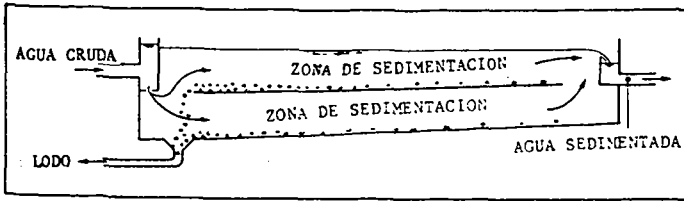


Figura 14.2  
Tanque de sedimentación con fondo extra

En lugares en donde se usa la sedimentación sin un pretratamiento (a esto se le llama "sedimentación simple") para la clarificación del agua de río, la carga de superficie por lo general debe estar en la escala de 0.1-1 m/hora. Para tanques de sedimentación que reciben agua que ha sido tratada mediante coagulación química o floculación, es posible una carga mayor, en algún punto entre 1 y 3 m/hora. En ambos casos, cuanto menor sea la carga de superficie, mejor será la clarificación del agua: el agua sedimentada tendrá menos turbiedad.

Las consideraciones anteriores ignoran los efectos de turbulencia, de cortocircuitos y de socavación del fondo. Para mantener estos efectos al mínimo, el tanque no debe tener poca profundidad, por lo menos 2 m de profundidad o más y la relación entre la longitud y el ancho debe estar entre 3 y 8. La velocidad horizontal de flujo, calculada como  $v_0 = Q/BH$ , estará entonces en la escala de 4 a 36 m/hora. Un tanque de 2 m de profundidad o más podría acomodar un equipo mecánico de remoción de lodo, pero es mejor limpiar las instalaciones pequeñas manualmente. Esto se hace a intervalos que varían de una a varias semanas. La profundidad del tanque debe ser adecuada para acomodar el lodo que se acumula en el fondo entre las limpiezas.

Para una elaboración más amplia de un diseño de tanque de sedimentación, tomamos el ejemplo de un pueblo con una población futura de 10,000 habitantes, que requiere un promedio de 40 litros/día por persona. suponiendo una demanda diaria máxima de 1.2 veces la demanda promedio, la capacidad de diseño debe ser:

$$Q = 10,000 \times \frac{40}{1,000} \times 1.2 = 480 \text{ m}^3/\text{día} = 20 \text{ m}^3/\text{hora}$$

Si la fuente de agua cruda es agua turbia de río, puede estar sujeta a una sedimentación simple como primer tratamiento. Se debe construir dos tanques de sedimentación. Si el segundo tanque sirve sólo como reserva para cuando el primer tanque está fuera de operación, entonces se debe diseñar cada uno de los dos tanques para que contengan el flujo completo de diseño ( $Q = 20 \text{ m}^3/\text{hora}$ ). Una alternativa es proveer dos tanques, cada uno con una capacidad de  $10 \text{ m}^3/\text{hora}$ ; esto proporcionará un ahorro en los costos de construcción. Estando uno de estos tanques fuera de operación para limpieza, el otro tiene que ser sobrecargado mientras dure la operación. En muchas situaciones esto puede ser bastante aceptable. En cada caso individual se debe decidir si se debe seguir este enfoque.



Si la experiencia con otras instalaciones que utilizan la misma fuerza de agua indica que una carga de superficie de 0.5 m/hora proporciona resultados satisfactorios, la determinación del tamaño para una capacidad de diseño de 20 m<sup>3</sup>/hora sería como sigue:

$$\frac{Q}{BL} = \frac{20}{BL} = 0.5 \text{ de tal forma que } BL = 40 \text{ m}^2$$

Las dimensiones del tanque podrían ser, por ejemplo:

$$B = 3 \text{ m, } L = 14 \text{ m}$$

Con una profundidad de 2 m, el tanque tendría aproximadamente 0.5 m disponibles para ser llenados con depósitos de lodo antes de que se necesite su limpieza. La velocidad de flujo horizontal sería:

$$v = \frac{Q}{BH} = \frac{20}{(3)(1.5)} = 4.44 \text{ m/hora}$$

Esto es correcto dentro de los límites de diseño que se citó anteriormente. Suponiendo que durante períodos de turbiedad elevada el agua de río contiene una carga suspendida de 120 mg/litro, la que se va a reducir a 10 mg/l mediante sedimentación, entonces se retendrá 110 gramos de lodo de cada metro cúbico de agua clarificada. Con una carga de superficie de 0.5 m/hora, esto significa una acumulación promedio de lodo de 55 gramos/m<sup>2</sup>/hora; es decir, para el lodo que tiene un contenido de materia seca del 3% una cantidad de 55: 0.03 = 1,830 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> por hora = 1.83 mm/hora. Los depósitos se acumularán con mayor rapidez en el extremo de ingreso del tanque, probablemente en cantidad aproximada de 4 mm/hora, de tal forma que para una acumulación permisible de 0.5 m, se espera un intervalo de 125 horas ó 5 días entre las limpiezas. Esto es ciertamente aceptable cuando los períodos de turbiedad elevada no son frecuentes y son de corta duración.

### 14.3 CONSTRUCCION

Normalmente los tanques de sedimentación con paredes verticales son contruidos de mampostería o concreto; los estanques de almacenamiento excavados en su mayoría tienen bancos inclinados de suelo compactado con un revestimiento de protección, si fuera necesario.

Por lo general, los tanques de sedimentación de tamaño medio y grande tienen un plano rectangular y una sección transversal. Para facilitar la remoción del lodo es conveniente tener el fondo del tanque ligeramente inclinado hacia el orificio de entrada, donde está situado la tolva de lodo.

Como se describió en la sección 14.1, un tanque de sedimentación debe tener un arreglo separado de entrada que asegure una distribución pareja del agua a todo lo ancho y en toda la profundidad del tanque. Se puede usar muchos diseños, la Figura 14.3 muestra unos cuantos ejemplos. El arreglo que se muestra a la izquierda consiste en un canal, sobre todo el ancho del tanque, con un gran número de aberturas pequeñas en el fondo a través de las cuales el agua ingresa a la zona de asentamiento. Para una distribución uniforme del afluente, estas aberturas deben estar una cerca a la otra, con una separación de menos de 0.5 m, y su diámetro no debe ser demasiado pequeño (por ejemplo, 3-5 cm) de lo contrario pueden atorarse. El canal debe tener un tamaño considerable, con un área transversal de por lo menos dos veces el área combinada de las aberturas. Un tanque de asentamiento como el elaborado en el ejemplo proporcionado anteriormente con una capacidad de 20 m<sup>3</sup>/hora y un ancho de 3 m, tendría aproximadamente 6 huecos de 4 cm de diámetro en el canal de entrada. El mismo canal de entrada estaría aproximadamente a 0.4 m de profundidad y tendría 0.3 de ancho.

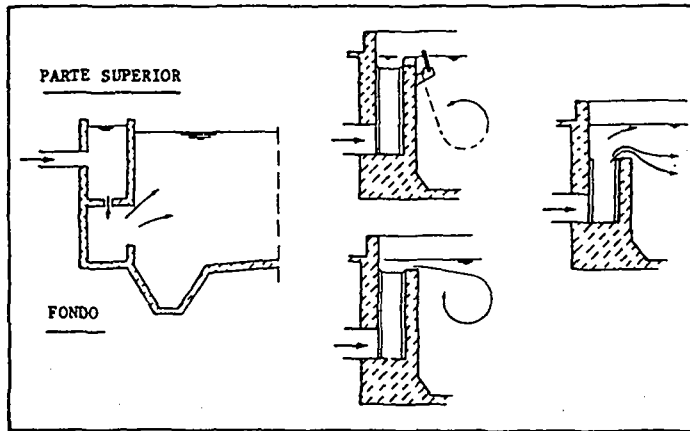


Figura 14.3  
Arreglos de entrada

Frecuentemente, el agua efluente sale del tanque hacia vertederos. Algunas veces un solo vertedero es adecuado pero para evitar que el material sedimentado sea recogido nuevamente, la extracción del agua debe ser siempre moderada y puede que se tenga que proveer más vertederos (longitud combinada nB). Se puede usar la siguiente fórmula para calcular la longitud total de vertedero requerida:

$$nB = \frac{Q}{5 Hs_0}$$

En el ejemplo de la sección anterior:

$$(n)(3) = \frac{20}{(5)(1.5)(0.5)} \text{ ó } n = 2$$

En la Figura 14.4 se muestra arreglos de salida que usan uno o más vertederos de derrame.

Cuando se usa escalas bajas de derrame en vertederos, es importante la colocación horizontal de la cresta del vertedero. En el ejemplo anterior la escala de derrame de  $5 \text{ m}^3/\text{hora}$  daría una altura de derrame  $\Delta$  de sólo 8 mm. Una ligera desviación de la cresta del vertedero del horizontal causaría entonces una extracción muy dispareja del agua asentada. Para evitar esto en lo posible, la cresta del vertedero puede estar hecha de una faja especial de metal ajustada con pernos a la pared de concreto del vertedero. La parte superior de esta faja no es derecha; tiene entalladuras triangulares a intervalos (Figura 14.5). Hacia la izquierda, en la Figura 14.4 se muestra otra solución. Se utiliza aberturas en la pared del tanque de sedimentación, las cuales, deben tener un diámetro menor que el de la construcción similar de entrada. Para  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{hora}$ , serían adecuadas 6 aberturas de 2.5 cm de diámetro. Si el contenido de materia suspendida del agua efluente es baja, es poco el peligro de que se atoren los huecos y no se necesitará la limpieza con frecuencia.

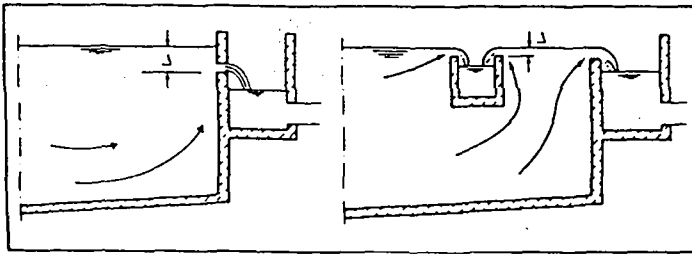


Figura 14.4  
Arreglos de salida

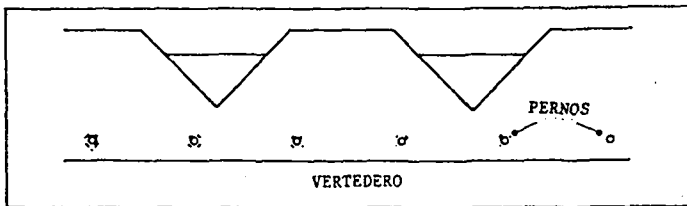


Figura 14.5  
Vertedero de derrame con entalladuras

Anteriormente se mencionó que también se puede construir tanques pequeños de sedimentación simplemente como un depósito con paredes verticales de apilamiento de placas de madera, o con material similar, (Figura 14.6) o con paredes inclinadas (Figura 14.7). En este último caso, sólo se debe tener en cuenta la mitad de la longitud de la inclinación húmeda cuando se calcule el área efectiva de superficie y, por ende, la carga de superficie del depósito de asentamiento. En ambos casos se debe construir el depósito en suelo elevado para prevenir su inundación durante períodos lluviosos.

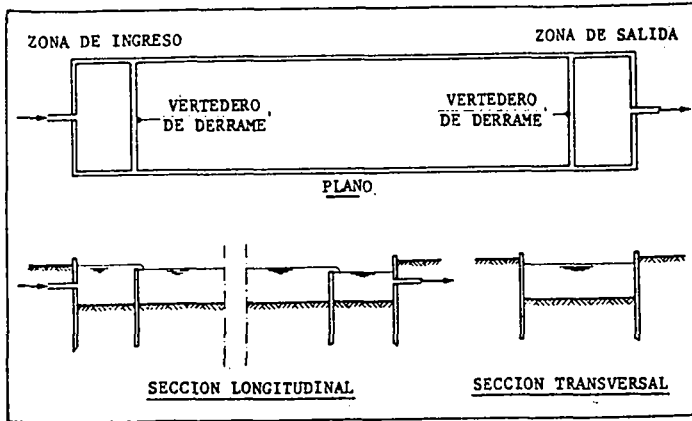


Figura 14.6  
 Depósito de sedimentación construido con pilas de placas de madera

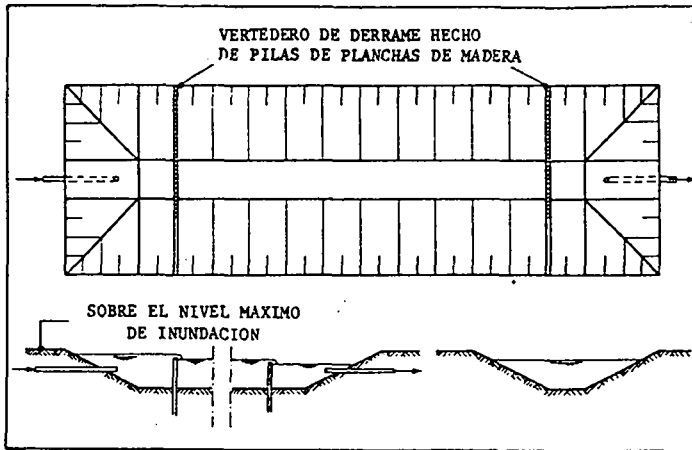


Figura 14.7  
 Depósito excavado usando como tanque de asentamiento

#### 14.4 PLACA INCLINADA Y SEDIMENTADORES DE TUBO

La mejora en la eficiencia de asentamiento que se puede obtener mediante la instalación de un fondo extra (bandeja) en un tanque de asentamiento puede ser incrementada en mucho usando más bandejas como se muestra en la Figura 14.8. Si el espacio entre dichas bandejas es pequeño, no es posible remover los depósitos de lodo manualmente con raspadores. La limpieza hidráulica

mediante el lavado a chorro sería factible, pero una solución mejor es el uso de placas con limpieza propia. Esto se logra colocando las placas de modo empujado en un ángulo de 40 a 60° con la línea horizontal. El ángulo más adecuado depende de las características del lodo las cuales variarán para los diferentes tipos de agua cruda. A estas instalaciones se les llama tanque de sedimentación con placa inclinada. En la Figura 14.9 se muestra este tipo de tanque de manera esquemática. La Figura 14.10 muestra un corte transversal.

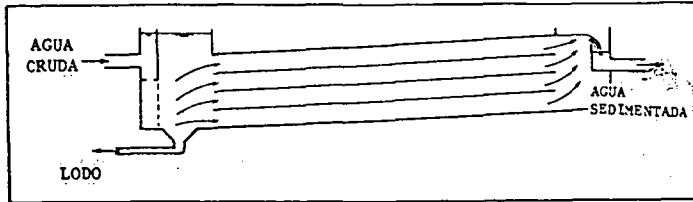


Figura 14.8  
Tanque de sedimentación con placas múltiples

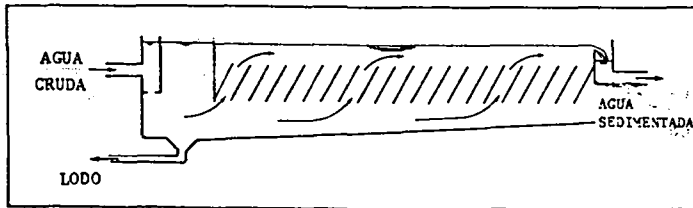


Figura 14.9  
Tanque de sedimentación con placas inclinadas

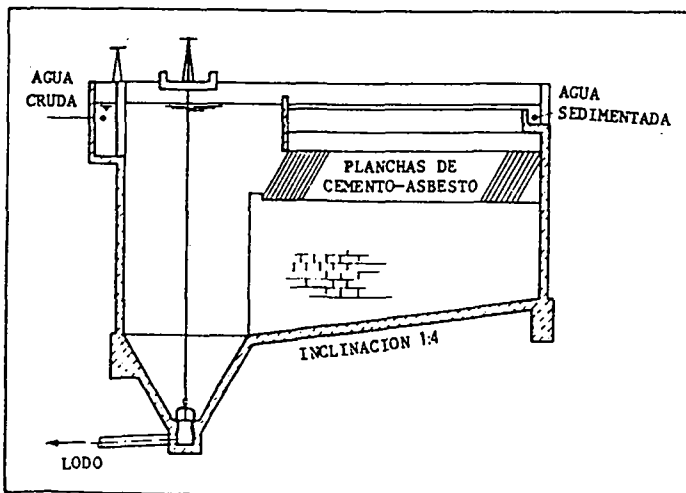


Figura 14.10  
Tanque de sedimentación con placas inclinadas

Para tanques más grandes se ha ideado sistemas de placas o bandejas bastante sofisticados, pero en instalaciones pequeñas con frecuencia lo más adecuado son las placas planas o corrugadas y un flujo ascendente del agua. Para cualquier tarea de clarificación, los tanques de sedimentación con placas inclinadas tienen la ventaja de almacenar una mayor capacidad de un volumen pequeño. Si la superficie efectiva es grande, la carga de superficie será baja y, por lo tanto, la eficiencia de la sedimentación será elevada. Se puede calcular la carga de superficie de la siguiente manera:

$$s = \frac{Q}{nA}$$

s = carga de superficie (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hora)

Q = escala de flujo (m<sup>3</sup>/hora)

A = área de fondo del tanque (m<sup>2</sup>)

n = factor de multiplicación dependiendo del tipo y posición de las placas inclinadas.

El agua ingresa al fondo del tanque de sedimentación, fluye hacia arriba, pasa por las placas inclinadas y se recolecta en arquetas (Figura 14.11). Cuando el agua fluye hacia arriba y pasa por las placas, las partículas asentables caen sobre éstas. Cuando las golpean se resbalan hacia abajo, cayendo eventualmente al área por debajo de las placas. Una partícula individual puede ingresar a los canales de la placa varias veces antes de que se aglomere y adquiera un peso suficiente para que eventualmente se asiente en el piso del tanque.

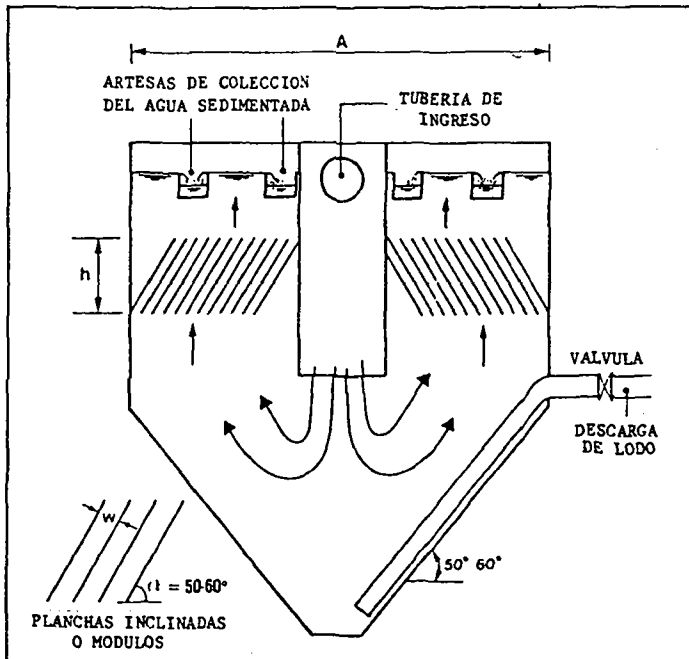


Figura 14.11  
Parámetros de diseño del tanque de sedimentación con placa inclinada

Suponiendo que  $h = 1.5 \text{ m}$ ,  $w = 0.05 \text{ m}$ ,  $\alpha = 55^\circ$  y que las placas hechas de cemento-asbesto tengan un grosor de  $6 \text{ mm}$ , encontramos que  $n = 16'$  Se debe tener en cuenta que los depósitos de lodo por unidad de área de fondo también serán 16 veces mayores, para la misma escala de flujo afluyente. Es probable que la remoción manual del lodo no sea práctica. En un tanque que tiene un plano cuadrado, se puede usar raspadores giratorios de lodo. Otra posibilidad es el uso de tanques de fondo de tolva con inclinación en las paredes de aproximadamente  $50^\circ$  con la horizontal. La profundidad de dicho tanque será considerable y es probable que los costos de construcción sean mucho mayores que para los tanques de fondo plano. La descarga de lodo es extraída a través del drenaje de agua desde la sección de tolva del tanque (a esto se le llama "afloramiento").

En lugar de bandejas inclinadas se puede usar tubos puestos uno al lado del otro. Esa instalación se puede hacer fácilmente de tubos de PVC, por lo general de 3-5 cm de diámetro interno y una inclinación aproximada de  $60^\circ$  con la horizontal. Para instalaciones más grandes pueden tener valor los modelos de tubos disponibles comercialmente. En la Figura 14.12 se muestra un ejemplo. Hay muchos otros diseños que pueden proporcionar una eficiencia de asentamiento igualmente buena.

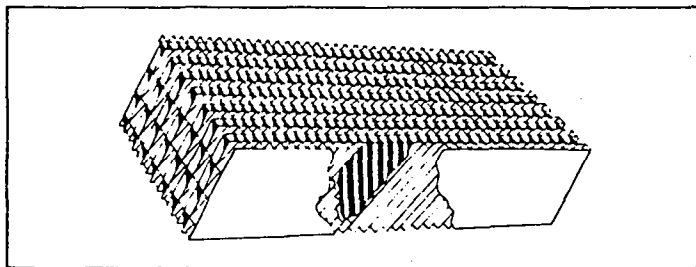


Figura 14.12  
Módulo para un sedimentador de tubos

En un tubo de 5 cm de diámetro, la mayor distancia a la que se debe asentar cualquier partícula es desde la parte superior del tubo hasta el fondo. Si la escala de asentamiento de la partícula es de  $2.5 \text{ cm/minuto}$ , sólo le tomará a ésta dos minutos el llegar al fondo. Por el contrario, si la misma partícula fuera a asentarse en un tanque de 3 m de profundidad, le tomaría 120 minutos (2 horas) caer al fondo del tanque. Comúnmente, los módulos de tubos tienen aproximadamente 76 cm de ancho, 3 m de largo y 54 cm de profundidad. Debido a que los tubos están en un ángulo de  $60^\circ$ , la longitud efectiva del tubo es de 61 cm.

Los módulos de tubos pueden ser construidos de placas planas de plástico ABS, estando las vías de paso formadas de placas de PVC. Las vías de paso son inclinadas en forma cruzada para la fuerza estructural de tal forma que el módulo necesita apoyo únicamente en su extremo. Si estos módulos son de plástico se les puede recortar fácilmente para adaptarse al espacio disponible en un tanque de sedimentación.

La superficie efectiva de sedimentación es muy grande y, por lo tanto, la "carga de superficie" (escala de derrame) es muy baja. Para ilustrar esto: una escala de flujo de  $2 \text{ m}^3/\text{hora}$  a través de un depósito de sedimentación de  $0.1 \text{ m}^2$  de superficie representa una "carga de superficie" de  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$ . Si se usa veinte hileras de tubos, la carga de superficie será reducida a  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$ . El tiempo de retención del agua en cada tubo será sólo de unos pocos minutos.

La posibilidad de aumentar la eficiencia de un tanque a través de la instalación de placas inclinadas o tubos puede ser usada con gran ventaja para elevar la capacidad de los tanques de sedimentación existentes. En lugares en donde la profundidad disponible del tanque es pequeña, inferior a  $2 \text{ m}$ , es probable que la instalación de placas inclinadas o tuberías encuentre problemas. En tanques más profundos puede ser muy ventajosa.

Al considerar la expansión de instalaciones existentes mediante la adición de placas inclinadas o tubos, es importante recordar que se generará más lodo y, por esto, puede ser que se requiera instalaciones adicionales de remoción. También se tiene que revisar los tamaños de las tuberías de entrada y salida y la capacidad del vertedero para ver si pueden soportar la carga aumentada.



SEDIMENTACION

Babbitt, H.E.; Doland, J.J.; Cleasby, J.L.  
WATER SUPPLY ENGINEERING  
McGraw-Hill, Nueva York, 1962 (6th Edition)

Camp, T.R.  
SEDIMENTATION AND THE DESIGN OF SETTLING TANKS  
En: Trans. ASCE, 1946, No. 3, pp. 895-903

Culp, A.M.; Kou-Ying Hsiung, Conley, W.R.  
TUBE CLARIFICATION PROCESS: operating experiences  
En: Proc. Am. Soc. Civil Eng. Vol. 95 (1969) SA octubre 5, pp. 829-836

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.  
WATER AND WASTEWATER ENGINEERING  
Vol. 2, Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal,  
John Wiley & Sons, Nueva York, 1968

Hanzen, A.  
ON SEDIMENTATION  
En: Trans. Am. Soc. Civil Eng., 1904, No. 53, pp. 45-51

## 15. FILTRACION LENTA EN ARENA

### 15.1 INTRODUCCION

La filtración es el proceso mediante el cual se purifica el agua haciéndola pasar a través de un material poroso (o "medio"). En la filtración lenta en arena se usa un lecho de arena fina a través del cual el agua se cuela lentamente hacia abajo (Figura 15.1). Debido al tamaño del grano fino, los poros del lecho de filtro son pequeños. La materia suspendida presente en el agua cruda es retenida mayormente en los 0.5-2 cm superiores del lecho de filtro. Esto permite la limpieza del filtro raspando la capa superior de arena. Como se usa tasas bajas de filtración ( $0.1 - 0.3 \text{ m/hora} = 2 - 7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ ) el intervalo entre dos limpiezas sucesivas será bastante largo, usualmente varios meses. La operación de limpieza del filtro no necesita tomar más de un día, pero después de la limpieza se requiere uno o dos días más para que el lecho de filtro sea nuevamente completamente efectivo.

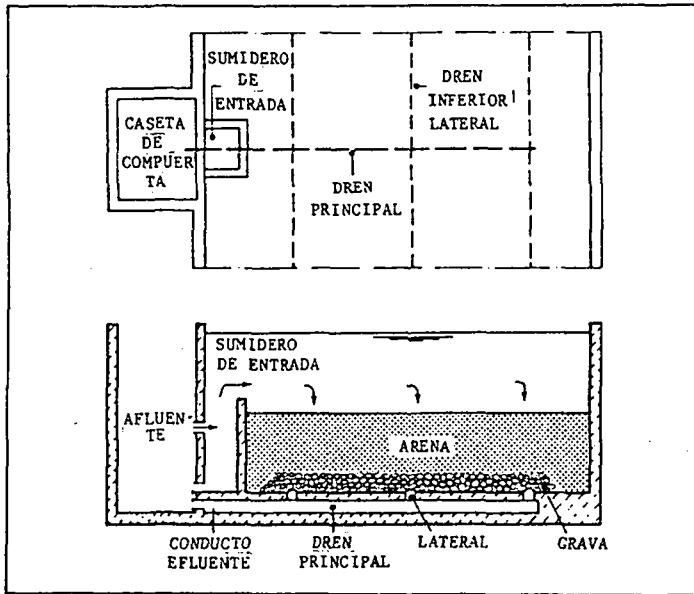


Figura 15.1  
Filtro lento de arena

El propósito principal de la filtración lenta en arena es la remoción de organismos patógenos del agua cruda, en particular las bacterias y los virus responsables de la transmisión de enfermedades relacionadas en el agua. La

filtración lenta en arena es altamente eficiente en este respecto y es capaz de reducir el contenido total de bacterias en un factor de 1,000 a 10,000 y el contenido de E. coli en un factor de 100-1,000. Un filtro lento de arena bien operado removerá los protozoos tales como Entameba histolítica y lombrices tales como esquistosoma hematobium y Ascarasis lumbricoides. Cuando se procesa agua cruda que está sólo ligeramente contaminada, los filtros lentos de arena producirán agua bacteriológicamente segura. Normalmente el E. coli estará ausente en una muestra de 100 ml del agua filtrada, lo que satisface los patrones normales del agua de bebida.

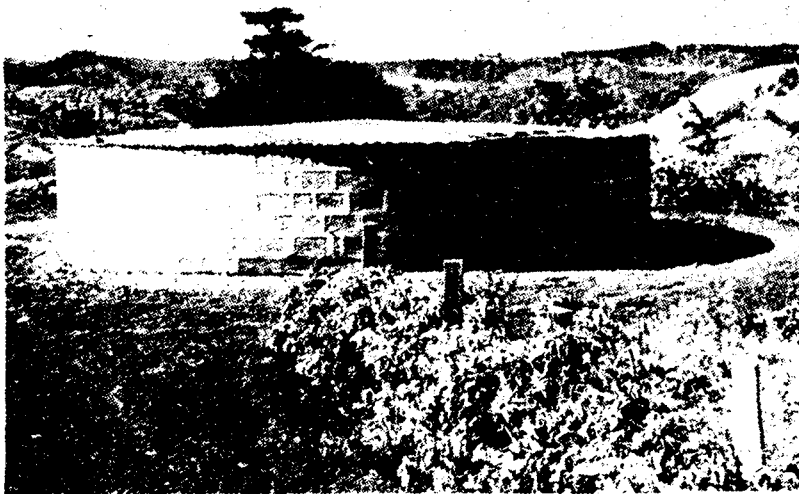


Foto: IRC

Figura 15.2

Filtro lento de arena - tipo circular (Pakistán)

Los filtros lentos de arena también son muy efectivos en la remoción de materia suspendida del agua cruda. Sin embargo, el atoro del lecho de filtro puede ser demasiado rápido y necesitará limpieza frecuente. La operación libre de problemas sólo es posible cuando la turbiedad promedio del agua cruda es inferior a 5 UTF, con valores máximos debajo de los 20 UTF y cuando ocurre por períodos de unos pocos días únicamente. Cuando este no es el caso, se debe reducir la carga suspendida en el agua cruda mediante un proceso de pretratamiento tal como sedimentación, coagulación y floculación o filtración rápida, antes de admitir el agua en el filtro lento de arena. En los reservorios de almacenamiento se extraerá las partículas suspendidas mediante el asentamiento pero aún podría producirse un bloqueo rápido del lecho del filtro lento de arena cuando ocurra un crecimiento considerable de las algas. Entonces, será necesario el pretratamiento.

Los filtros lentos de arena tienen muchas ventajas para su uso en países en desarrollo. Producen agua clara, libre de impurezas suspendidas e higiénicamente segura. Se les puede construir con materiales locales usando

conocimientos y labor local. Se puede evitar gran parte del complejo equipo mecánico y eléctrico requerido para la mayoría de otros procesos de tratamiento del agua. Los filtros lentos de arena no requieren para su operación, sustancias químicas coagulantes, cal o cloro que frecuentemente necesitan ser importadas. Es cierto que ocupan más terreno y que su limpieza requiere una amplia labor, pero particularmente en áreas rurales de países en desarrollo, estos requerimientos por lo general no deben ser impedimentos.

## 15.2 TEORIA DE LA FILTRACION LENTA EN ARENA

En los filtros lentos de arena, se realiza la remoción de impurezas del agua cruda mediante una combinación de procesos diferentes tales como sedimentación, absorción, colado y, de mayor importancia, acciones bioquímicas y microbianas. El proceso de purificación se inicia en el agua sobrenadante, pero la parte principal de la remoción de impurezas del agua y los procesos microbianos y bioquímicos se realizan en la capa superior del lecho de filtro, el "Schmutzdecke"\*.

La colación remueve aquellas materias suspendidas que son demasiado grandes para pasar a través de los poros del lecho de filtro. Se realiza casi exclusivamente en la superficie del filtro donde las impurezas son retenidas en la capa superior. Esto mejorará la eficiencia del colado pero también aumentará la resistencia contra el flujo descendente del agua. Periódicamente se tiene que remover las impurezas acumuladas raspando la capa superior del lecho de filtro, de esta manera la carga de operación del lecho de filtro regresa a su valor original.

La sedimentación remueve sólidos finos suspendidos cuando estos son depositados en la superficie de los granos de arena del lecho de filtro. Para la arena fina, como se le usa normalmente en filtros lentos de arena, el área combinada de superficie de los granos es muy grande, aproximadamente 10,000 a 20,000 metros cuadrados por metro cúbico de arena de filtro. En combinación con la baja tasa de filtración, esto arroja una "carga de superficie" muy baja (como se describe en la Sección 14.2). Por lo tanto, la eficiencia de asentamiento será tan elevada que incluso se podrá remover completamente partículas muy pequeñas. Nuevamente, esta acción se realiza principalmente en la parte superior del lecho de filtro y sólo la materia orgánica de baja densidad de masa es llevada más abajo dentro del lecho. Los otros sólidos suspendidos, junto con las impurezas coloidales y disueltas, son removidos mediante absorción ya sea en la pegajosa capa gelatinosa que se forma alrededor de los granos del lecho de filtro o a través de la atracción física de masa y de la atracción electrostática.

\* La "corteza del filtro" o capa de material depositado que se forma en la parte superior de un filtro lento de arena.

La atracción electrostática es la más efectiva, pero ocurre sólo entre partículas que tienen cargas eléctricas opuestas. La arena limpia de cuarzo tiene una carga negativa y por lo tanto no puede absorber partículas de carga negativa tales como bacterias, materia coloidal de origen orgánico, aniones de nitrato, fosfato y compuestos químicos similares. Así, durante el período de maduración de un filtro lento de arena, sólo se absorbe partículas de carga positiva, tales como flóculos de carbonatos, hidróxido de aluminio y de hierro y cationes de hierro y manganeso. Sin embargo, la absorción de partículas de carga positiva continuará hasta una etapa en que ocurra la sobre-saturación. Entonces la carga general de los revestimientos de grano del lecho de filtro se invierte o se vuelve positiva, después de lo cual las partículas de carga negativa serán atraídas y retenidas. Después del período inicial de maduración, el lecho de filtro mostrará una serie variada y en constante modificación de revestimientos de grano cargados negativa y positivamente, los cuales son capaces de absorber la mayor parte de impurezas del agua que pasa.

La materia acumulada en los granos del filtro de arena no permanece sin cambio, es transformada mediante actividad bioquímica y bacteriana. Se convierte los compuestos ferrosos solubles y los compuestos manganosos en hidratos insolubles férricos y mangánicos que se convierten en parte del revestimiento alrededor de los granos de arena. La materia orgánica se oxida en parte, proporcionando la energía que necesita la bacteria para su metabolismo. Otra parte de la materia orgánica se transforma en material celular, el cual se utiliza para el desarrollo bacteriano. Por lo general, la cantidad de materia orgánica en el agua cruda es pequeña y proporciona alimento sólo para una población bacteriana limitada. Así, en forma simultánea con el crecimiento bacteriano que se mencionó anteriormente, habrá una eliminación de bacterias. Así se libera la materia orgánica. Esta es transportada por el flujo de agua y nuevamente consumida por otras bacterias a mayor profundidad en el lecho de filtro. De esta manera la materia orgánica degradable presente originalmente en el agua cruda es gradualmente descompuesta y transformada en compuestos orgánicos tales como dióxido de carbono, nitratos, sulfatos y fosfatos. Finalmente, se les descarga con el efluente del filtro.

Se debe remarcar que las acciones microbianas mencionadas anteriormente necesitan tiempo para establecerse. De aquí se necesita un período de tiempo suficiente. Durante este período, la bacteria del agua cruda es absorbida hacia los granos del lecho de filtro. Allí se multiplica usando la materia orgánica presente en el agua como alimento. El surgimiento de materia orgánica se realiza en muchas etapas, en cada una de las cuales está activa un tipo particular de bacteria.

Para que el proceso de filtración sea efectivo, es necesario que la bacteria se desarrolle y migre a las capas inferiores del lecho de filtro. Esto toma tiempo, y las variaciones en el ritmo de filtración deberían ser introducidas lentamente en un período de horas. En la práctica se ha descubierto que toda la actividad bacteriana se extiende a una profundidad

de aproximadamente 0.6 m del lecho de filtro de tal forma que el espesor efectivo del lecho no debe ser menor de 0.7 m. El espesor inicial del lecho de filtro debe ser de 0.3-0.5 m más para permitir un número de raspaduras del filtro antes de que sea necesario echas nueva arena.

El efecto más importante de purificación de un filtro lento de arena es la remoción de bacterias y virus. A través de la absorción u otros procesos, se remueve las bacterias del agua y se les retiene en la superficie de los granos del lecho de filtro. Para las bacterias intestinales, el lecho de filtro provee condiciones desfavorables debido a que por lo general el agua es más fría que su habitat natural y usualmente no contiene materia orgánica suficiente (de origen animal) para sus requerimientos vitales.

Más aún, en la parte superior del lecho de filtro abundan varios tipos de organismos predatorios que se alimentan de bacterias. A mayor profundidad en el lecho de filtro, la oxidación bioquímica ya habrá reducido la materia orgánica en tal grado que la bacteria habrá muerto por inanición. Los varios microorganismos en un filtro lento de arena producen compuestos químicos (antibióticos) y agentes microbianos que matan o, por lo menos, desactivan la bacteria intestinal. El efecto general es una reducción considerable del número de *E. coli* y, en vista de que los patógenos tienen menor probabilidad de sobrevivir que el *E. coli*, se obtiene una reducción aún mayor de su número. Cuando se trata el agua cruda, de calidad bacteriológica promedio, con filtros lentos de arena, usualmente no se encuentra el *E. coli* en muestras de 100 ml de agua filtrada.

Por lo general, se construye los filtros lentos de arena al descubierto. Puede ocurrir el crecimiento fotosintético de algas. Esto tiene algunas desventajas como se explicará en la sección 15.5, pero también promueve la eficiencia del filtro y ayuda a lograr una remoción mayor de materia orgánica y bacterias. Esto se realiza mediante la capa delgada límosa en la parte superior del lecho de filtro, que consiste en algas filiformes y otras numerosas formas de vida acuática, tales como plankton, diatomeas, protozoos y rotíferos. La capa de filtro es intensamente activa con los varios organismos que atrapa, digiere y en la descomposición de la materia orgánica del agua que pasa a través de ella. Las algas muertas del agua sobrenadante y las bacterias vivas del agua cruda son consumidas en forma similar en la capa de filtro, la materia inerte suspendida es colada.

### 15.3 PRINCIPIOS DE OPERACION

Básicamente un filtro lento de arena consiste en un tanque abierto en la parte superior y que contiene el lecho de arena. La profundidad del tanque es de aproximadamente 3 m y el área puede variar desde unas cuantas decenas a varios cientos de metros cuadrados. En el fondo del tanque se coloca un sistema de desagüe inferior ("el fondo del filtro") para apoyar al lecho de filtro. El lecho está compuesto de arena fina libre de arcilla y greda, por lo general no graduada, y con la menor cantidad posible de materia orgánica. Normalmente el lecho de filtro tiene un espesor de 1.0-1.2 m y el agua que se va a tratar (el agua sobrenadante) se encuentra a una profundidad de 1.0-1.5 m sobre el lecho de filtro.

El filtro lento de arena está provisto de un número de líneas de afluentes y efluentes que disponen de válvulas y dispositivos de control. Estos tienen la función de mantener constante tanto el nivel de agua cruda como la escala de filtración.

En la Figura 15.3 se muestra en forma separada todas las líneas de afluentes y efluentes para aclarar la ilustración; pero en la práctica están combinadas y colocadas juntas para ahorrar costos de construcción.

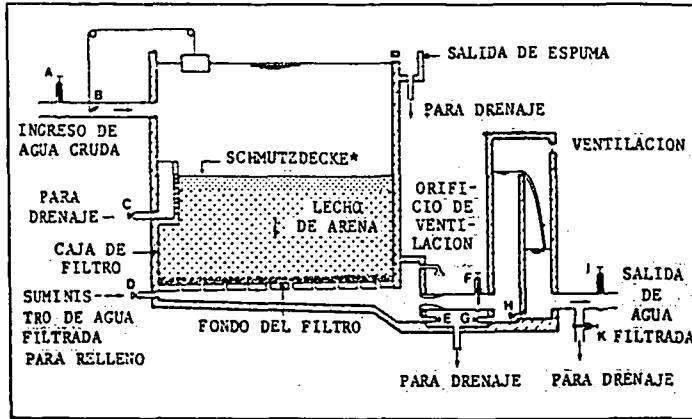


Figura 15.3  
Filtro lento de arena

Durante la operación, el agua cruda ingresa al tanque de filtro a través de la válvula A y pasa por la válvula B reguladora, controlada por flotador; el agua sobrenadante penetra en el lecho de filtro y se cuela hacia abajo hasta el sistema de desagüe inferior; entonces el agua filtrada pasa por un medidor de flujo y por la válvula reguladora P y fluye hacia la cámara de vertedero de salida; desde ahí el agua pasa a través de la válvula J y fluye hacia el pozo de agua clara. La válvula B mantiene el agua cruda en un nivel constante. Para obtener una tasa constante de filtración se tiene que abrir la válvula reguladora un poco cada día para compensar el incremento en la resistencia del lecho de filtro debido al atoro. Cuando varía la demanda de agua filtrada se ajusta lentamente la válvula F, por un período de varias horas, verificando la tasa de producción de agua mediante la lectura del medidor de flujo. El vertedero de salida evita que ocurran presiones insuficientes en el lecho de filtro y hace que la operación del filtro sea independiente de las variaciones del nivel del agua en el pozo de agua clara. El vertedero también aerea el agua, para lo cual la cámara del vertedero debe ser ventilada. La ventilación es requerida nuevamente para el mismo filtro para proveer el escape de gases que se liberan o producen durante la filtración. Para facilitar el escape de gases, el lado inferior

\* Cubierta

del fondo del filtro debe tener una inclinación de 1:500 hacia arriba en dirección al flujo. Para propósitos de drenaje (por ejemplo, cuando se realiza reparaciones) el piso del tanque-filtro debe tener una inclinación de 1:200 hacia abajo. Si se acumulan cantidades considerables de masa (por ejemplo algas flotantes) en la superficie del agua durante la filtración, resultan prácticos los orificios de salida de nata en las cuatro esquinas del filtro para la remoción regular de ésta.

Cuando después de un período de operación, se abre completamente la válvula reguladora F, un nuevo alimento en la resistencia del filtro resultará en una reducción de la tasa de filtración. La producción de agua filtrada caería por debajo de la escala requerida y se tendría que retirar de funcionamiento el filtro para su limpieza. La limpieza se realiza raspando la parte superior de 1.5 a 2 cm de arena sucia. Para esto primero se debe drenar el filtro a un nivel de agua aproximado, 0.2 m por debajo de la parte superior del lecho de arena. Para empezar la operación de limpieza, la válvula A está cerrada por lo general al final del día, mientras que el filtro continúa descargando agua en la forma normal a través de las válvulas F y J. A la mañana siguiente, se cierran las válvulas F y J y el agua sobrenadante restante es drenada a través de la válvula C. Este drenaje del filtro es controlado mediante una caja, una pared de la caja consiste en maderos de detención, los cuales forman un vertedero. Se mantiene la parte superior de este vertedero más o menos al nivel de la parte superior del lecho de filtro. El agua dentro de los poros en los 0.2 m superiores del lecho de arena es drenada abriendo la válvula E por un período corto de tiempo. Cuando se ha completado la operación de limpieza (véase Sección 15.6) se cierra la válvula C y se rellena lentamente el filtro con agua filtrada de abajo, a través de la válvula D, hasta un nivel de aproximadamente 0.1 m por encima de la parte superior del lecho de arena. Durante esta operación se debe tener cuidado en que se haya extraído todo el aire acumulado en los poros del lecho.

Después de esto, se permite el ingreso del agua cruda a través de la válvula A, cuidando de no dañar el lecho de filtro. Un arreglo efectivo consiste en ubicar la válvula A sobre la caja de descarga conectada a la válvula C. Cuando el agua cruda en el filtro ha alcanzado su nivel normal, determinado por la válvula reguladora B, se abre completamente la válvula K y la válvula reguladora F se abre justo lo necesario para que el filtro limpio opere a aproximadamente un cuarto de su ritmo normal de filtración.

Durante las 12 horas siguientes se eleva lentamente el ritmo de filtración a su nivel normal. Después de por lo menos 12 horas más, pero preferiblemente 36 horas, se cierra la válvula K y se abre la válvula J; el filtro ha vuelto a su operación normal. Cuando el filtro ha dejado de operar durante un período considerable de tiempo, por ejemplo, para ponerle arena nueva o para reparación, el período de maduración de 1 ó 2 días mencionado anteriormente debe ser ampliado en varios días más. Cuando el filtro está nuevo, el período de puesta a punto puede incluso tomar varias semanas. En el caso en que el filtro permanezca fuera de operación por mucho tiempo, se le debe drenar completamente usando las válvulas E, G y H.



El método de operación de un filtro lento de arena, como el descrito anteriormente, es autoprotectivo y proporciona resultados confiables pero la instalación es bastante compleja. Muchas simplificaciones son posibles. Cuando se mantiene constante el nivel de agua cruda en la parte superior del filtro, mediante la manipulación de la escala de abastecimiento de agua cruda, es posible hacerlo sin la válvula reguladora B operada por flotador. Se puede combinar las válvulas D y E y la función de la válvula H la puede cumplir la válvula K. Los orificios de salida de la nata no son necesarios particularmente para filtros pequeños, si se puede realizar la remoción de la nata manualmente. La Figura 15.4 muestra un ejemplo de un diseño simplificado que tiene un número mínimo de válvulas de control y sólo unas cuantas líneas de afluentes y efluentes.

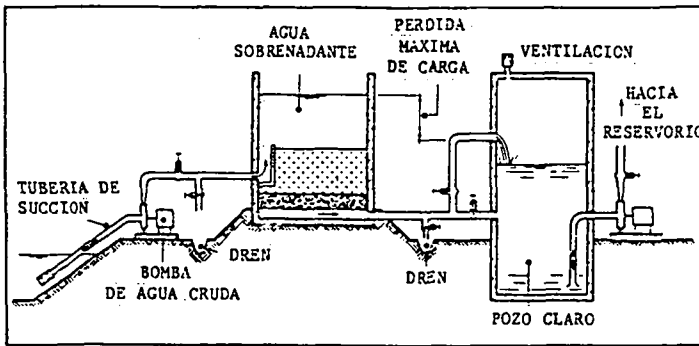


Figura 15.4  
Filtro lento de arena simplificado

#### 15.4 CONSIDERACION DE DISEÑO

Para el verdadero diseño de un filtro lento de arena se tiene que escoger cuatro dimensiones por anticipado: la profundidad del lecho de filtro, la distribución del tamaño del grano del material del filtro, el ritmo de filtración y la profundidad del agua sobrenadante. En lo posible, estos factores de diseño deben basarse en la experiencia obtenida con plantas existentes de tratamiento que usan la misma fuente de agua o agua de características similares. Cuando no se dispone de esa experiencia, el diseño debe basarse en resultados obtenidos con pruebas piloto realizadas con filtros experimentales (véase Anexo 3).

Cuando no se dispone de datos verdaderos o experimentales, se puede usar el siguiente procedimiento:

- a. Para el diseño inicial, se escoge el espesor del lecho entre 1.0-1.2 m. Esto es suficiente para permitir las raspaduras necesarias en el lecho de filtro antes de que se alcance el espesor mínimo de 0.7 m.

- b. Analizar la distribución del tamaño del grano de la arena disponible localmente y determinar el tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad (véase Figura 15.5). Seleccionar arena con un tamaño efectivo de aproximadamente 0.2 mm y un coeficiente de uniformidad inferior a 3. Cuando no se dispone de arena de esta naturaleza se puede aceptar un coeficiente de uniformidad de hasta 5 y un tamaño efectivo de arena que se encuentre entre 0.15 y 0.35 mm. A menudo la arena graduada para construcción satisface estos requerimientos. Algunas veces se utiliza cáscaras de arroz quemado de 0.3 a 1.0 mm.
- c. Para el diseño inicial fije la profundidad del agua sobrenadante entre 1 y 1.5 m.
- d. Proveer por lo menos 2 y preferiblemente 3 unidades de filtro. El área combinada de superficie debe ser lo suficientemente grande para que cuando un filtro esté fuera de operación por limpieza, el ritmo de filtración en las unidades de operación no exceda los 0.2 m/hora.
- e. Proveer espacio para unidades de filtro adicionales.
- f. Tan pronto como se inicien las operaciones, note cuidadosamente la longitud de las jornadas de filtración. Lo más apropiado es una jornada promedio de filtración de aproximadamente 2 meses. Cuando la jornada del filtro demuestra ser mucho mayor, se puede elevar el ritmo de filtración permitiendo un mayor rendimiento de planta. Si las jornadas de filtro son más cortas de lo esperado, se tendrá que construir unidades adicionales en fecha anterior a la que se había anticipado.

En los filtros lentos de arena se debe evitar la presión baja (es decir, la presión del agua por debajo de la atmosférica) bajo todas las circunstancias, ya que esto puede causar problemas serios. Se formarían y acumularían burbujas de aire en el lecho de filtro aumentando la resistencia contra el flujo de filtración. Las burbujas de aire de gran tamaño pueden incluso romper el lecho de filtro y crear fisuras a través de las cuales pasaría el agua sin la purificación adecuada. Así, la pérdida máxima permisible de carga sobre el lecho de filtro está limitada a la profundidad del agua sobrenadante más la resistencia del lecho limpio de filtro en el ritmo mínimo de filtración. Para evitar la presión baja, se puede proveer un vertedero de derrame en la línea de efluente. La diferencia de nivel entre el agua sobrenadante y el vertedero de derrame no debe exceder la pérdida de carga máxima permisible más las pérdidas de carga en la tubería de efluente para el ritmo mínimo de filtración.

Para los ritmos bajos de filtración usados en los filtros lentos de arena, una pequeña variación del nivel del agua sobrenadante puede tener una influencia apreciable en el ritmo de filtración y así afectar la calidad del efluente. Para evitar esto, se debe proveer un control de ritmo de filtración colocado en la línea del efluente.

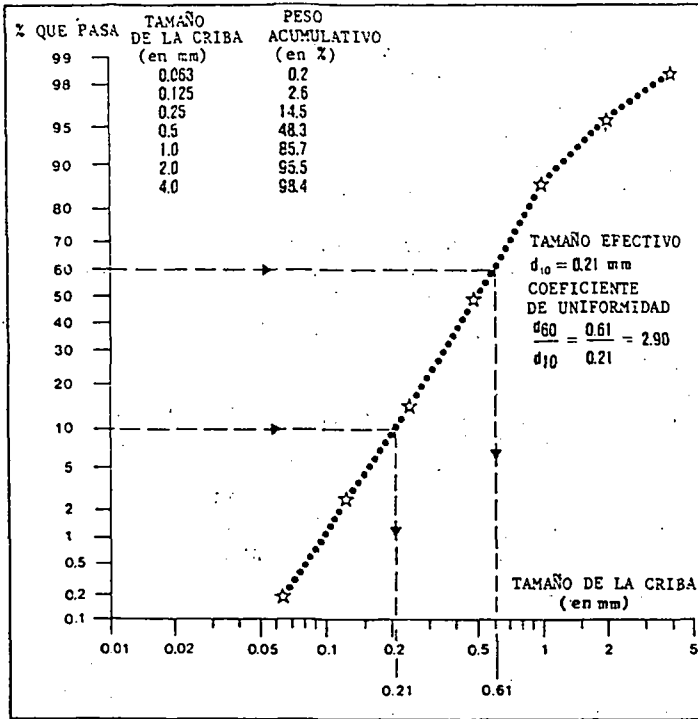


Figura 15.5  
 Distribución de tamaños de grano de la arena de filtro

### 15.5 CONSTRUCCION

En lo que se refiere a la construcción de un filtro lento de arena, se puede distinguir varios elementos siendo los más importantes: el tanque de filtro, el fondo del filtro, el lecho de filtro, el agua sobrenadante y la línea de afluente y de efluente. También se debe prestar atención a la disposición de la planta de filtración lenta en arena en conjunto.

En Europa continental se construye los filtros lentos de arena de concreto reforzado y pretensado con una forma rectangular y paredes verticales de 3 a 4 metros de altura. En donde sea posible se les sitúa sobre la napa más alta de agua subterránea para asegurarse que no habrá filtración de agua contaminada a través de las hendiduras. En Gran Bretaña el concreto macizo aún es muy popular. Se usa muros de contención a gravedad y se construye en el sitio un piso separado, con secciones colocadas en un patrón de tablero comprobador (Figura 15.6).

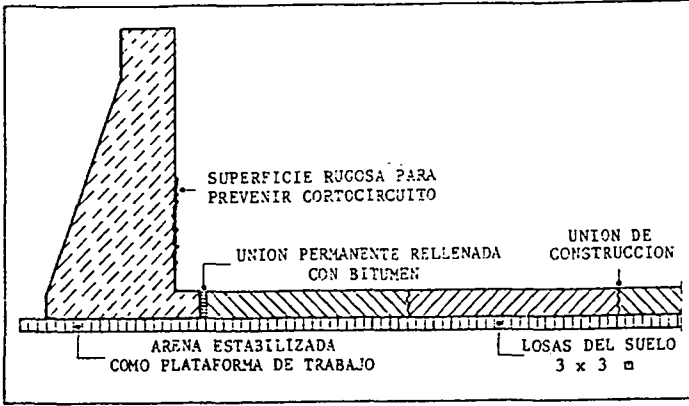


Figura 15.6  
Filtro lento de arena construido en concreto macizo

En el pasado se construyeron los filtros lentos de arena de mampostería en una base de arcilla batida (Figura 15.7). Una construcción de este tipo puede ser bastante apropiada en áreas rurales de países en desarrollo.

En la Figura 15.8 se muestra un filtro lento de arena muy simple construido en el suelo.

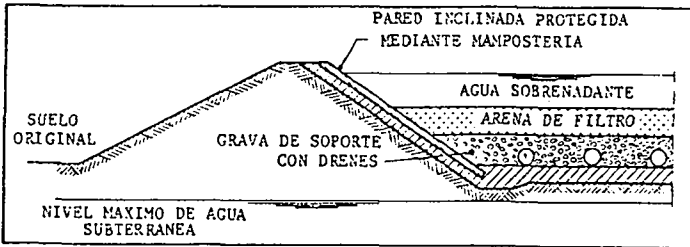


Figura 15.7  
Filtro lento de arena construido de mampostería sobre arcilla batida

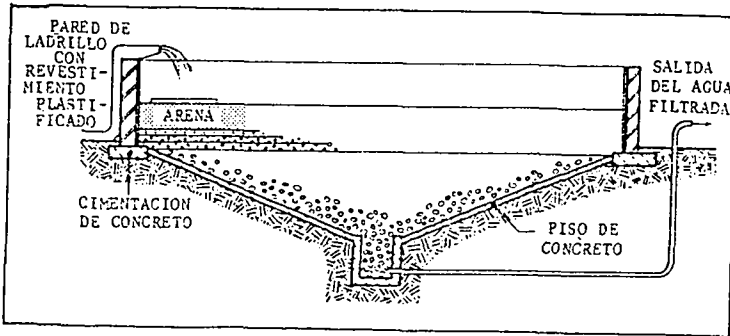


Figura 15.8  
Filtro lento de arena simple

Dependiendo de la capacidad de la planta de tratamiento, el área requerida varía de unas cuantas decenas a varios cientos de metros cuadrados. Hay una tendencia a reducir los tamaños máximos con vistas a obtener una mayor flexibilidad de operación así como una limpieza más rápida del filtro. Con un ritmo máximo de filtración de 0.2 m/hora, una planta con una capacidad de 2 millones de m<sup>3</sup>/año y una escada de 1.2 entre el ritmo diario de producción máximo y promedio, requeriría un área de lecho de filtro de 1,370 m<sup>2</sup>. Con una unidad como reserva (por ejemplo, para limpieza) esto requiere 4 unidades, cada una de 460 m<sup>2</sup> de área de superficie ó 6 unidades de 270 m<sup>2</sup> cada una. Con el fin de asegurar una buena calidad de efluente, se debe prevenir el cortocircuito a lo largo de las paredes de la caja de filtro. Cuando se utiliza concreto reforzado, se debe endurecer la pared interna en la mitad de la profundidad del lecho de filtro. El construir esta pared ligeramente inclinada hacia atrás también ayuda en mucho a fijar fuertemente el lecho de filtro a la pared del tanque. Se debe prestar mucha atención a la presencia de niveles elevados de agua subterránea, los cuales pueden elevar la estructura y así pueden malograr las estructuras del filtro.

El fondo del filtro sirve al doble propósito de soportar el lecho y drenar el agua filtrada. Las aberturas o poros del fondo del filtro deben ser lo suficientemente finas para que no pueda pasar ningún material de filtro a través de ellas. La resistencia del fondo de filtro al paso del agua filtrada (pérdida de carga) debe ser pequeña. Como se muestra en la Figura 15.9 existen varios tipos de fondos de filtro, incluyendo ladrillos apilados y concreto poroso vaciado en el sitio en formas recuperables.

Para prevenir que el material de filtro ingrese y bloquee el sistema de desagüe inferior, se puede usar una serie de capas de grava graduada. La capa inferior de tamaño grueso debe ser lo suficientemente grande para mantener libres las aberturas en el fondo del filtro y la capa superior debe ser tan fina que la arena de filtro sobrepuesta no penetre en sus poros. Para fondos porosos de filtro, una capa de 0.1-0.2 m de espesor sería suficiente; para ladrillos apilados con uniones abiertas (10 mm de ancho) se requerirá cuatro capas, por ejemplo, de 0.4-0.6 mm, 1.5-2 mm, 5-8 mm y 15-25 mm de tamaño, teniendo cada capa aproximadamente 10 cm de espesor.

Para filtros pequeños, pueden ser más atractivas las tuberías laterales perforadas. Estas están conectadas a un dren central que conduce el agua fuera del filtro. Los laterales perforados pueden ser hechos de muchos materiales, tales como arcilla vitrificada (tejas de drenaje de granja, completamente redondas o de media caña) o hierro fundido, pero en la práctica de los trabajos de agua se usa mayormente el cemento-asbesto y el polivinilcloruro. También se puede usar ventajosamente las tuberías porosas hechas localmente (Figura 15.10). Se coloca tuberías laterales con un diámetro interno de aproximadamente 80 mm en intervalos de aproximadamente 1 m, provistas de huecos de 5 mm de diámetro en el lado de abajo; de aproximadamente 10 por metro de longitud. Por lo general, el dren central no está perforado y debe tener un corte transversal de aproximadamente dos veces el área transversal combinada de los laterales conectados a él.

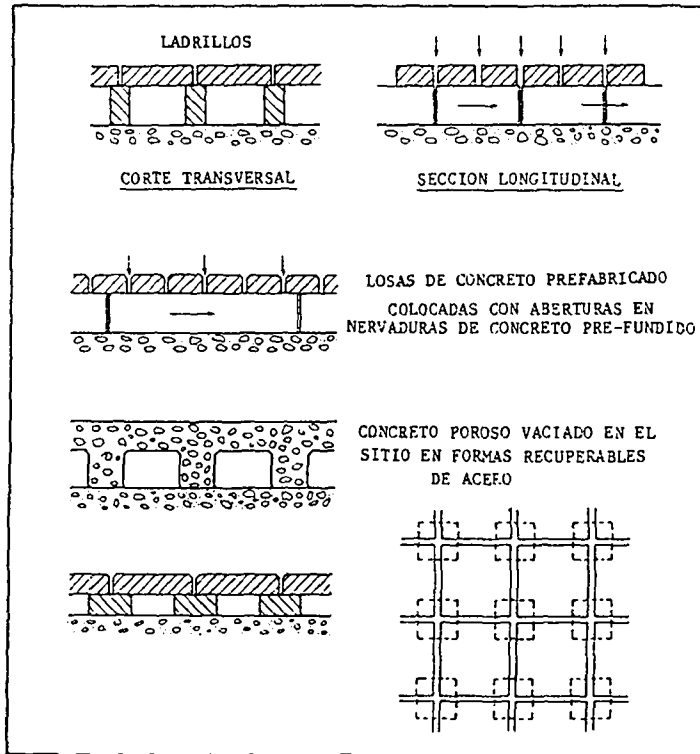


Figura 15.9  
Tipos de fondos de filtro



Figura 15.10  
Tuberías porosas de desagüe inferior

Ya se ha discutido sobre la arena para el filtro lento de arena en la Sección 15.4. Cuando no se dispone naturalmente de la arena del tamaño efectivo requerido, algunas veces se la puede producir mezclando bien dos tipos de arena natural. Sin embargo, esto resultará en un lecho de arena graduado con menos uniformidad. Entonces puede que se necesite tamizar la arena para remover los granos más gruesos para obtener la uniformidad requerida.

La profundidad del agua sobrenadante está relacionada con la máxima pérdida de carga permisible, la que a su vez influye en la longitud de la jornada de filtro. Se debe proveer un tablero libre de 0.2 m sobre el nivel máximo de agua cruda y la parte superior de las paredes debe estar por lo menos 0.8 m por encima del nivel del suelo para minimizar la contaminación por polvo, hojas, animales pequeños, etc.

El cubrir un filtro lento de arena es una necesidad en climas fríos para evitar el congelamiento del agua en tiempo de invierno. Esto se practica algunas veces en climas tropicales para prevenir el crecimiento de algas. En filtros al descubierto la reacción fotosintética



procede de izquierda a derecha durante las horas del día, produciéndose oxígeno ( $\text{O}_2$ ). Durante la noche la reacción es en dirección contraria y se consume oxígeno. Como resultado, hay una variación considerable en el contenido de oxígeno del agua filtrada, con valores muy bajos en las mañanas y quizás hasta bolsillos de agua anaeróbica en el lecho de filtro. Las algas muertas pueden bloquear el lecho de filtro y causar una disminución en las jornadas. Una muerte masiva de algas (por ejemplo, en otoño) puede impartir un mal olor y sabor al agua filtrada. En climas tropicales el período de la luz solar es, por lo general, relativamente corto, aproximadamente 12 horas y la temperatura del agua es bastante constante. Entonces, el crecimiento y la muerte de las algas se producirá más o menos en la misma escala. Las desventajas mencionadas anteriormente son entonces menos pronunciadas y se puede utilizar completamente el aumento ventajoso de los procesos de autopurificación (véase Sección 15.2).

Hoy en día, por lo general, las diferentes unidades de un filtro lento de arena son arregladas en hileras regulares a ambos lados de una faja de tierra donde se coloca todas las líneas de afluente y efluente. Entre cada hilera de unidades se mantiene abiertas fajas para facilitar el acceso para la limpieza del filtro. Frecuentemente los filtros están provistos de un anexo pequeño que contiene las válvulas, medidores y otro equipo necesario para el control y la operación diaria (Figura 15.11).

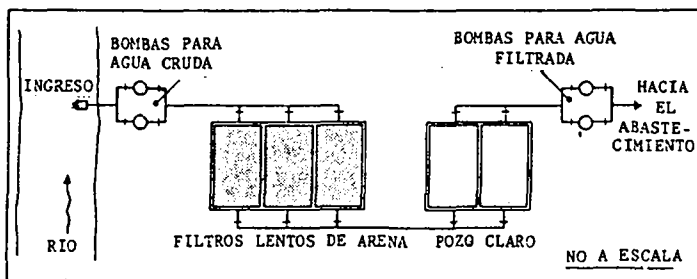


Figura 15.11  
Arreglo general para una planta de filtración lenta en arena

### 15.6 LIMPIEZA

El método probado por el tiempo para la limpieza de un filtro lento de arena es el de raspar la superficie de arena con palas manuales para remover la capa superior de arena sucia hasta una profundidad superior a los 1.5-2 cm. La mezcla raspada de arena e impurezas es apilada en lomas o en montones desde donde se les lleva o se les transporta hacia el borde del filtro usando carretillas o carretas manuales rodantes sobre tablones de madera (Figura 15.12). También se le puede sacar del filtro con la ayuda de canastas elevadas mediante sogas y aparejos.

Algunas veces se desecha la arena sucia (se le puede usar para rellenos) pero en otros casos se le limpia mediante el lavado (Figuras 15.13 y 15.14), si esto es más barato que comprar arena nueva. Para evitar la putrefacción se debe lavar la arena inmediatamente después de que ha sido extraída del filtro. Se debe tener cuidado en no perder muchas de las fracciones finas de la arena durante el lavado.





Figura 15.12  
Limpieza manual de un filtro lento de arena

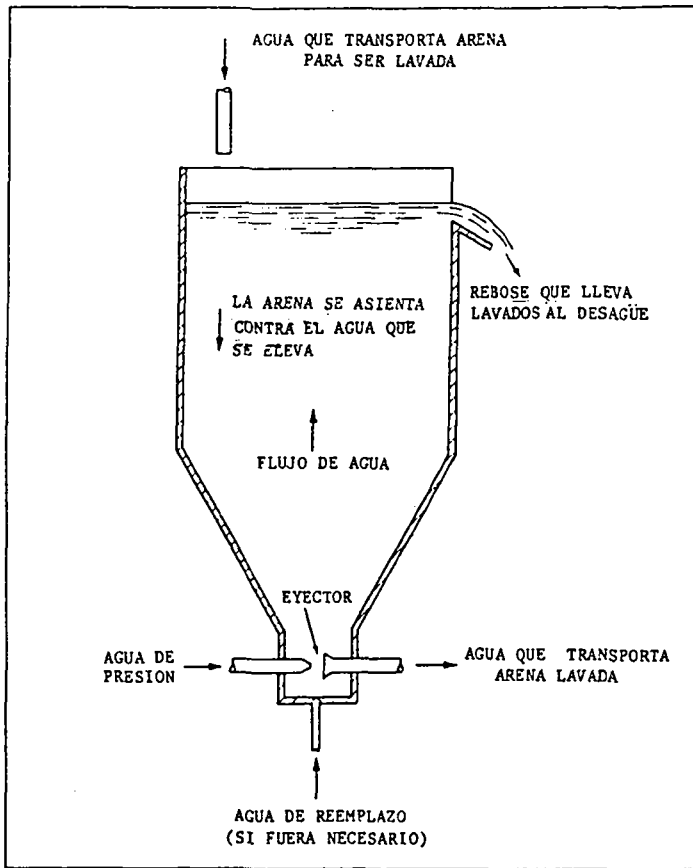


Figura 15.13  
Lavador de arena

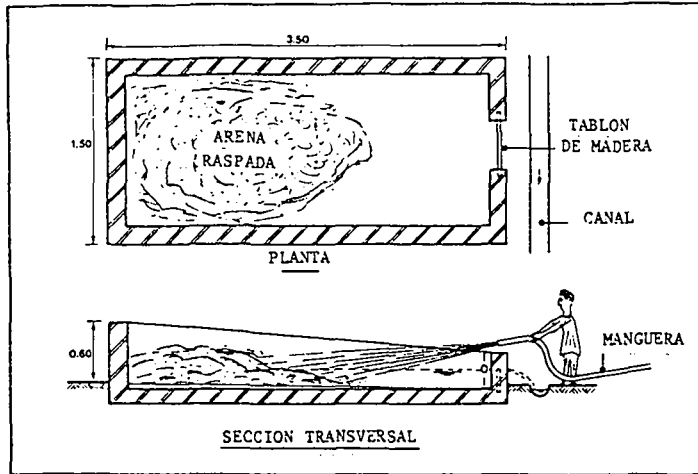


Figura 15.14  
Plataforma de lavado de arena

La penetración de las impurezas en el lecho de filtro está confinada mayormente a las capas superiores. El raspar la capa superior remueve la mayor parte de los atoros pero algunos permanecerán en las capas más profundas del lecho de filtro. Estos depósitos se acumulan poco a poco y también penetran gradualmente al fondo, hacia el lecho de filtro. Esto podría causar problemas si la arena permanece en el sitio por un período muy largo. Cuando después de muchas raspaduras se alcanza el espesor mínimo del lecho, entonces es necesario remover 0.3 m adicionales de arena de filtro antes de que se coloque la nueva arena. La capa removida de arena contiene todos los organismos necesarios para el adecuado funcionamiento bioquímico del filtro lento de arena y se le debe colocar en la parte superior de la arena nueva para promover el proceso de maduración (Figura 15.15).

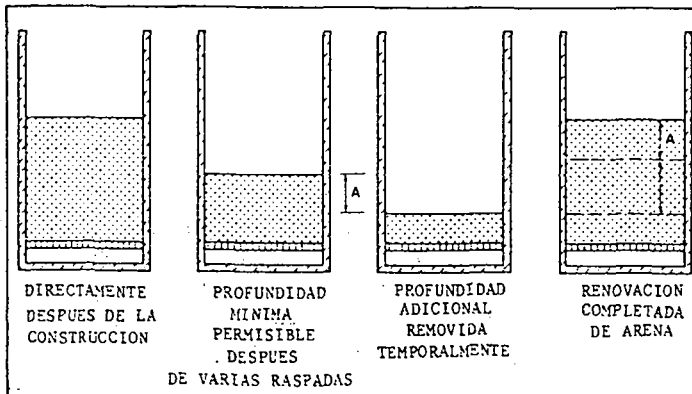


Figura 15.15  
Renovación de un filtro lento de arena

El trabajo manual de limpieza descrito anteriormente no requiere equipo o conocimientos especiales, pero para filtros grandes se necesita un número considerable de trabajadores. Se ha desarrollado varios sistemas mecánicos para limpiar los filtros. Desafortunadamente estos son demasiado complejos y costosos para ser usados en plantas pequeñas de tratamiento en países en desarrollo.

LIBRARY  
INTERNATIONAL REFERENCE CENTRE  
FOR COMMUNITY WATER SUPPLY AND  
SANITATION (IIRC)

FILTRACION LENTA EN ARENA

Dijk, J.V. van; Oomen, J.H.C.M.

SLOW SAND FILTRATION FOR COMMUNITY WATER SUPPLY IN DEVELOPING COUNTRIES - A DESIGN AND CONSTRUCTION MANUAL

International Reference Centre for Community Water Supply,  
La Haya, 1978, (Technical Paper No. 11)

Frankel, R.J.

EVALUATION OF LOW-COST WATER FILTERS IN RURAL COMMUNITIES OF THE LOWER MEKONG BASIN

Asian Institute of Technology, Bangkok, 1974

Huisman, L.; Woods, W.E.

SLOW SAND FILTRATION

World Health Organization, Ginebra 1974, 122 p.

Institution of Water Engineers

MANUAL OF BRITISH WATER SUPPLY PRACTICE

Heffer & Sons Ltd., Cambridge, 1950

Thanh, N.C.; Pescod, M.B.

APPLICATION OF SLOW SAND FILTRATION FOR SURFACE WATER TREATMENT IN TROPICAL DEVELOPING COUNTRIES

Asian Institute of Technology, Bangkok, 1976

(Environmental Engineering division Research Report No. 65)

Wright, F.B.

RURAL WATER SUPPLY AND SANITATION

John Wiley & Sons, Chapman & Hall, Nueva York, 1956

## 16. FILTRACION RAPIDA

### 16.1 INTRODUCCION

Como se explicó en el capítulo anterior sobre los filtros lentos de arena, la filtración es el proceso mediante el cual se purifica el agua haciéndola pasar a través de un material poroso (o "medio"). Para la filtración rápida comúnmente se usa la arena como el medio de filtro\* pero el proceso es bastante diferente a la filtración lenta en arena. Esto es debido a que se usa arena más gruesa con un tamaño efectivo de grano en la escala de 0.4-1.2 mm y el ritmo de filtración es más elevado, generalmente entre 5 y 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hora (120-360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día). Debido a la arena gruesa usada, los poros del lecho de filtro serán relativamente grandes y las impurezas contenidas en el agua cruda penetrarán al fondo en el lecho de filtro. Por esto, la capacidad del lecho de filtro para almacenar impurezas depositadas, es usada en forma mucho más efectiva y se puede tratar hasta agua de río muy turbia con la filtración rápida. Para limpiar un lecho de filtro rápido, no es suficiente raspar la capa superior. La limpieza de los filtros rápidos se realiza mediante el lavado por corriente de agua limpia. Eso se hace dirigiendo un flujo elevado de agua a través del lecho de filtro desde donde se expande y se arrastra. El lavado por corriente de agua limpia saca fuera del filtro los atoros depositados. La limpieza de un filtro rápido se puede realizar en poco tiempo, no es necesaria ni siquiera media hora aproximadamente. Se le puede hacer con la frecuencia requerida, si fuera necesario todos los días.

#### Aplicaciones de la filtración rápida

Hay varias aplicaciones diferentes de la filtración rápida en el tratamiento de agua para abastecimientos de agua de bebida.

En el tratamiento del agua subterránea, se usa la filtración rápida para remover el hierro y el manganeso. Para ayudar al proceso de filtración, frecuentemente se provee la aeración como pretratamiento para formar compuestos insolubles de hierro y manganeso (Figura 16.2).

---

\* También se usa la antracita, las cortezas molidas de coco, la piedra pomez y otros materiales, especialmente en lechos de filtro de capas múltiples en donde se coloca una o más capas de dichos materiales en la parte superior de un lecho de arena (superficial).

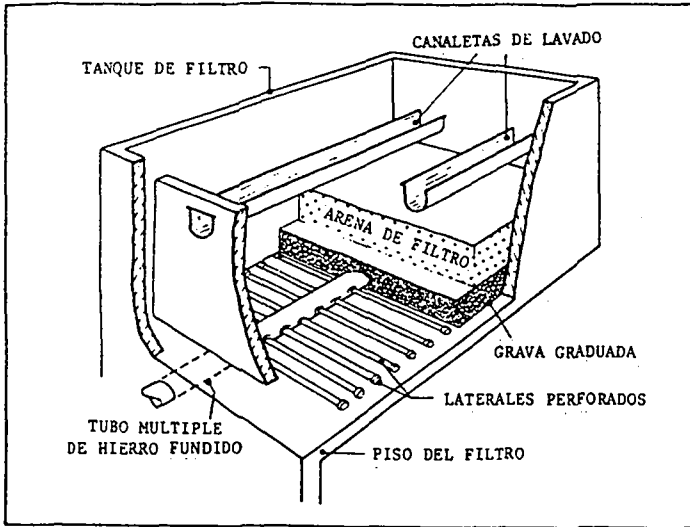


Figura 16.1  
Filtro rápido (abierto, tipo gravedad)

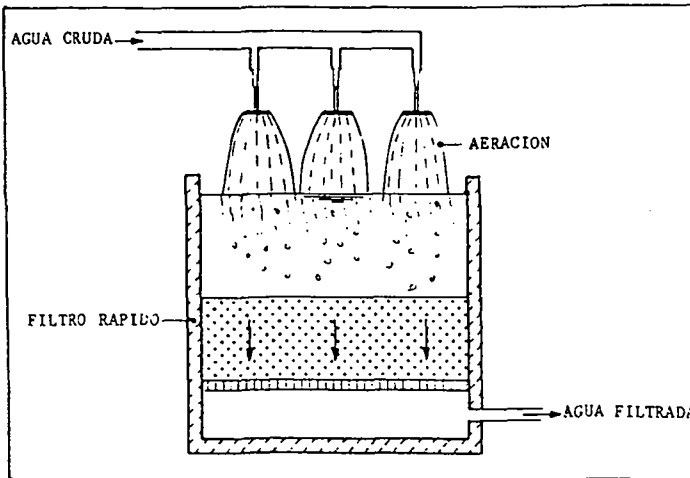


Figura 16.2  
Filtración rápida de agua pretratada (aerada)

Para agua de turbiedad baja como la que se halla frecuentemente en lagos y algunas veces en ríos, la filtración rápida debe ser capaz de producir agua clara, la cual, sin embargo, puede contener aún bacterias patógenas y virus. Entonces es necesario un tratamiento final, tal como la clorinación, para obtener agua bacteriológicamente segura.

En el tratamiento de agua de río con turbiedad elevada, se puede usar la filtración rápida como pretratamiento para reducir la carga en los filtros lentos de arena siguientes (Figura 16.3) o se le puede aplicar para el tratamiento de agua que ha sido clarificada mediante coagulación, floculación y sedimentación (Figura 16.4). En tales casos se requiere nuevamente una clorinación final.

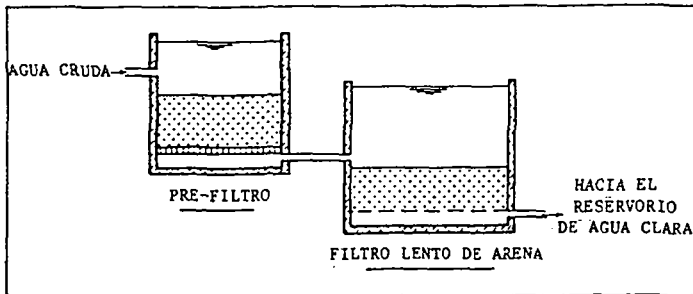


Figura 16.3  
Filtración rápida seguida de filtración lenta en arena

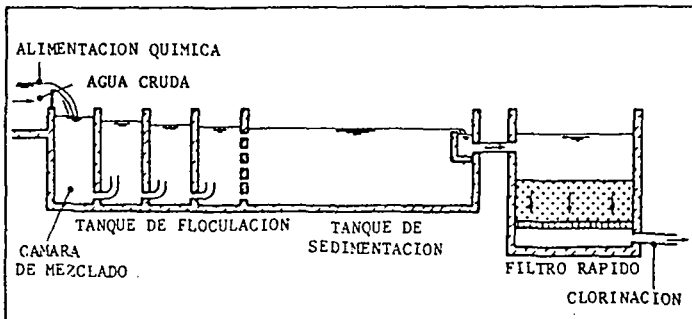


Figura 16.4  
Filtración rápida después de la coagulación, floculación y sedimentación

### Tipos de filtros rápidos

Los filtros rápidos se construyen en su mayoría al descubierto pasando el agua al lecho de filtro mediante gravedad (Figura 16.1).

Para ciertas condiciones de operación, son más apropiados otros filtros rápidos que no sean del tipo de gravedad. Los más importantes son: filtros de presión, filtros de flujo ascendente y filtros de medios múltiples.



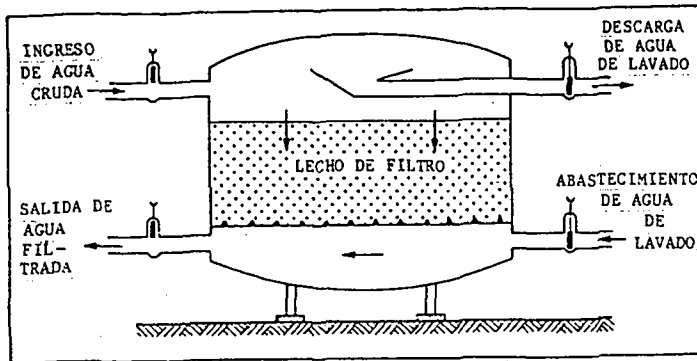


Figura 16.5  
Filtro de presión

Filtros de presión (Figura 16.5) son de construcción similar a los filtros del tipo gravedad, pero el lecho de filtro y el fondo del filtro están encerrados en un recipiente hermético de presión hecho de acero. Aquí, la fuerza de conducción para el proceso de filtración es la presión del agua aplicada en el lecho de filtro, la cual puede ser tan elevada que se puede alcanzar casi cualquier longitud deseada de la carrera del filtro. Los filtros de presión están disponibles comercialmente como unidades completas. No son tan fáciles de instalar, operar y mantener. Por esta razón no son muy adecuados para aplicarlos en plantas pequeñas de tratamiento en países en desarrollo.

Filtros de flujo ascendente (Figura 16.6) sirven para un proceso de filtración de grueso-a-fino. La capa gruesa del fondo del lecho de filtro criba la mayor parte de las impurezas suspendidas, incluso del agua cruda turbia, sin ningún aumento grande de la resistencia del lecho de filtro, debido a los poros grandes. Las capas finas sobrepuestas tienen poros más pequeños pero aquí también la resistencia del filtro aumentará sólo lentamente ya que no quedan muchas impurezas que filtrar.

En los filtros de flujo ascendente se usa la arena como el único medio de filtro. Frecuentemente, se les usa para el pretratamiento de agua que es purificada nuevamente mediante filtros rápidos del tipo de gravedad o mediante filtros lentos de arena. En tales casos, los filtros de flujo ascendente pueden dar excelentes resultados y pueden ser muy adecuados para usarlos en plantas pequeñas de tratamiento.

Una desventaja es que la resistencia permisible en un filtro de flujo ascendente no es mayor que el peso sumergido del lecho de filtro. Siendo la arena el material de filtro, la carga disponible de resistencia es casi igual al espesor del lecho. Así, para agua de río muy turbia, la longitud de la carrera del filtro y la tasa disponible de filtración están muy limitadas.

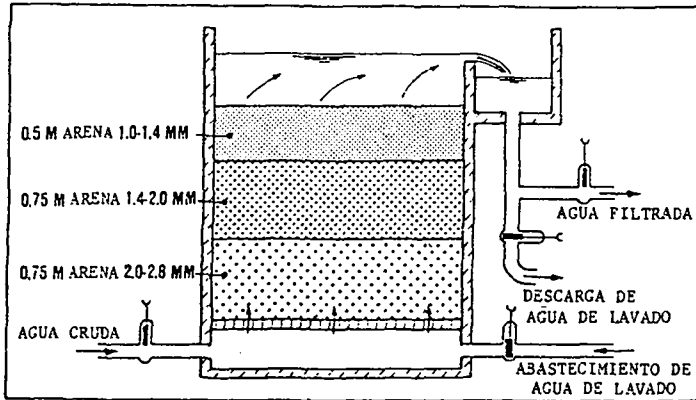


Figura 16.6  
Filtro de flujo ascendente

Filtros de medios múltiples (Figura 16.7) son del tipo gravedad, filtros de flujo descendente, cuyo lecho de filtro está compuesto de varios materiales diferentes, los cuales se colocan de grueso-a-fino en la dirección del flujo. Para filtros rápidos pequeños, es común usar sólo dos materiales en combinación: 0.3-0.5 m de arena con un tamaño efectivo de 0.4-0.7 mm como capa inferior, cubierta por 0.5-0.7 m de antracita, piedra pómez o cortezas molidas de coco con un tamaño efectivo de 1.0-1.6 mm. Como tratamiento final, los filtros de capas múltiples pueden proporcionar resultados excelentes y, cuando se dispone localmente de materiales adecuados, bien vale la pena considerar su aplicación en plantas pequeñas de tratamiento.

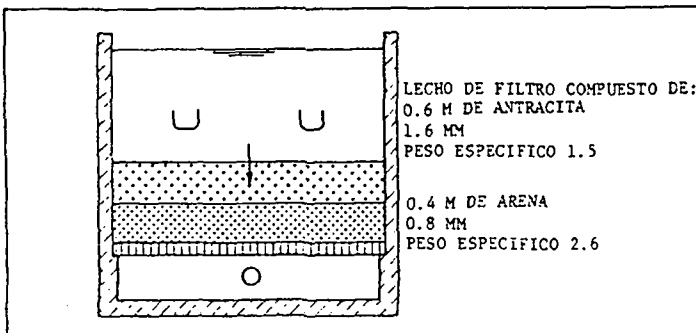


Figura 16.7  
Lecho de filtro de medios dobles

## 16.2 ASPECTOS TEORICOS

La remoción general de impurezas del agua por filtración rápida, se lleva a cabo mediante una combinación de varios procesos diferentes. Los más importantes son: colado, sedimentación, absorción y procesos bacteriológicos y bioquímicos. Estos son los mismos procesos ya descritos para la filtración lenta en arena (en la Sección 15.2). Sin embargo, en la filtración rápida el material del lecho de filtro es mucho más grueso y el ritmo de filtración es mucho más elevado (hasta 50 veces mayor que en la filtración lenta en arena). Estos factores alteran completamente la importancia relativa de los varios procesos de purificación.

El colado de impurezas en un filtro rápido no es importante debido a los poros relativamente grandes en el lecho de filtro. La sedimentación no será muy efectiva debido a las elevadas tasas de filtración usadas. Así, se retendrá muchas menos impurezas mediante el colado y la sedimentación que en el filtro lento de arena. Especialmente las capas superiores del lecho de filtro serán mucho menos efectivas y habrá una profunda penetración de impurezas en todo el lecho del filtro rápido.

El efecto más importante de purificación en la filtración rápida es, con mucho, la absorción de impurezas con carga eléctrica hacia los granos del lecho de filtro con una carga eléctrica opuesta. En un filtro rápido las cargas estáticas naturales del material del lecho de filtro están complementadas por cargas electrocinéticas producidas por el flujo elevado de agua. Las partículas cargadas (iones) son arrastradas fuera de los granos del lecho de filtro con el resultado de que los granos quedan con una carga (opuesta). El efecto electrocinético refuerza grandemente la acción de absorción.

En un filtro lento de arena el agua permanece varias horas en el lecho de filtro, pero con la filtración rápida el agua pasa sólo en unos cuantos minutos. Frecuentemente se remueve los atoros orgánicos acumulados en un filtro rápido cuando se limpia el filtro mediante el lavado por corriente de agua limpia. Hay muy poco tiempo y oportunidad de que se desarrolle cualquier biodegradación de materia orgánica y de que se produzca la muerte de bacterias patógenas y virus. La degradación limitada de materia orgánica no necesita ser una desventaja sería ya que los atoros acumulados serán lavados del filtro durante el lavado por corriente de agua limpia. Por lo general, la pobre actividad bacteriológica y bioquímica de un filtro rápido será insuficiente para producir agua bacteriológicamente segura. De aquí que será necesario un nuevo tratamiento, tal como la filtración lenta en arena o clorinación, para producir agua que sea apta para la bebida y para propósitos domésticos.

## 16.3 OPERACION Y CONTROL DEL FILTRO RAPIDO

### Operación del filtro

En la Figura 16.8 se muestra esquemáticamente la operación de un filtro rápido (tipo gravedad).

Durante la filtración el agua ingresa al filtro a través de la válvula A, desciende hacia el lecho de filtro, fluye a través de él, pasa el sistema de desagüe inferior (fondo del filtro) y fluye al exterior a través de la válvula B. Debido al atoro gradual de los poros, la resistencia del lecho de filtro contra el flujo descendente del agua aumentará gradualmente. Esto reducirá el ritmo de filtración a menos que esté compensado por un nivel creciente de agua cruda sobre el lecho del filtro. Frecuentemente, los filtros rápidos son diseñados para operar con un nivel constante de agua cruda, el cual requiere que el filtro esté equipado con un dispositivo de control de ritmo en la línea del afluente o del efluente. Estos controladores del ritmo del filtro proporcionan una resistencia ajustable al flujo de agua. Se abren gradual y automáticamente para compensar la creciente resistencia del lecho del filtro y así, mantener constantes las condiciones de operación del filtro rápido.

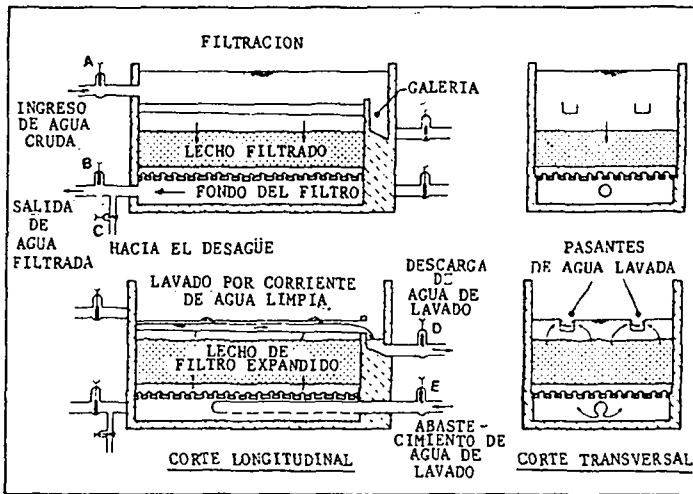


Figura 16.8  
Filtro rápido (tipo gravedad)

Cuando después de cierto tiempo de operación, se abre completamente el controlador del ritmo del filtro, ya no se podrá compensar un nuevo atoro del lecho del filtro y el ritmo de filtración disminuirá. Entonces se retira de servicio el filtro para lavarlo por corriente de agua limpia. Para esto, se cierra las válvulas A y B y se abre la válvula D para drenar el agua cruda restante fuera del filtro. Unos cuantos minutos después se abre la válvula E para admitir el agua de lavado. La fuerza de lavado por corriente de agua debe ser lo suficientemente elevada para expandir el lecho de filtro de tal forma que se pueda arrastrar los granos de éste y que los atoros acumulados sean retirados con el agua de lavado. El agua de lavado es recolectada en los pasantes desde donde se le drena hacia el desagüe. Cuando se completa el lavado por corriente de agua limpia, se cierra las válvulas E y D y se vuelve a abrir la válvula A, permitiendo que el agua cruda empiece un nuevo recorrido de filtro.

Para el material fino del lecho de filtro, la acción de arrastre producida por el agua de lavado durante el lavado por corriente puede a la larga no ser suficiente para mantener limpio el lecho de filtro. Entonces es deseable un arrastre adicional usando aire y agua en combinación para el lavado por corriente de agua. Sin embargo, esto es mucho más complejo que lavar sólo con agua y, por lo general, no es recomendable un lavado con aire-y-agua para plantas pequeñas de tratamiento.

### Control de filtro

Hay varios tipos de controladores de ritmo de filtración: dispositivo de control del ritmo de ingreso (igual distribución o "división de flujo") y dispositivos de control de ritmo de salida (válvulas operadoras a nivel, vertederos de derrame y sifones). Básicamente, los arreglos de control de ritmo de filtro se pueden dividir en tres grupos:

1. Cada filtro tiene un controlador individual de ritmo que mantiene la producción de agua filtrada en la escala constante deseada.
2. El flujo total de agua a través de la planta del filtro es controlado mediante el ritmo de ingreso de agua cruda o, en forma alternativa, por el ritmo en el cual se extrae el agua filtrada.
3. Igual que en el 2, pero las unidades del filtro operan en ritmos individuales descendentes.

Los controladores individuales de ritmo permiten a cada unidad de filtro operar a su velocidad óptima de filtración (figura 16.9). Sin embargo, esta ventaja no es muy grande y esos controladores de ritmo por lo general son muy caros y no son fáciles de mantener.

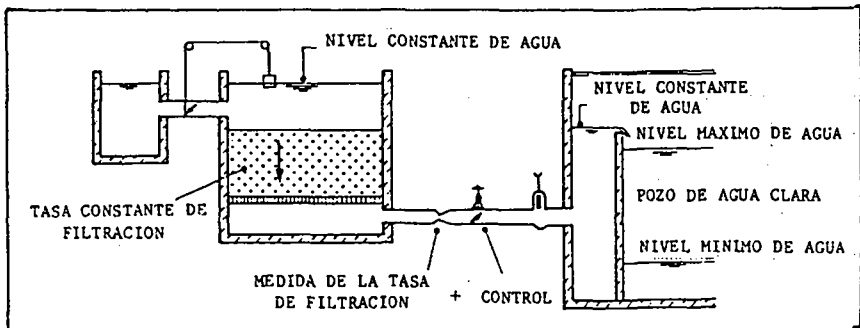


Figura 16.9  
Control de tasa de filtro

Los arreglos de control de filtro que usan una distribución uniforme del agua cruda ("división de flujo") sobre las unidades de filtro o para una extracción uniforme del agua filtrada, son usados ampliamente en Europa y Norte América. Se puede usar varios métodos. Probablemente el que se

muestra en la Figura 16.10b es el más simple ya que no tiene partes movibles. En este tipo, el agua cruda ingresa al filtro sobre un vertedero. Para todos los filtros la cresta del vertedero se encuentra al mismo nivel. Al conducto de agua cruda que alimenta a las unidades de filtro se le da un tamaño considerable de tal forma que el agua fluirá sin ninguna pérdida apreciable de carga. El nivel de agua en él será prácticamente el mismo en cada vertedero de entrada. Así, el ritmo de derrame en cada vertedero será el mismo y el agua cruda que se alimenta a las unidades de filtro será distribuida en forma equitativa.

Se puede controlar el ritmo de filtración conjuntamente para todas las unidades de filtro mediante el ritmo de alimentación del agua cruda. Se le puede adaptar fácilmente para satisfacer la demanda de agua filtrada. En este arreglo habrá variaciones considerables del nivel de agua cruda en los filtros, lo cual puede ser objetable. De ser así, se puede preferir otro arreglo como se muestra en la Figura 16.10c. Aquí, se usa una válvula controlada con flotador para mantener constante el nivel del agua cruda en cada filtro.

Frecuentemente, se usa los filtros rápidos para tratar agua que ha sido pretratada mediante coagulación, floculación y sedimentación; entonces, sirven para retener los flóculos procedentes de los tanques de sedimentación. Se debe prevenir cualquier rotura de estos flóculos y los vertederos de entrada mencionados anteriormente no son adecuados en estos casos. El arreglo que se muestra en la Figura 16.10a sería mucho mejor. Cada filtro está equipado con una caja flotante en la cual se mantiene constante el nivel de agua, en el mismo nivel en todas las unidades de filtro, con una válvula controlada con flotador. El canal efluente debe tener un tamaño considerable para asegurar que el nivel del agua será prácticamente el mismo en cada compuerta de efluente del filtro. El ritmo general de producción de todos los filtros conjuntamente puede ser controlado ahora mediante el ritmo en el cual se extrae el agua filtrada.

#### Filtración a ritmo descendente

Cuando no se usa controladores de ritmo de filtración, se realizará la filtración en un ritmo descendente. El diseño de filtros a ritmo descendente es mucho más simple que el de filtros de ritmo controlado. Se puede usar leños simples de detención o compuertas para el control del filtro (Figura 16.11).

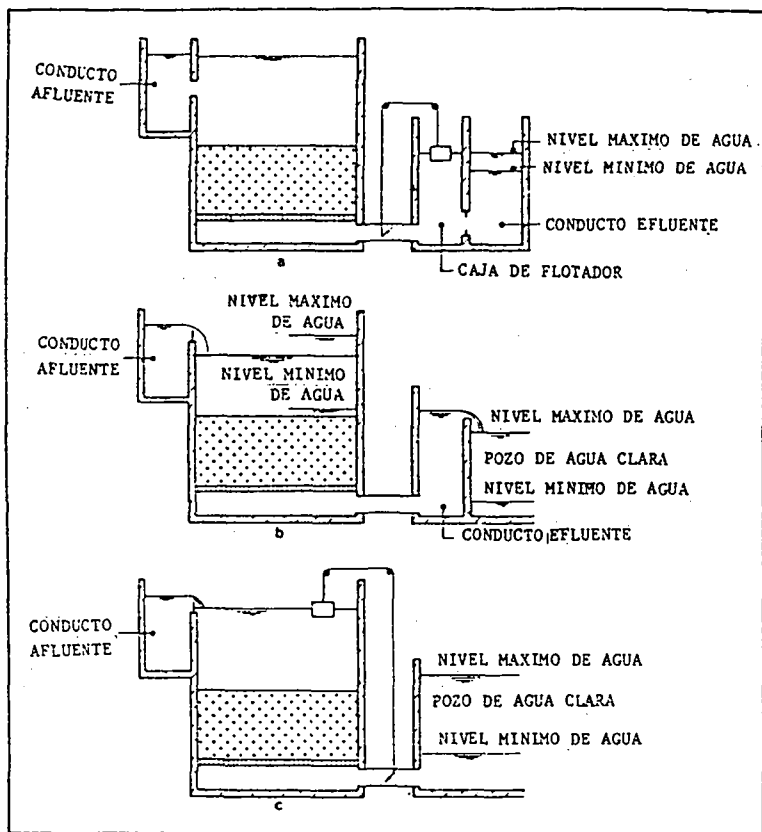


Figura 16.10  
Sistemas de control de filtro

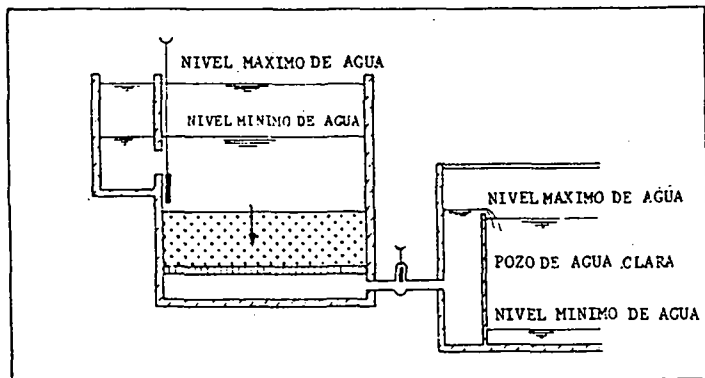


Figura 16.11  
Filtración de tasa declinante

Todos los filtros están en conexión directa con los conductos de agua cruda y de agua filtrada. Consecuentemente, todos tienen el mismo nivel de agua cruda y el mismo nivel de agua filtrada, de tal forma que todos los filtros operarán bajo la misma carga. Sin embargo, el ritmo de filtración para las varias unidades de filtro será diferente: será más elevado en el filtro recién lavado mediante retrolavado y más bajo en el que tiene un mayor movimiento en la jornada corriente del filtro. Para todos los filtros en forma conjunta, la producción estará determinada por el abastecimiento de agua cruda, el cual debe ser lo suficientemente elevado para satisfacer la demanda de agua filtrada. Durante la filtración, los lechos de filtro se atorán gradualmente y el nivel de agua cruda en todos los filtros se eleva debido a la resistencia elevada contra el flujo de agua en los lechos. La unidad de filtro que ha estado en operación por el período de tiempo más largo probablemente alcanzará primero el nivel máximo permisible de agua cruda y necesitará limpieza mediante retrolavado. Después de su limpieza, este filtro tendrá la resistencia más baja contra el flujo, de tal forma que una porción considerable del agua cruda abastecida pasará a este filtro. La carga en los otros filtros será reducida temporalmente. Esas unidades mostrarán una baja en el nivel de agua cruda. Cuando en un segundo filtro se alcanza el nivel máximo de agua cruda, éste será lavado mediante retrolavado y así sucesivamente.

Si no se toma medidas especiales, la escala de filtración en un filtro de ritmo descendente, justo después de la limpieza, puede ser muy elevada, hasta  $25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$ , lo cual es mucho más elevado que la tasa promedio de  $5-7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hora}$ . Cuando es necesario limitar el ritmo de filtración con el fin de salvaguardar la calidad del agua filtrada, se debe colocar un dispositivo extra de resistencia de flujo (por ejemplo, un orificio) en la línea de influente.

Para los filtros de presión, la filtración de ritmo descendente es una práctica común. Para los filtros rápidos de tipo gravedad, su aplicación aumenta gradualmente en Gran Bretaña, en América Latina y también, en una escala limitada, en Norte América. Debido a su simplicidad, la filtración de ritmo descendente está siendo considerada para plantas pequeñas de tratamiento en países en desarrollo.

#### 16.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Se necesita seleccionar cuatro parámetros para el diseño de un filtro rápido. El tamaño de grano del material de filtro, el espesor del lecho de filtro, la profundidad del agua sobrenadante y el ritmo de filtración. En la medida de lo posible, estos factores de diseño deben basarse en la experiencia obtenida en las plantas existentes que tratan la misma agua cruda o una comparable. Cuando no existe tal experiencia, el diseño debe basarse en los resultados obtenidos en una planta piloto que opere filtros experimentales (véase Anexo 3).



## Arreglos para el retrolavado

Un filtro rápido se limpia mediante lavado con corriente de agua, esto es, dirigiendo un flujo de agua limpia hacia arriba a través del lecho de filtro por un período de unos cuantos minutos. Se puede usar el agua filtrada acumulada mediante bombeo en un tanque elevado, o directamente el efluente de las otras unidades de filtro (en operación) de la planta de filtración ("arreglos de auto lavado"). La velocidad del flujo ascendente de agua debe ser lo suficientemente elevada para producir una expansión del lecho de filtro de tal forma que se pueda aflojar y retirar con el agua de lavado los atoros acumulados.

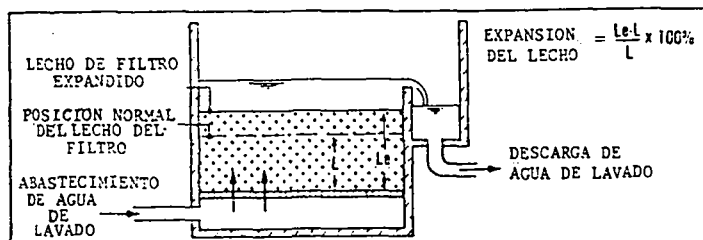


Figura 16.12  
Retrolavado de un filtro rápido

En el Cuadro 16.1 se presenta una lista de las escalas típicas de retrolavado que proporcionan una expansión de aproximadamente 20 por ciento para un lecho de filtro de arena (peso específico: 2.65 g/cm<sup>3</sup>).

Cuadro 16.1  
Escala típicas de retrolavado

d mm	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
t	Escala de retrolavado (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /hora)								
10°C	12	17	22	28	34	40	47	54	62
20	14	20	26	33	40	48	56	64	73
30	16	23	30	38	47	56	65	75	86

d = tamaño promedio de grano de la arena del filtro (mm)

t = temperatura de agua de retrolavado (°C)

v = tasa de retrolavado (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/hora)

Sí se abastece el agua de lavado con bombas, normalmente se usa un número de tres (en instalaciones muy pequeñas, dos) de las cuales una sirve como unidad de reserva. Para ritmos elevados de retrolavado y áreas más grandes de lecho de filtro, estas bombas necesitan ser de una gran capacidad por lo que su instalación y operación son bastante caras. Entonces, es preferible un reservorio de agua de lavado tal como el que se muestra en la Figura 16.13, las bombas pequeñas serán adecuadas para llenar el reservorio durante los intervalos entre los lavados sucesivos. Por lo general, el reservorio debe tener una capacidad entre 3 y 6 m<sup>3</sup> por m<sup>2</sup> de área del lecho de filtro y se le debe colocar de 4 a 6 metros sobre el nivel del agua en el filtro.

Usualmente se provee tres bombas para bombear agua hacia el tanque de agua de lavado; una de éstas es la unidad de reserva. La capacidad total de las dos bombas en operación debe ser de aproximadamente 10-20% de la escala de abastecimiento del agua de lavado. Un tanque especial de agua de lavado o un reservorio no son necesarios cuando el agua de lavado requerida es tomada del reservorio de agua filtrada. Sin embargo, esto puede causar fluctuaciones no deseadas de la presión en el sistema de distribución debido al abastecimiento interrumpido de agua.

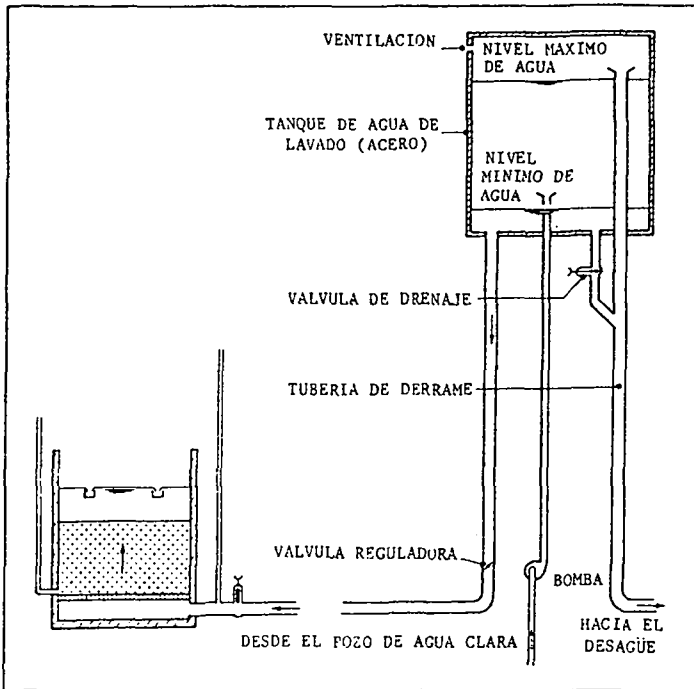


Figura 16.13  
Arreglo de tanque de agua de lavado

Una solución más simple consiste en aumentar la profundidad del agua que permanece sobre el lecho de filtro y limitar la resistencia máxima del filtro. Entonces el agua filtrada estará disponible en una carga de 1.5 a 2 metros sobre el lecho de filtro, lo cual debe ser suficiente. Las unidades en operación de la planta de filtración deben abastecer agua suficiente para el ritmo requerido de retrolavado. Por esto, una planta de filtración rápida que use este arreglo de retrolavado debería tener por lo menos seis unidades de filtro.

El agua de lavado es admitida en la parte de abajo del lecho de filtro a través del sistema de desagüe inferior ("fondo del filtro"). Para dividir uniformemente el agua de lavado sobre toda el área del lecho de filtro, el sistema de desagüe inferior debe proveer una resistencia suficiente contra el paso del agua de lavado (generalmente 0.6-1.0 m de carga de agua).

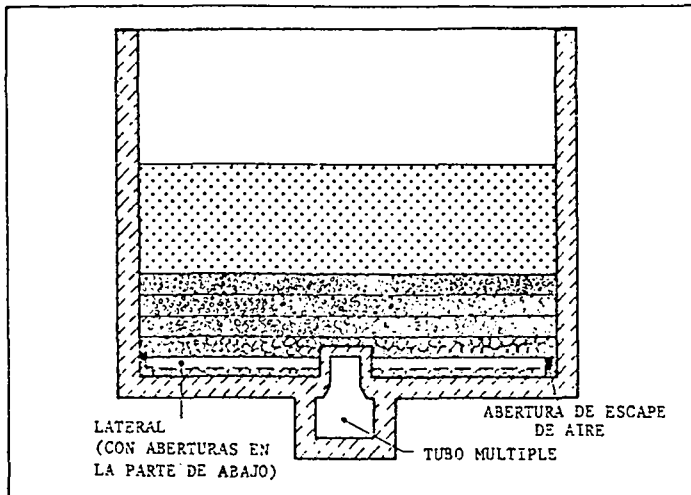


Figura 16.14  
Sistemas laterales de desagüe inferior

Un sistema de desagüe inferior usado frecuentemente consiste en laterales colocados con una separación aproximada de 0.2 m y conectados a un tubo múltiple (Figura 16.14). Los laterales tienen perforaciones en la parte de abajo, con un diámetro de aproximadamente 10 mm. Por lo general, se usa tuberías de cemento-asbesto y plástico rígido en este sistema de desagüe inferior.

Para evitar que el material de filtro ingrese a los laterales a través de las perforaciones, el lecho de filtro debe ser sostenido por una capa de material grueso (por ejemplo grava) que no sea desalojada por el agua de lavado impulsada desde las perforaciones de desagüe inferior. Por ejemplo, la arena de filtro de 0.7-1.0 mm de tamaño efectivo requeriría 4 capas de grava; desde la parte superior hasta el fondo: 0.15 m x 2-2.8 mm, 0.1 m x 5.6-8 mm, 0.1 m x 16-23 mm y 0.2 m x 38-54 mm; el paquete total de grava tendrá 0.55 m de profundidad.

Después de pasar por el lecho de filtro, el agua de lavado que transporta las impurezas lavadas es colectada y drenada al exterior mediante las canaletas de agua de lavado. La distancia que el agua de lavado tendrá que viajar en forma horizontal hacia la pileta debe estar limitada a aproximadamente 1.5-2.5 m. Se coloca las piletas con su parte superior a 0.5-0.6 m sobre el lecho de arena no expandido y su área transversal dependerá de que en el extremo de la pileta, la profundidad del agua sea la profundidad de descarga libre ("crítica") (Figura 16.15).

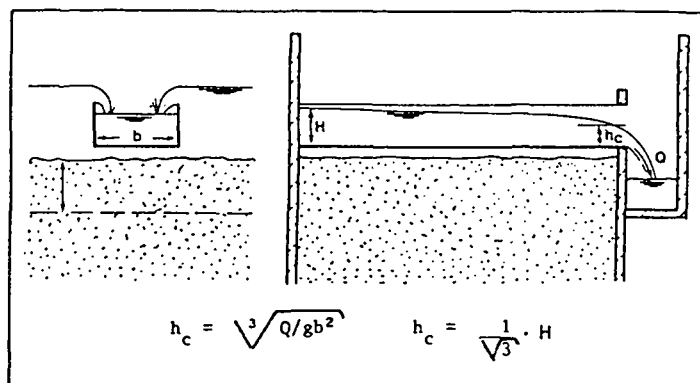


Figura 16.15  
Condición de flujo en canaletas de agua de lavado

El Cuadro 16.2 proporciona los ritmos de flujo de agua de lavado (Q) para combinaciones de flujo profundo de agua de lavado (H) y ancho de la canaleta de agua de lavado (b).

Cuadro 16.2  
Capacidad de las canaletas para llevar agua de lavado (litros/seg)

H Profundidad del flujo de agua de lavado en la canaleta	Ancho de la canaleta		
	0.25 m	0.35 m	0.45 m
0.25 m	30	40	52
0.35 m	53	75	96
0.45 m	82	115	148

Se puede colocar las canaletas de agua de lavado de varias maneras. La Figura 16.16 muestra arreglos típicos.

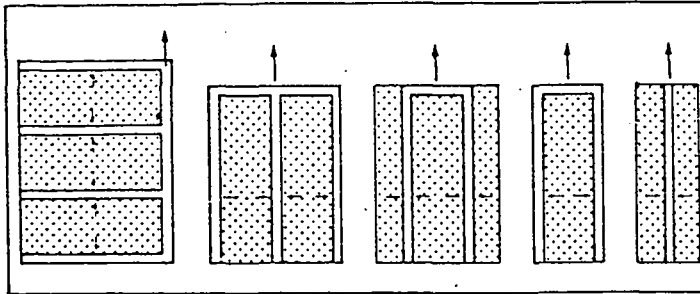


Figura 16.16  
Arreglos típicos de canaletas de agua de lavado

Particularmente cuando se usa arena fina, con un tamaño de grano inferior a aproximadamente 0.8 mm, la fuerza de arrastre del agua de lavado ascendente puede ser inadecuada para mantener limpios los granos del filtro en la jornada larga. Después de cierto tiempo pueden abrirse con una capa pegajosa de materia orgánica. Esto puede causar problemas tales como bolas de lodo y rajaduras en el filtro (Figura 16.17).



Figura 16.17  
Bolas de lodo y rajaduras en el filtro

Estas se pueden prevenir proveyendo un arrastre adicional a través del lavado por aire. La limpieza del filtro se inicia ahora con un lavado por corriente de aire en un ritmo de 30-50 m/hora, por lo general combinado con

un lavado con agua en un ritmo de 10-15 m/hora. Esto debe remover los recubrimientos de los granos de filtro y el siguiente lavado con agua retira el material aflojado. Para el retrolavado con corriente de aire es necesario un sistema separado de tuberías. En la Figura 16.18 se muestra un ejemplo. Se debe remarcar que el retrolavado por corriente de aire y agua es generalmente un arreglo demasiado complejo para plantas pequeñas de tratamiento de agua.

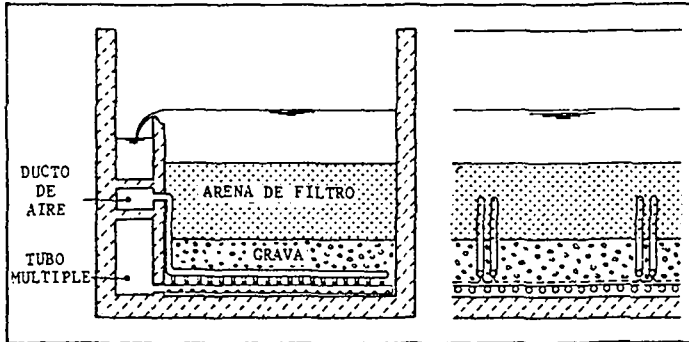


Figura 16.18  
Retrolavado por corriente de agua y aire

En la Figura 16.19 se muestra un arreglo interesante para alimentar aire y agua para el retrolavado. El retrolavado se inicia permitiendo que el agua de la cámara 1 fluya hacia la cámara 2. El aire de la cámara 2 se presuriza y es admitido para el arrastre del filtro. Luego se usa el agua colectada en la cámara 2 para el retrolavado del filtro.

#### Disposición de planta de filtración rápida

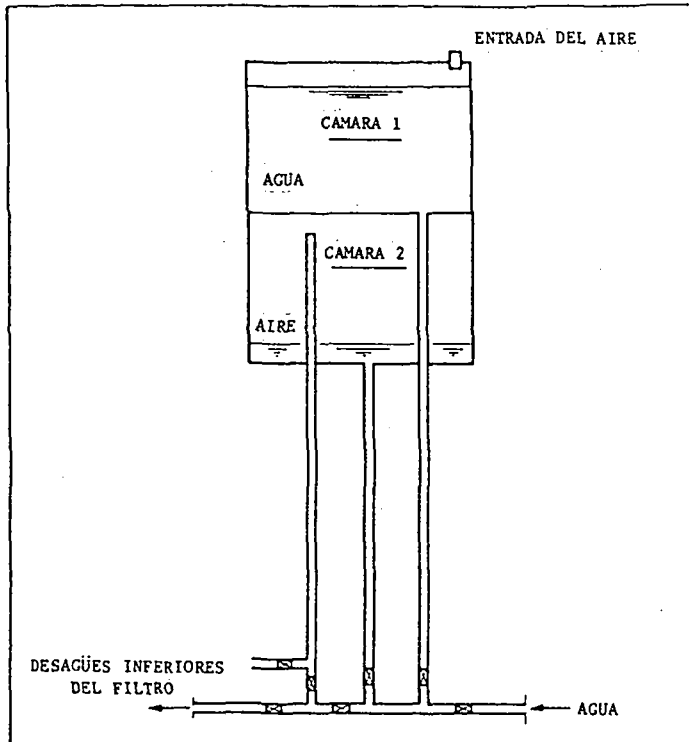
Una planta de filtración rápida consiste en un número de unidades de filtro (mínimo 2) cada una con un área A. Cuando un filtro está fuera de funcionamiento por limpieza, las unidades restantes deben ser capaces de proveer la capacidad requerida Q en el ritmo seleccionado de filtración r. Esto se expresa en la fórmula:

$$Q = (n - 1) A \cdot r$$

Para plantas pequeñas hay poca alternativa en lo que respecta a las combinaciones adecuadas de n y A, pero para plantas mayores, la alternativa debe ser tal que se minimice el costo de construcción. Como un paso tentativo de diseño, el área del lecho de la unidad de filtro (A) expresada en metros cuadrados puede ser tomada como aproximadamente 3.5 veces el número de unidades de filtro n.

Para economizar en la construcción y operación, se debe colocar las unidades de filtro en un grupo compacto con las líneas de afluente y efluente y cualquier línea de alimentación de sustancias químicas lo más cerca posible.

La colocación de las diferentes unidades de una planta de filtración rápida es un tema que garantiza la más minuciosa atención del ingeniero de diseño. Se debe hacer cierta concesión para una futura expansión de la planta. En la Figura 16.20 se muestra un ejemplo. Las instalaciones comunes, tales como bombas y tanques de lavado y alimentadores de solución química serán colocadas en un edificio de servicio, el cual también debe contener la oficina, laboratorio y cuartos y provisiones para estos, instalaciones de manejo de sustancias químicas, de almacenamiento y sanitarias.



Ref. Prof. R.N. Sen  
Instituto de tecnología  
de India, Kharagpur (India)

Figura 16.19  
Arreglo para retrolavado por corriente de agua y aire

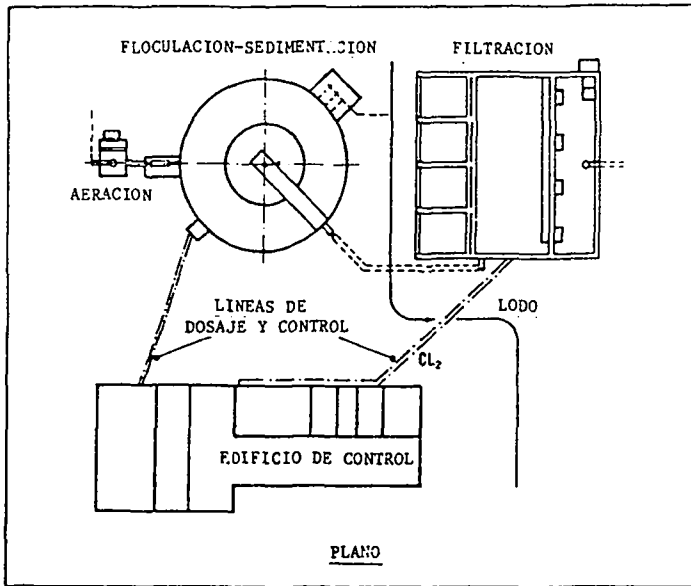


Figura 16.20  
Disposición de planta de filtración rápida

Muchos diseños ubican el edificio de servicio en el centro mientras que en los extremos, varias unidades de filtro están dispuestas en uno o dos lados del corredor de dos niveles, siendo el nivel superior el piso de operación y el nivel más bajo la galería de tuberías.

### 16.5 CONSTRUCCION

Como se explicó en las secciones anteriores, un filtro rápido consiste en un tanque que contiene el sistema de desagüe inferior, el lecho de filtro y el agua sobrenadante. Mayormente el tanque de filtro es hecho de cemento reforzado, rectangular y con paredes verticales. El diseño de la estructura de concreto sigue las reglas comunes con la dificultad agregada que las estructuras que retienen el agua deben ser herméticas. Se debe proveer una cubierta amplia de concreto para proteger las barras de refuerzo contra la corrosión.

Se debe colocar todas las barras lo suficientemente distantes para permitir que el concreto las rodee completamente. Se debe mantener al mínimo las tensiones de carga. Cualquier tensión que se desarrolle en el concreto debido al secado, contracción, cambios de temperatura y diferencias en la subsidencia del suelo, debe estar limitada en lo posible, subdividiendo el edificio en un número de secciones independientes conectadas con uniones herméticas de expansión. La mezcla de concreto del contenido de cemento y



la colocación de la mezcla debe buscar, en la medida de lo posible, una completa impermeabilidad y la menor contracción por secado durante el endurecimiento. Nunca se debe usar un acabado de yeso. Se puede obtener un buen acabado usando contraventanas suaves, por ejemplo, hechas de madera laminada. Para evitar el corte de circuito del flujo de agua a lo largo de las paredes de la caja de filtro, la contraventana interior opuesta al lecho de filtro debe ser hecha de planchas no planas colocadas horizontalmente. Cuando sea posible, se debe colocar los filtros sobre la napa más elevada de agua subterránea, si fuera necesario en terreno elevado.

En el pasado se desarrolló numerosos sistemas de desagüe inferior (popularmente conocidos como "fondos de filtro") pero desafortunadamente muchos son muy caros o no pueden asegurar una distribución uniforme del agua de lavado en todo el lado inferior del lecho de filtro. El sistema simple descrito anteriormente, que usa laterales perforados, puede construirse de tal forma que se obtenga una buena distribución del agua de lavado. Tiene la ventaja adicional de que se le puede hacer de materiales localmente disponibles usando conocimientos locales. Otra buena solución es el sistema de fondo falso y colador de desagüe inferior. Consiste en losas de concreto prefabricado de aproximadamente  $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ , colocadas sobre y ancladas a pequeñas columnas de concreto como se muestra en la Figura 16.21.

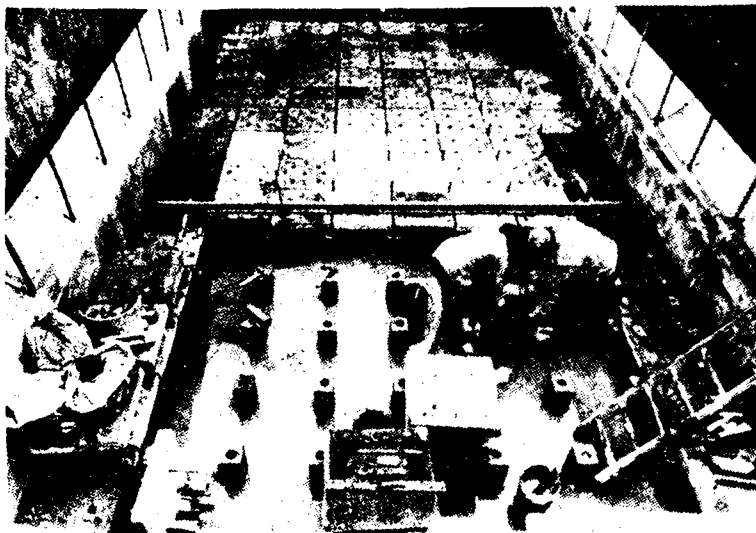


Figura 16.21

Sistema de desagüe inferior con fondo falso y coladores

Las losas están provistas de huecos, aproximadamente 60 por metro cuadrado, en los cuales se coloca los coladores (Figura 16.22). Las hendiduras en estos coladores son estrechas, aproximadamente de 0.5 mm, ofreciendo una resistencia suficiente contra el paso del agua de lavado para una distribución pareja del agua. Este sistema de desagüe inferior permite que se coloque la arena del filtro directamente sobre el fondo del filtro con los coladores y no es necesaria ninguna capa complementaria de grava.

El trabajo de un filtro rápido lo realiza el lecho de filtro y se debe prestar una atención considerable a su composición. La arena como material de filtro ha demostrado dar resultados excelentes, es barata y por lo general disponible; y por estas razones, ampliamente usada. Para los lechos de filtro simples-medios no hay razón para usar otros materiales de filtro, excepto en casos muy especiales. Para evitar una clasificación hidráulica durante el retrolavado, lo que llevaría a los granos finos a la parte superior y a los granos gruesos al fondo del lecho de filtro, se debe usar arena de filtro lo más uniforme posible en tamaño. Debe tener un coeficiente de uniformidad inferior a 1.7, y preferiblemente tan bajo como 1.3. Los requerimientos para la graduación de la arena de filtro son dados mejor como porcentajes máximos y mínimos de material que pasa por varias cribas de mallas de tamaño estándar.

Para una especificación gráfica, se puede trazar un diagrama como en la Figura 16.23.

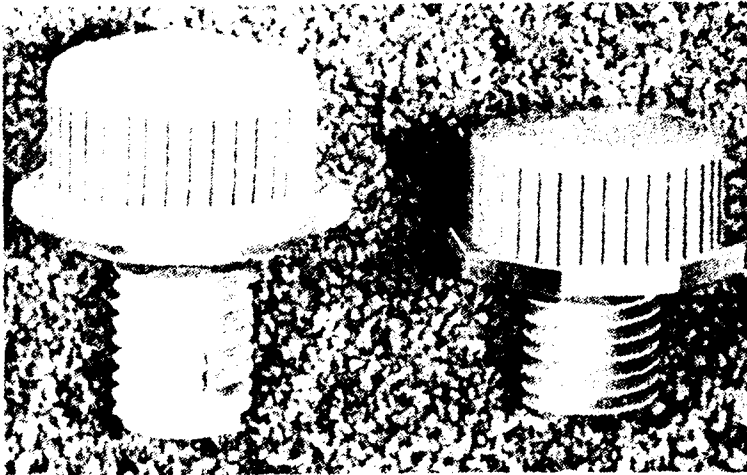


Figura 16.22  
Coladores hechos de plástico

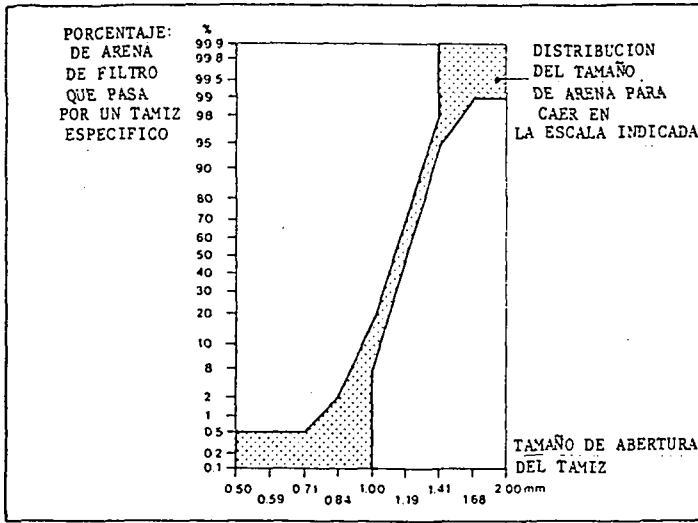


Figura 16.23  
Especificación de la arena de filtro para el pretratamiento del agua de río

#### 16.6 FILTRACION RAPIDA APLICADA A PEQUEÑAS COMUNIDADES

Debido a su construcción y diseño complejo y a la necesidad de operación explícita, los filtros rápidos no son muy adecuados para su aplicación en plantas de tratamiento de agua a escala de pequeñas comunidades. Esto es especialmente cierto para su uso como filtros finales en el tratamiento de agua turbia de río. Entonces, la seguridad bacteriológica del agua filtrada tiene que ser asegurada mediante la posclorinación con todas sus dificultades asociadas. Sería mejor usar los filtros lentos de arena que ofrecen un filtrado bacteriológicamente seguro, pero estos pueden sufrir de atoro rápido causado por la turbiedad presente en el agua cruda.

Se puede remover la materia suspendida del agua cruda a través de varios procesos tales como: almacenamiento, coagulación y floculación y sedimentación. Sin embargo, sólo los filtros rápidos son capaces de producir en forma constante agua clara con una turbiedad inferior a 5 UTF. Esto asegurará la operación fluida de cualquier filtro lento siguiente. Debe haber pocas objeciones contra una aplicación tal de los filtros rápidos. El uso de la filtración rápida para la remoción de hierro y manganeso del agua subterránea también presenta pocos problemas, ya que el riesgo para la salud de la posible contaminación del agua tratada será pequeño.

Suponiendo un uso de agua de 40 litros/persona/día, la capacidad requerida de filtración de agua para 10,000 personas sería de 400 m<sup>3</sup>/día ó 40 m<sup>3</sup>/hora para un período diario de operación de 10 horas. Con una tasa de filtración de 5 m/hora, esto requiere un área de lecho de filtro de 8 m<sup>2</sup>, la cual se puede proveer en tres filtros circulares de 2 m de diámetro cada uno (un filtro como reserva).

Probablemente sería mejor que el sistema de desagüe inferior estuviera hecho de laterales perforados (véase Sección 16.4) cubiertos con capas graduadas de grava, piedras rotas y ladrillos duros cincelados al tamaño deseado. Cuando se dispone de arena gruesa se le debe graduar usando tamices adecuados. Los límites de graduación serían 0.8 mm-1.2 mm para los prefiltros; 1.0 mm-1.5 mm para los filtros de remoción del hierro y manganeso. Para los prefiltros el espesor del lecho de arena se debe tomar en 1.0 m y para los filtros de remoción del hierro y manganeso en 1.5 m. En el caso que no se pueda obtener la arena, se puede usar materiales similares, tales como piedras quebradas, ladrillos, carbonato de calcio cristalino, dolomita, etc. Estos deben ser graduados a un tamaño aproximado 40 por ciento más grande que los tamaños mencionados anteriormente. En algunas instancias, las cáscaras quemadas de arroz y las cortezas quebradas de coco han proporcionado resultados aceptables. Antes de habilitar el filtro se le debe lavar por corriente de agua durante aproximadamente media hora para limpiar el material de filtración.

Se puede fijar la profundidad del agua sobrenadante entre 1.5 y 2 m. Entonces la caja de filtro tendrá una profundidad total de 3.5-4 m.

La mayor dificultad encontrada en la filtración rápida a escala de pequeñas comunidades es el proceso de retrolavado. No es económico usar una bomba de agua de lavado. En el ejemplo presentado anteriormente, se necesitaría una capacidad de 100-200 m<sup>3</sup>/hora, en duplicado para considerar fallas mecánicas. Comparada con la capacidad de planta de 40 m<sup>3</sup>/hora, ésta es una bomba enorme que incluye una inversión considerable y elevados costos de operación. Con un reservorio elevado de agua de lavado de un volumen de 20 m<sup>3</sup>, se puede reducir la capacidad de bomba a 10 m<sup>3</sup>/hora, pero se debe tener en cuenta los costos del tanque. Para poblados con edificios bajos, la presión en el sistema de distribución, por lo general, no necesita ser mayor a 6 m. En estos casos, una buena solución será usar un reservorio elevado de servicio para el retrolavado de los filtros. No será necesaria ninguna bomba separada.

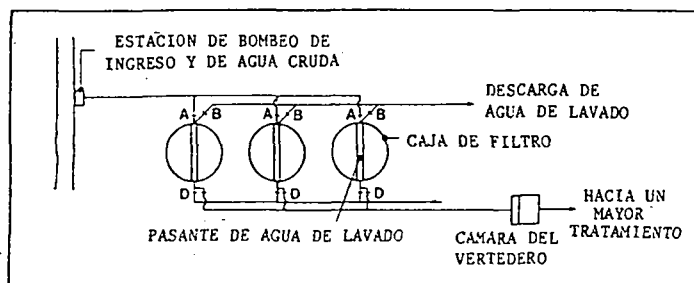


Figura 16.24  
Distribución general de una planta de filtración rápida

En la Figura 16.24 se muestra la distribución de la planta de filtración rápida descrita anteriormente. El agua cruda ingresa al filtro a través de la válvula A y cae en la canaleta de agua de lavado para dispersar la energía

de flujo. Las tuberías ramales en las cuales se coloca la válvula A, tienen un diámetro pequeño que proporciona suficiente resistencia de flujo (por ejemplo 0.5 m de la carga) para asegurar una distribución pareja del agua cruda sobre las unidades individuales de filtro. El agua filtrada es descargada a través de la válvula D y pasa sobre un vertedero colocado en la cámara de derrame. La parte superior del vertedero es colocada tan alto que el nivel más bajo de agua cruda en el tanque de filtro estará por lo menos 0.2 m sobre el lecho de filtro. Debido al atoro, el nivel del agua sobrenadante se elevará hasta alcanzar el nivel de presión del agua en la tubería de abastecimiento; ya no ingresará más agua al filtro. Entonces, se debe limpiar el filtro alimentando el agua de lavado a través de la válvula C y descargándola a través de la válvula B. El agua sucia de lavado debe ser clarificada mediante sedimentación después de lo cual se le puede descargar de nuevo hacia el río a cierta distancia aguas abajo del lugar de captación del agua cruda.

## 16.7 FILTRACION GRUESA

Algunas veces puede ser adecuado un tratamiento más limitado que la filtración rápida usando un lecho de arena para el tratamiento del agua cruda. Esto se puede obtener usando grava o fibras de plantas como material de filtro. En el filtro de flujo ascendente de la Figura 16.6 se usará tres capas que tengan tamaños de grano de 10-15 mm; 7-10 mm y 4-7 mm desde el fondo hacia arriba y con un sistema simple de desagüe inferior. Este filtro grueso (debastador) tendrá poros grandes que no están expuestos al atoro rápido. Se puede usar una tasa elevada de filtración hasta de 20 m/hora. Los poros grandes también permiten la limpieza a ritmo relativamente bajo de retrolavado, ya que no se necesita ninguna expansión del lecho de filtro. El retrolavado de los filtros gruesos toma un tiempo relativamente largo, aproximadamente 20-30 minutos.

Otra posibilidad es el uso de filtros horizontales, como se muestra en la Figura 16.25. Estos tienen una profundidad de 1-2 m subdivididos en tres zonas, cada una de aproximadamente 5 m de largo y compuestas de grava con un tamaño de 20-30 mm, 15-20 mm y 10-15 mm. La tasa de flujo horizontal del agua, calculada sobre toda la profundidad, será de 0.5-1.0 m/hora.

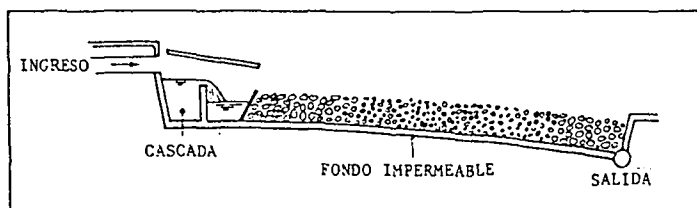


Figura 16.25  
Filtro horizontal de grava

Esto representa una carga muy baja de superficie del filtro, de sólo 0.03-0.10 m/hora. Se requerirá un área más grande, pero la ventaja es que el atoro del filtro se realizará muy lentamente, de tal forma que se necesitará la limpieza sólo después de un período de años. Esta limpieza se realiza excavando y lavando el material de filtro después de lo cual se le vuelve a colocar en su sitio.

Se ha usado fibras de coco como material de filtro en una unidad experimental similar a un filtro de arena. El lecho de filtro tiene un espesor de sólo 0.3-0.5 m y la profundidad del agua sobrenadante aproximadamente 1 m. Se opera el filtro a tasas de 0.5-1 m/hora, lo cual da una longitud de jornada del filtro de varias semanas. Para limpiar el filtro primero se le drena, después de lo cual se saca y se desecha las fibras de coco. Se vuelve a empaquetar el filtro con material nuevo que previamente ha sido remojado en agua por 24 horas para remover la mayor cantidad posible de materia orgánica. Los filtros de fibra de coco parecen ser capaces de soportar fluctuaciones considerables en su carga mientras producen un efluente de calidad casi constante. Los experimentos muestran una conducta remarcablemente constante de los filtros de fibra de coco. La remoción total de turbiedad varió entre el 60 y el 80 por ciento.

## FILTRACION RAPIDA

Arboleda, J.  
METODOS SIMPLIFICADOS DE TRATAMIENTO DE AGUA  
Nuevos Métodos de Tratamiento de Agua  
CEPIS, Lima, agosto 1972 (Manual No. 14)

Arboleda, J.  
HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS OF CONSTANT AND DECLINING FLOW FILTRATION  
En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 66(1974) No. 2, pp. 87-93

Baylis, J.R.  
VARIABLE RATE FILTRATION  
En: Pure Water, Vol. XI (1959) No. 5, pp. 86-114

Baylis, J.R.  
EXPERIENCE WITH HIGH-RATE FILTRATION  
En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 42 (1950) No. 7, pp. 687-694

Camp, T.R.  
WATER TREATMENT  
Handbook of Applied Hydraulics (2nd Edition)  
McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1962

Cleasby, J.L.  
FILTER RATE CONTROL WITHOUT RATE CONTROLLERS  
En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 61 (1969) No. 4, pp. 181-186

Cleasby, J.L.; Williamson, M.M.; Baumann, E.R.  
EFFECT OF FILTRATION RATE CHANGES ON QUALITY  
En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 55 (1963) No. 7, pp. 869-875

Conley, W.K.  
EXPERIENCE WITH ANTHRACITE - SAND FILTERS  
En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 53 (1961) No. 12, pp. 1473-1483

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.  
WATER AND WASTEWATER ENGINEERING  
Vo. 2, Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal, John Willey & Sons, Nueva York, 1968

Hudson, H.E.  
DECLINING RATE FILTRATION  
En: Journal Am. Water Works Assoc. Vol. 51 (1959) pp. 1455-1461

Robeck, G.G.  
MODERN CONCEPTS IN WATER FILTRATION  
PAHO Symposium on Modern Water Treatment Methods, Asunción (Paraguay), agosto 14, 1972  
CEPIS, Lima, 1972 (Manual No. 14)

Shull, K.E.  
EXPERIENCES WITH MULTIPLE-BED FILTERS  
En: Journal Am. Water Works Assoc., marzo 1965, pp. 230-314

## 17. DESINFECCION

### 17.1 INTRODUCCION

El más importante requerimiento individual del agua de bebida es que debe estar libre de cualquier microorganismo que pueda transmitir enfermedades al consumidor. Procesos tales como almacenamiento, sedimentación, coagulación y floculación, y filtración rápida, reducen en grado variable el contenido bacteriológico del agua. Sin embargo, estos procesos no pueden asegurar que el agua que producen sea bacteriológicamente segura. Frecuentemente se necesitará una desinfección final. En casos en los que no se dispone de otros métodos de tratamiento, se puede recurrir a la desinfección como único tratamiento contra la contaminación bacteriana del agua potable. La desinfección del agua se encarga de la destrucción, o al menos de la desactivación completa, de los microorganismos dañinos presentes en el agua. Se le realiza usando medios físicos o químicos. Los siguientes factores influyen en la desinfección del agua:

- 1) La naturaleza y número de los organismos a ser destruidos.
- 2) El tipo y concentración del desinfectante usado.
- 3) La temperatura del agua a ser desinfectada: cuanto más alta sea la temperatura, más rápida es la desinfección.
- 4) El tiempo de contacto; el efecto de desinfección se vuelve más completo cuando los desinfectantes permanecen más tiempo en contacto con el agua.
- 5) La naturaleza del agua a ser desinfectada; si el agua contiene materia particulada, especialmente de naturaleza coloidal y orgánica, el proceso de desinfección es generalmente obstaculizado.
- 6) El pH (acidez/alcalinidad) del agua.
- 7) Mezcla; una buena mezcla asegura la adecuada dispersión del desinfectante a través de toda el agua y, así, promueve el proceso de desinfección.

### 17.2 DESINFECCION FISICA

Los dos métodos principales de desinfección física son: el hervido y la radiación con rayos ultravioletas.

Hervido, es una práctica segura y tradicional que destruye microorganismos patógenos tales como virus, bacterias, cercaria, quistes y huevos. Si bien es efectivo como tratamiento casero, no es un método factible para abastecimientos públicos de agua. Sin embargo, en situaciones de emergencia se puede usar el hervido del agua como medida temporal.

La radiación de luz ultravioleta, es un método efectivo de desinfección para aguas claras, pero su efectividad es reducida significativamente cuando el agua es turbia o contiene constituyentes tales como nitrato, sulfato y



hierro en su forma ferrosa. Este método de desinfección no produce ningún residuo que proteja al agua contra una nueva contaminación y que podría servir para propósitos de control y vigilancia. La luz ultravioleta ha sido usada para desinfección en varios países desarrollados, pero se le aplica muy rara vez en países en desarrollo.

### 17.3 DESINFECTANTES QUIMICOS

Un buen desinfectante químico debe poseer las siguientes características importantes:

- Rápido y efectivo en eliminar microorganismos patógenos presentes en el agua;
- Fácilmente soluble en agua en las concentraciones requeridas para la desinfección y capaz de proveer una acción residual;
- Que no imparta sabor, olor o color al agua;
- Que no sea tóxico para la vida humana o la animal;
- Fácil de detectar y de medir en el agua;
- Fácil de manipular, transportar, aplicar y controlar;
- De fácil disponibilidad a un costo moderado.

Las sustancias químicas que han sido usadas exitosamente para la desinfección son: cloro, compuestos de cloro y yodo dosificados en forma adecuada; ozono y otros oxidantes como permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno. Cada uno de estos tiene sus ventajas y limitaciones.

Cloro y compuestos de cloro: Su capacidad para destruir patógenos con bastante rapidez y su amplia disponibilidad los hacen muy adecuados para la desinfección. Su costo es moderado y son, por esta razón, ampliamente usados como desinfectantes a través del mundo.

Yodo: A pesar de sus propiedades atractivas como desinfectante, el yodo tiene serias limitaciones. Se requiere dosis adecuadas (10-15 mg/l) para alcanzar una desinfección satisfactoria. No es efectivo cuando el agua a ser desinfectada presenta color o turbidez. La elevada volatilidad del yodo en soluciones acuosas es también un factor en contra de su uso, excepto en situaciones de emergencia.

Permanganato de potasio: Este es un poderoso agente oxidante y se ha descubierto que es efectivo contra el vibrión del cólera pero no contra otros patógenos. Deja manchas en el contenedor y por esto no es un desinfectante muy satisfactorio para abastecimientos públicos de agua.

Ozono: El ozono es cada vez más usado para la desinfección de abastecimientos de agua potable en países industrializados, ya que es efectivo en la eliminación de compuestos que dan sabor o color objetables al agua. Al igual que los rayos ultravioleta, el ozono no deja normalmente ningún residuo medible, cuya detección pudiera servir para controlar el

proceso. La ausencia de un residuo también significa que no hay protección contra una nueva contaminación del agua después de su desinfección. Los elevados costos de instalación y operación y la necesidad de un suministro continuo de energía hacen que el uso del ozono no sea una práctica recomendada para países en desarrollo.

#### 17.4 CLORACION

La desinfección del agua mediante cloración, introducida por primera vez a comienzos del siglo XX, fue quizás el evento tecnológico más importante en la historia del tratamiento del agua. La cloración de abastecimientos de agua en países en desarrollo es sumamente importante. El saneamiento deficiente, que resulta en la contaminación fecal de las fuentes de agua, plantea frecuentemente la amenaza más grande a la salud humana. En muchos casos, la cloración efectiva de los abastecimientos de agua ha logrado una reducción sustancial de aquellas enfermedades entéricas que primariamente están relacionadas con el agua. Estudios recientes, aún en progreso, han enunciado la posibilidad de que los compuestos orgánicos ("halogenados") formados cuando se añade cloro al agua, puedan causar ciertas formas de cáncer en el hombre. Debido al número de variables involucradas, hasta ahora no se dispone de ninguna evidencia definitiva. Por otro lado, las propiedades desinfectantes del cloro están bien establecidas y, hasta la fecha, deben compensar los posibles efectos laterales surgidos cuando se les usa para salvaguardar la salud pública.

El cloro es un gas tóxico de color amarillo-verdoso, que se encuentra en la naturaleza sólo en estado combinado, principalmente con el sodio como sal común. Tiene un olor característico penetrante e irritante, es más pesado que el aire y se le puede comprimir para formar un líquido claro de color ámbar. El cloro líquido es más pesado que el agua. Se vaporiza bajo temperatura y presión atmosférica normal. Comercialmente se fabrica el cloro mediante la electrólisis de salmuera, con producción de soda cáustica e hidrógeno como productos secundarios. Como gas seco, el cloro no es corrosivo, pero ante la presencia de humedad se vuelve altamente corrosivo para todos los metales, excepto la plata y el plomo. El cloro es ligeramente soluble en el agua, aproximadamente 1 por ciento por peso en 10°C.

Cal clorada ("Polvo blanqueador o desmanche"): Antes del descubrimiento del cloro líquido, se lograba la cloración mayormente mediante el uso de cal clorada. Es una combinación suelta de cal apagada y gas de cloro, con la composición aproximada de  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OCl})_2$ .  $2\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Cuando se le añade al agua, se descompone para producir ácido hipocloroso,  $\text{HOCl}$ . Cuando está fresca, la cal clorada tiene un contenido de cloro de 33 a 37 por ciento. La cal clorada es inestable; al exponerla al aire, la luz y la humedad, estos agentes hacen que el contenido de cloro descienda en forma rápida. Se debe almacenar el compuesto en lugar oscuro, fresco y seco, en contenedores cerrados y resistentes a la corrosión.

Hipoclorito de alta resistencia\*: Estos no sólo son el doble de fuertes que la cal clorada (60 a 70 por ciento de contenido disponible de cloro) sino que también retienen su fuerza original durante más de un año bajo condiciones normales de almacenamiento. Se les puede obtener en paquetes de 2.3 kg y en latas de hasta 45 kgs; también están disponibles en forma granular o de tabletas.

Hipoclorito de sodio: Como solución, el hipoclorito de sodio (NaOCl) por lo general contiene de 12 a 15 por ciento de cloro disponible en el producto comercial. Las soluciones caseras blanqueadoras de hipoclorito de sodio por lo general contienen sólo del 3 al 5 por ciento de cloro disponible.

Son las características del cloro y de sus compuestos las que han dictado los métodos para su manejo y aplicación en la práctica de desinfección del agua.

Práctica de cloración: Se puede agrupar las prácticas de cloración bajo dos categorías, dependiendo del nivel deseado de cloro residual y del punto de aplicación.

Cuando se requiere proveer un residual ("cloro residual") y el tiempo de contacto es limitado, es una práctica común tener en cuenta una cloración que dé un residual disponible libre. Si se utiliza una cloración que dé un residual disponible combinado, se aplica el cloro al agua para producir, con amoníaco natural o agregado, un efecto residual combinado (Figura 7.1).

La precloración es la aplicación de cloro anterior a cualquier otro tratamiento. Frecuentemente esto tiene el propósito de controlar las algas, el sabor y el olor. La poscloración se refiere a la aplicación del cloro después de otros procesos de tratamiento, particularmente después de la filtración.

Demanda de cloro: Esta es la diferencia entre la cantidad de cloro agregada al agua y la cantidad de cloro libre o combinado disponible que queda al final de un período específico de contacto.

Cloro residual: Se dispone de varios métodos para medir el cloro residual en el agua. Aquí se presenta dos de los métodos más simples.

a) Método Dietil-para-fenilendiamina (DPF)\*\*

El cloro libre disponible reacciona instantáneamente con la N-dietil-para-fenilendiamina produciendo una cloración roja siempre que el yodo esté ausente. Se usa soluciones estándares de permanganato de potasio DPF para producir colores de varias intensidades. Se mide el color producido cuando se agrega DPF mediante el método colorimétrico para indicar la concentración de cloro residual. El color producido por este método es más estable que el del Método Ortotolidino.

\* Las marcas comerciales incluyen: "HTH", "Perchlorin" y "Pittchlor".

\*\* Vigilancia de la calidad del agua potable. Serie de Monografías OMS 63, (1976).

b) Método Ortotolidino

La Ortotolidina, un compuesto aromático, se oxida en una solución ácida mediante el cloro, cloraminas y otros oxidantes para producir un complejo de color amarillo cuya intensidad es directamente proporcional a la cantidad de oxidantes presentes. El método es adecuado para la determinación rutinaria de residuos de cloro que no exceden los 10 mg/l. La presencia de color natural, turbiedad y nitrato interfiere con el desarrollo del color. Se ha demostrado que la ortotolidina produce cáncer y en muchos países se le ha retirado de la producción.

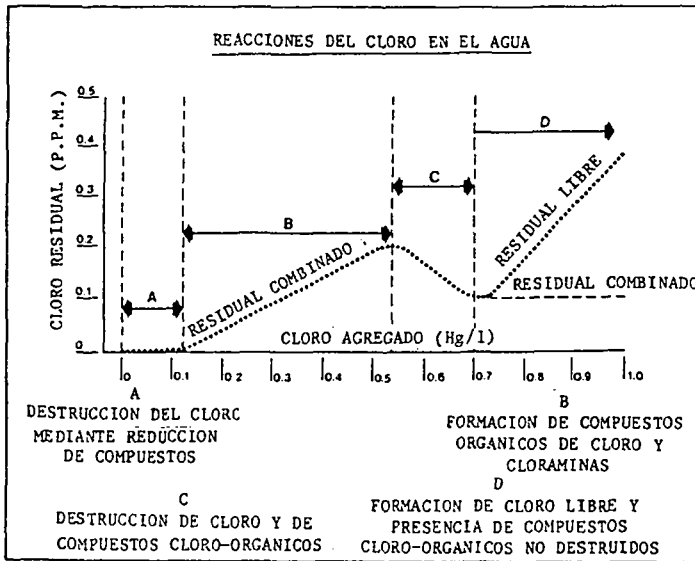


Figura 17.1

Reacciones del cloro en el agua

### 17.5 TECNOLOGIA DE CLORACION PARA EL ABASTECIMIENTO RURAL DE AGUA

El agua subterránea que se obtiene de pozos poco profundos sigue siendo la fuente principal de abastecimiento para millones de personas en pequeñas comunidades. Un número de encuestas han revelado que frecuentemente los pozos excavados se contaminan. Las fuentes de agua superficial, tales como los estanques de aldeas, canales y ríos, por lo general también están contaminadas. Ya que no es ni factible ni siempre necesario establecer un tratamiento completo del agua de estas fuentes, por lo menos se debe proveer una desinfección adecuada para proteger la salud pública.

Técnicamente, la desinfección mediante cloración puede ofrecer una solución satisfactoria para abastecimientos rurales de agua y de pequeñas comunidades. Por lo general, la desinfección mediante cloro gaseoso no es factible para abastecimientos pequeños de agua, debido a los problemas de aplicación de cantidades pequeñas de gas en forma precisa y en una base continua. Es posible que la alternativa recaiga en los compuestos de cloro.

Polvo blanqueador o "desmanche": La cal clorada, polvo blanqueador o "desmanche" (véase Anexo 4 para los detalles) es un compuesto de cloro barato y de fácil obtención. Esta sustancia química es fácil de transportar y no es peligrosa de manipular si se le suministra en un contenedor adecuado. Es un polvo suelto blanco o amarillento que contiene aproximadamente del 33 al 37 por ciento del cloro disponible. Es inestable y perderá cloro durante el almacenamiento. Ante la presencia de la humedad, el polvo blanqueador se vuelve corrosivo y es necesario usar contenedores resistentes a la corrosión hechos de madera, cerámica o plástico. Estos deben ser almacenados en lugar oscuro, fresco y seco. Para minimizar la pérdida de cloro, se recomienda una concentración máxima de 5 por ciento para una solución de polvo blanqueador.

Desinfección de pozos excavados abiertos: Ya que se seguirá usando los pozos excavados abiertos en número considerable como fuentes de agua potable en comunidades rurales y pequeñas, es deseable emplear métodos simples para desinfectar el agua de estos pozos.

Cloración en vasija: Se llena la mitad de una vasija de arcilla de una capacidad de 7 a 10 litros, con huecos de 6 a 8 mm de diámetro en el fondo, con guijarros y gravilla de 20-40 mm de tamaño. Se coloca el polvo blanqueador y la arena (en una mezcla de 1 a 2) en la parte superior de la gravilla y se llena la vasija con guijarros hasta el cuello (Figura 17.2). Luego se hace descender la vasija abierta en el pozo.

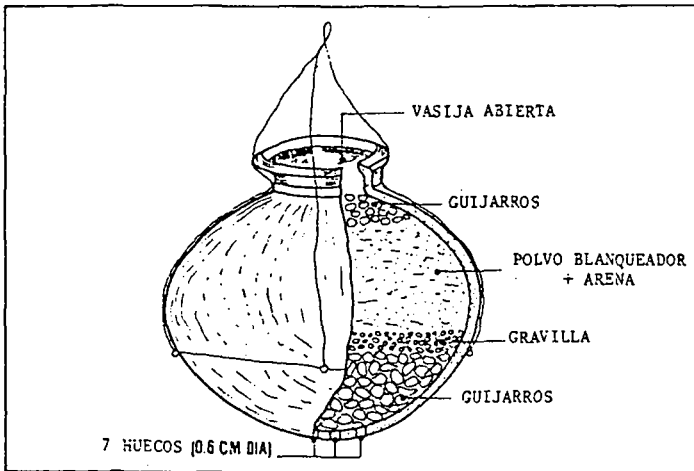
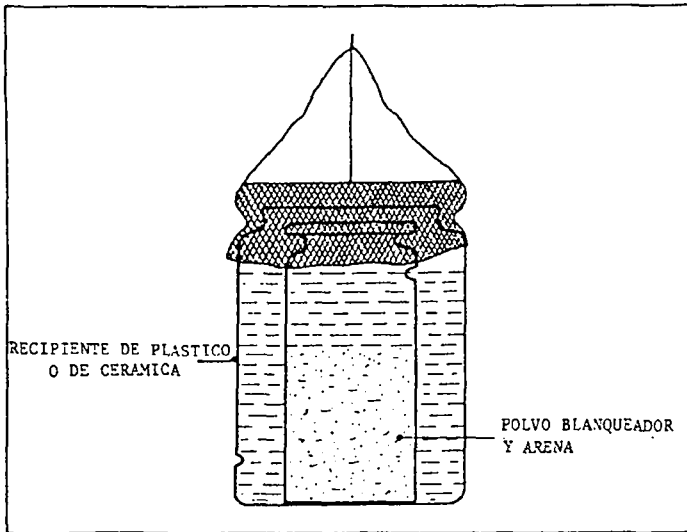


Figura 17.2  
Vasija de cloración con huecos en el fondo

Para un pozo cuyo ritmo de extracción de agua es de 1,000-1,200 litros/día, una vasija que contenga aproximadamente 1.5 kg de polvo blanqueador debe proveer la cloración adecuada para aproximadamente una semana.

**Sistema de doble vasija:** Cuando se usa una vasija de cloración simple en un pozo casero, puede que proporcione un contenido demasiado elevado de cloro al agua ("sobrecloración"). En tales situaciones, se ha descubierto que una unidad consistente en dos vasijas cilíndricas, una dentro de la otra, trabaja bien (Figura 17.3). Se llena la vasija exterior con una mezcla húmeda de 1 kg de polvo blanqueador con 2 kg de arena gruesa hasta un poco por debajo del nivel del hoyo y luego se coloca dentro de la vasija exterior. Se amarra la boca de la vasija exterior con una hoja de polietileno y la unidad se hace descender en el pozo con la ayuda de una soga. Se ha descubierto que esta unidad trabaja en forma efectiva durante 2 a 3 semanas en pozos caseros de una capacidad de 4,500 litros de donde se extrae el agua en un ritmo de 400-450 litros/día.



Según: Rajagopalan & Shiffman

Figura 17.3  
Clorador de doble vasija

**Clorador de goteo:** Un dispositivo alternativo para desinfectar pozos es el clorador de alimentación por goteo (Figura 17.4). Se puede producir el atoro de la salida del goteo debido a los depósitos de carbonato de calcio que se forman cuando la solución de polvo blanqueador entra en contacto con el dióxido de carbono de la atmósfera. Se puede insertar una salida especial de goteo similar a la usada en transfusiones médicas, en el tubo de salida justo antes de la llave de cierre. El tubo de salida se extiende directamente dentro del pozo y se le introduce en el agua. Se puede colocar el contenedor en el parapeto del pozo.

Depósitos de alimentación de solución: Usan una carga constante y han sido operados exitosamente en muchos lugares. La Figura 17.5 muestra un dispositivo de cuenca flotante.

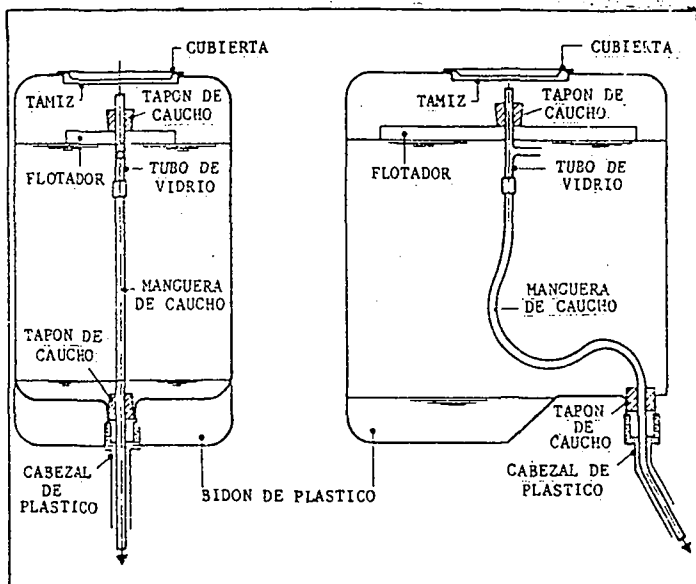


Figura 17.4  
Equipo para alimentación de la solución de cloro

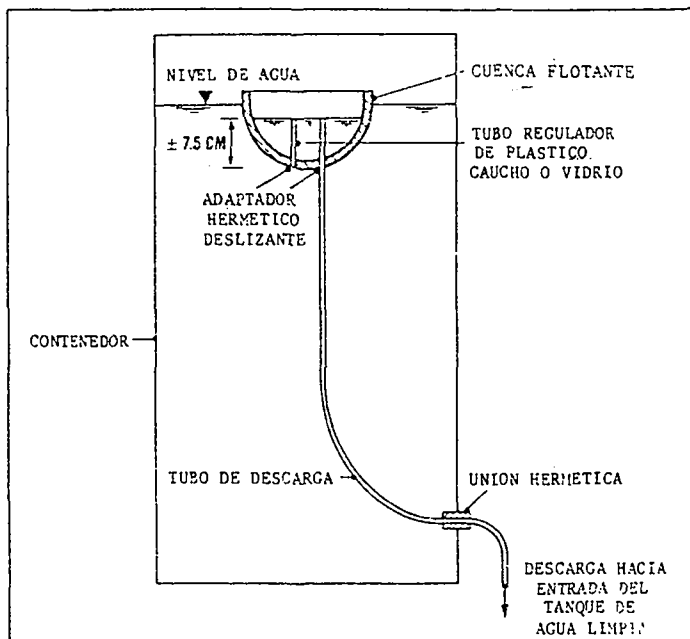


Figura 17.5  
Alimentador de solución de carga constante para compuestos de cloro

Tanto el tubo regulador como el tubo de descarga deben tener un adaptador deslizante hermético en el cuenco flotante. Los tubos se adaptan a un nivel tal que la solución ingrese al cuenco y fluya por el tubo de descarga en el ritmo deseado de alimentación. Se puede establecer otro ritmo de alimentación variando los niveles de los tubos de regulación y de descarga.

Proporcionando dispositivos para abastecimientos con bomba: Cuando se bombea agua desde la fuente hacia un reservorio elevado de servicio y se le abastece mediante gravedad al sistema de distribución, se puede dosificar una solución de polvo blanqueador como en la Figura 17.6. Desde el reservorio de la solución de polvo blanqueador se hace una conexión directa hacia la línea de succión de la bomba. Un uno por ciento de solución de polvo blanqueador preparada anteriormente y a la que se le ha permitido asentarse para remover impurezas, es vaciado en el contenedor de la solución. Debe proveer un abastecimiento suficiente para más de un día. Se debe evitar el ingreso del aire en el lado de succión de la bomba. Es necesario cerrar la línea de alimentación de la solución cuando se detiene la bomba.

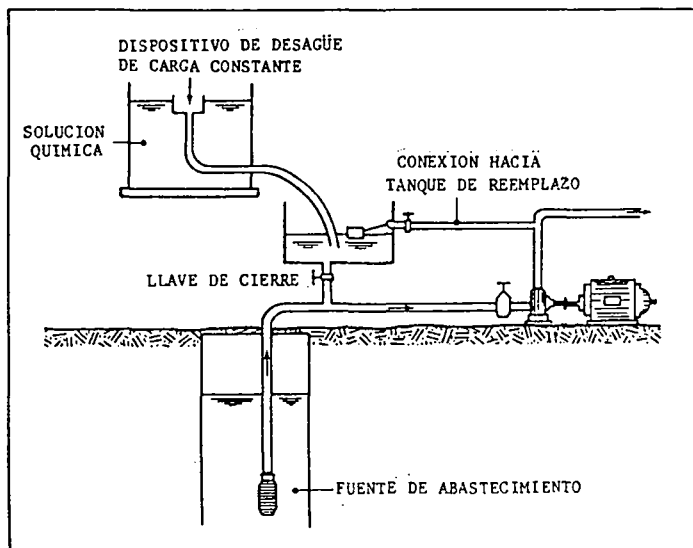


Figura 17.6  
Arreglo de cloración para abastecimientos con bomba

## 17.6 DESINFECCION USANDO GAS DE CLORO

La forma en que se debe usar el desinfectante se rige por varios factores tales como la cantidad de agua a ser tratada, costo y disponibilidad de sustancias químicas, el equipo necesario para su aplicación y la habilidad



requerida para operación y control. Cuando la cantidad de agua a ser tratada es superior a los 500,000 litros diarios, se ha descubierto que el gas de cloro es el más económico. Para abastecimientos pequeños, se dispone de controladores de gas de cloro montados en el cilindro, pero estos no pueden alimentar con precisión cantidades muy pequeñas de gas. Se dispone de dos métodos diferentes para la aplicación controlada del gas de cloro:

- 1) Alimentador de solución: Primero se disuelve el gas en un volumen pequeño de agua y la solución de cloro resultante es alimentada a la corriente principal del agua a ser desinfectada. La disolución del gas en un volumen pequeño de agua promueve la dispersión completa y rápida en el punto de aplicación.
- 2) Alimentación directa: Aquí se alimenta el gas directamente al punto de aplicación. Se necesita un tipo especial de difusor o tubería perforada (de plata o plástico) para la dispersión adecuada del gas. Por lo tanto, este método no es recomendable para abastecimientos de agua pequeños y rurales.

El equipo usado para la alimentación controlada de gas de cloro se puede agrupar bajo los tipos de alimentador a presión y alimentador por aspiración. El tipo a presión consiste en un filtro de gas, válvula de detención, válvula de reducción de presión y válvula reguladora o tubo de orificio con un manómetro y sello de humedad. A pesar de la variación de presión en el cilindro de cloro, se mantiene una presión constante a través del orificio por medio de la válvula reductora de presión. Se mide la disminución diferencial de presión a través del orificio y esto constituye una indicación del ritmo del flujo de gas. El aparato para solución incluye algunos medios de introducción del gas medido en la pequeña corriente de agua, la cual transporta entonces el cloro hacia el punto de aplicación (Figura 17.7).

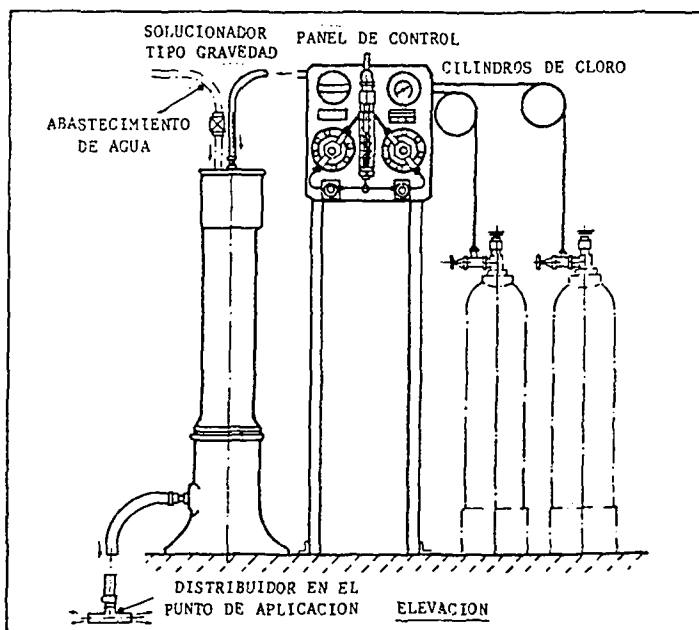


Figura 17.7

Aparato de gas de cloro con solucionador de tipo gravedad

### 17.7 DESINFECCION DE TANQUES NUEVOS, TUBERIAS Y POZOS

Tanques nuevos: Todos los tanques nuevos y reservorios deben ser desinfectados antes de ponerlos en servicio. En forma similar, los tanques que han estado fuera de servicio por reparación o limpieza también deben ser desinfectados antes de que se les vuelva a poner en servicio. Antes de la desinfección, se debe limpiar los pozos y los fondos de los tanques mediante barrido y restregado para quitar toda la suciedad y material suelto.

Uno de los métodos de desinfección usados para un tanque nuevo es llenarlo hasta el nivel de derrame con agua limpia a la cual se agrega cloro suficiente para producir una concentración de 50 mg/l. Se introduce en el agua la solución de cloro lo más pronto posible durante la operación de llenado con el fin de asegurar una mezcla y contacto completos con todas las superficies a ser desinfectadas. Después de llenar el tanque, se le permite asentarse preferiblemente durante 24 horas pero no por menos de 6 horas. Entonces se debe drenar el agua y rellenar el tanque para el abastecimiento regular.

Un segundo método, que es bastante satisfactorio y práctico bajo condiciones rurales, es la aplicación directa de una solución fuerte (200 mg/l) a las superficies internas del tanque. La superficie debe permanecer en contacto con la solución fuerte por lo menos durante 30 minutos antes de llenar el tanque con agua.

Un tercer método, que se debe usar sólo cuando no se puede usar otros, no expone las superficies superiores de las paredes a una solución fuerte de cloro. Se alimenta agua al tanque con un contenido de cloro de 50 mg/l, a un volumen tal que posteriormente cuando se llena completamente el tanque, la concentración resultante de cloro sea de aproximadamente 2 mg/l. Se conserva el agua que contiene 50 mg/l de cloro en el tanque por 24 horas antes de llenar el tanque. Entonces se puede poner en servicio el tanque sin extraer el agua usada para la desinfección siempre que el residuo final no sea demasiado elevado.

Nuevas tuberías y conductos maestros: Es probable que los conductos maestros de distribución y las tuberías se contaminen durante su colocación aun si se toma en consideración las precauciones necesarias. Por lo tanto, se les debe desinfectar antes de ponerlas en uso. Los sistemas de distribución necesitan ser desinfectados cuando se contaminan en el caso de roturas de la tubería maestra o de inundaciones.

Se debe limpiar toda tubería mediante escobillado y flujo a presión con el fin de retirar toda materia extraña.

Inmediatamente antes de usarse, se debe limpiar y desinfectar el paquete y material de unión mediante inmersión en una solución de cloro de 50 mg/l por lo menos durante 30 minutos.

Un medio práctico de aplicar la solución de cloro para la desinfección de sistemas rurales de abastecimiento de agua, consiste en lavar con flujo cada sección a ser desinfectada. Se cierra la válvula de entrada y se deja secar la sección que se va a desinfectar. Luego, se cierra el grifo de descarga o válvula y se aísla la sección del resto del sistema. Se alimenta la solución desinfectante a través de un embudo o una manguera hacia un grifo o una abertura hecha especialmente para ese propósito en la parte más elevada de la tubería. Ya que las válvulas de aire por lo general están colocadas en estos puntos altos, a menudo el retirar una válvula de aire es una forma conveniente de proveer un punto de entrada. La solución es ingresada lentamente hasta que la sección esté completamente llena. Debe ponerse cuidado en asegurar que pueda escapar el aire atrapado en la tubería. Si no existen válvulas de aire ni otros orificios, se debe desconectar una o dos conexiones de servicio para permitir la salida del aire.

## 17.8 DESINFECCION DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

Las medidas a largo plazo para la provisión de abastecimientos de agua segura, apoyadas por la higiene personal y la educación para la salud, ayudarán grandemente a proteger y promover la salud pública. Sin embargo, los desastres naturales como ciclones, terremotos e inundaciones ocurren y algunas veces resultan en una interrupción completa de los abastecimientos de agua.

Estas situaciones requieren medidas para el abastecimiento de agua segura en casos de emergencia. Ya que no hay una sola medida que sea un remedio para todas las situaciones, las siguientes pueden ser útiles para asegurar un abastecimiento de agua limpia, dependiendo de las condiciones locales y de los recursos disponibles.

Cuando el sistema regular de abastecimiento de agua se ve afectado debido a un desastre, se debe dar la prioridad máxima a volver a poner el sistema en operación; una acción similar para resolver la situación debe incluir una búsqueda completa de todas las fuentes posibles de agua dentro de una distancia razonable del área afectada. Se puede transportar el agua desde sistemas particulares de abastecimiento y desde otras fuentes mediante cisternas hasta los puntos de consumo.

Después de las inundaciones, cuando el sistema de distribución del abastecimiento de agua permanece intacto, se debe elevar la presión en las líneas de tuberías de tal forma que se evite que el agua contaminada ingrese en ellas. Como medida adicional se puede elevar temporalmente la cloración del agua en las plantas de tratamiento a una escala mayor. Se recomienda la cloración de dosaje elevado sólo en circunstancias extremas o cuando se limpia tuberías nuevas.

Tabletas de cloro y soluciones blanqueadoras: En muchos países se dispone con mucha facilidad de soluciones que contienen compuestos que son dosificados en forma de solución o de tableta\*.

Estos son bastante buenos para desinfectar cantidades pequeñas de agua pero son caros. Después de la adición de la sustancia química en la cantidad prescrita, se agita el agua y se le permite asentarse durante 30 minutos antes de consumirla. Si el agua es turbia, puede que sea necesario aumentar la dosis de la sustancia química.

---

\* Las marcas comerciales incluyen: "Halazone", "Chlor-dechlor", "Hydrochlorzone", "Hadex".

DESINFECCION

DISINFECTION FOR SMALL COMMUNITY WATER SUPPLIES

National Environmental Health Engineering Research Institute, Nagpur (India)

Rajagopalan, S.; Shiffman, M.A.

GUIDE ON SIMPLE SANITARY MEASURES FOR THE CONTROL OF ENTERIC DISEASES

World Health Organization, Ginebra, 1974

Rivas Mijares, G.

LA DESINFECCION DEL AGUA EN AREAS TROPICALES

Italgráfica, S.R.L., Caracas, 1970

SURVEILLANCE OF DRINKING WATER QUALITY

World Health Organization, Ginebra, 1976, 135 p.

## 18. CONDUCCION DEL AGUA

### 18.1 INTRODUCCION

Frecuentemente la transmisión (llamada también "conducción") del agua forma parte de un sistema de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades; en esto no difiere de los grandes esquemas. Se necesita transportar el agua desde la fuente hasta la planta de tratamiento, si existe alguna, y más allá hasta el área de distribución. Dependiendo de la topografía y las condiciones locales, se puede conducir el agua a través de conductos de flujo libre (Figura 18.1), conductos de presión (Figura 18.2) o una combinación de ambos (Figura 18.3). La transmisión del agua será ya sea bajo gravedad o mediante bombeo.

Se debe colocar los conductos de flujo libre bajo una inclinación o declive uniforme para seguir de cerca la línea piezométrica\*. Se puede colocar las tuberías de presión en cuenta ascendente o descendente según la necesidad, mientras permanezcan a una distancia suficiente por debajo de la línea piezométrica.

Para propósitos de abastecimiento público de agua, las tuberías son los medios más comunes de transmisión del agua, pero también se usa los canales, acueductos y túneles. Ya sea para flujo libre o bajo presión, por lo general los conductos de transmisión del agua requieren una inversión considerable de capital. Por lo tanto, es necesaria una consideración cuidadosa de todas las opciones técnicas y sus costos cuando se selecciona la mejor solución en un caso particular.

### 18.2 TIPOS DE CONDUCTOS DE AGUA

#### Canales

Por lo general los canales tienen una sección transversal trapezoidal, pero la forma rectangular es más económica cuando el canal atraviesa roca sólida. Las condiciones de flujo son más o menos uniformes cuando un canal tiene el mismo tamaño, inclinación y alineamiento de superficie a través de toda su longitud.

\* La inclinación de la línea piezométrica es la "gradiente hidráulica". Para canales abiertos, es la inclinación de la superficie del agua. Para conductos cerrados bajo presión (por ejemplo tuberías), la línea piezométrica toma su declive de acuerdo a la pérdida de carga por unidad de longitud de la tubería.

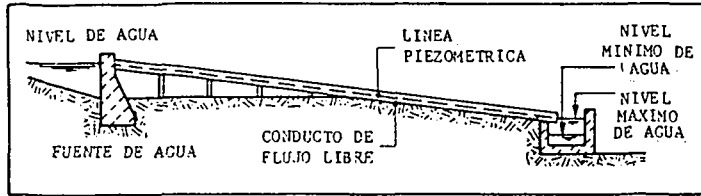


Figura 18.1  
Conducto de flujo libre

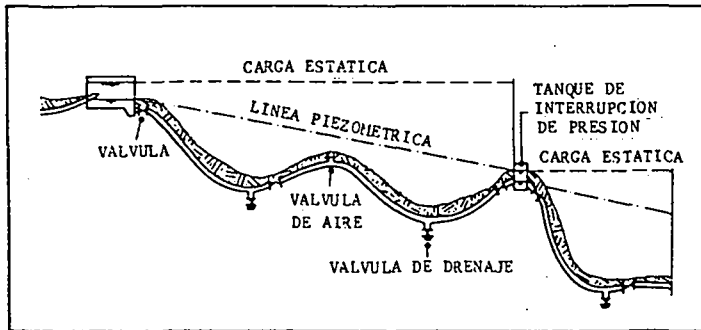


Figura 18.2  
Tubería de presión

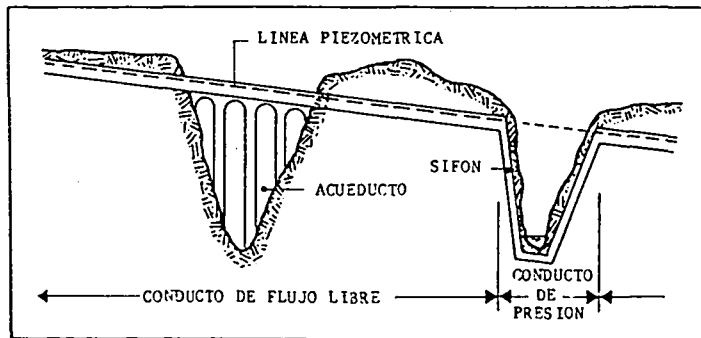


Figura 18.3  
Conducto combinado de flujo libre/presión

Los canales abiertos tienen aplicación limitada en la práctica de abastecimiento de agua en vista del peligro de contaminación. Los canales abiertos nunca son adecuados para la conducción del agua tratada pero se les puede usar para la transmisión del agua cruda.

### Acueductos y túneles

Los acueductos y túneles deben tener un tamaño tal que su flujo sea aproximadamente tres cuartos de la tasa de flujo señalada. Frecuentemente a los túneles para la transmisión de agua de flujo libre se les da la forma de herradura. Se les construye para acortar la longitud total de una ruta de transmisión de agua y para evitar la necesidad de que cualquier acueducto y conducto atraviese terreno desnivelado. Por lo general, se reviste los túneles para reducir pérdidas de carga y el ingreso de filtraciones. Sin embargo, cuando se les construye en roca estable, no requieren revestimiento.

La velocidad de flujo en estos acueductos y túneles varía entre 0.3-0.9 m/seg para conductos no revestidos y hasta 2 m/seg para conductos revestidos.

### Tuberías de flujo libre

En las tuberías de flujo libre, no habiendo presión, se puede usar materiales simples. Las tuberías de arcilla vitrificada, de cemento-asbesto y de concreto pueden ser adecuadas. Estas tuberías deben seguir de cerca la línea piezométrica.

### Tuberías de presión

Obviamente la ruta o camino que siguen las tuberías de presión está mucho menos gobernada por la topografía del área que recorren, que en el caso de los canales, acueductos y tuberías de flujo libre. Una tubería de presión puede ir en cuesta ascendente o descendente; hay una libertad considerable al seleccionar la alineación de la tubería. A menudo se prefiere una ruta a lo largo de caminos o vías públicas para facilitar la inspección (para la detección de cualquier filtración, válvulas que no trabajen, daños, etc.) y para proveer un rápido acceso con fines de mantenimiento y reparación.





Foto CIR

Figura 18.4  
Construcción de tubería de presión (Kenya)

### 18.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

#### Caudal de diseño

La demanda de agua en un área de distribución fluctuará considerablemente durante un día. Por lo general, un reservorio de servicio es disponible para acumular y nivelar la fluctuación en la demanda de agua. Este reservorio es abastecido por la tubería principal de transmisión y se le coloca en una posición adecuada para que pueda abastecer al sistema de distribución (Figura 18.5). Normalmente se diseña la tubería principal de transmisión para la capacidad de transmisión requerida para abastecer la máxima demanda de agua en una base de tasa constante. Entonces se supone que todas las variaciones horarias en la demanda de agua durante el consumo máximo, se nivelarán mediante el reservorio de servicio.

Otro factor importante es el número de horas por día en que opera la tubería principal de transmisión. Para un abastecimiento de agua con motor diesel o bombas con motor eléctrico, a menudo el bombeo diario está limitado a 16 ó menos horas. En ese caso, se necesita adaptar adecuadamente la tasa de diseño de flujo para la tubería principal de transmisión.

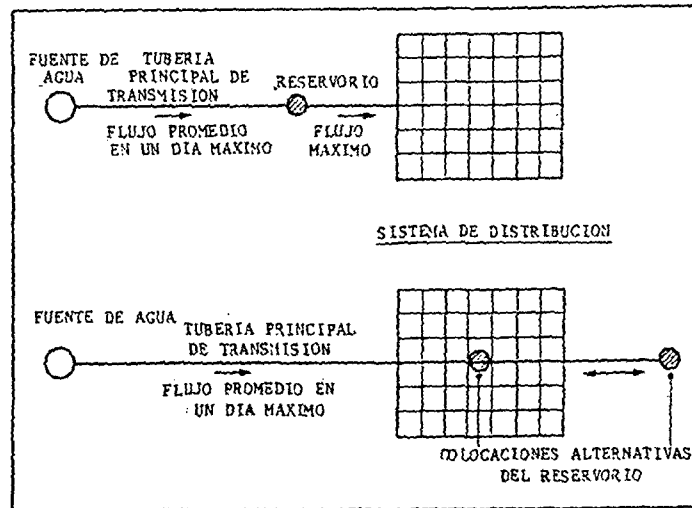


Figura 18.5  
Tubería principal de transmisión y reservorio de servicio (esquemático)

### Presión señalada

Por supuesto, la presión señalada sólo es de importancia para las tuberías de presión. Por lo general, esas tuberías siguen muy de cerca la topografía del suelo. La línea piezométrica indica la presión de agua en la tubería bajo condiciones de operación. La línea piezométrica debe estar sobre la tubería, sobre toda su longitud y para todas las tasas de flujo; de hecho, en ningún lugar debe ser la carga operativa de agua inferior a 4 m (Figura 18.6).

Se debe seleccionar el material de la tubería para que resista la presión más elevada que pueda producirse en ésta. Frecuentemente la presión máxima no ocurre bajo condiciones de operación sino que ocurre la presión estática cuando se cierra la tubería. Para limitar la presión máxima en una tubería y, así, el costo de los tubos, se le puede dividir en secciones separadas mediante un tanque de interrupción de presión. La función de un tanque de interrupción de presión es limitar la presión estática proveyendo una superficie abierta de agua en ciertos lugares a lo largo de la tubería. Cuando sea necesario se puede obturar el flujo de la sección ascendente.

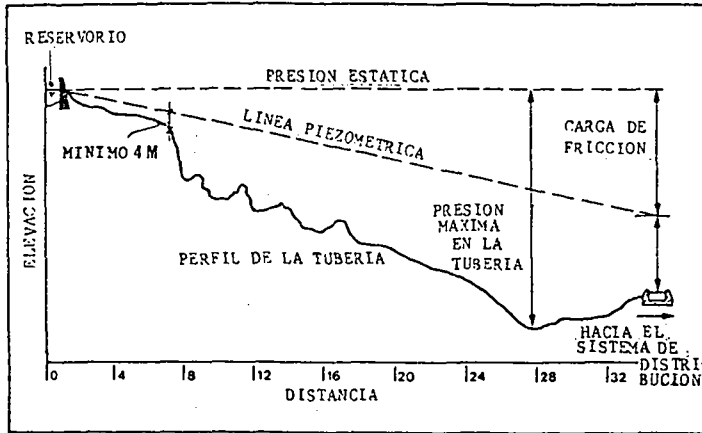


Figura 18.6  
Determinación de la presión presumida para tubería

También se puede desarrollar las presiones críticas como resultado del oleaje de presión o de golpes de ariete en la tubería. Estos son causados por el cierre instantáneo o demasiado rápido de las válvulas o por inicios o detenciones súbitas del bombeo. Los oleajes de presión resultantes crean sobrepresiones y subpresiones que pueden dañar las tuberías.

#### 18.4 DISEÑO HIDRAULICO

Para una tasa dada de flujo señalado ( $Q$ ), se puede calcular la velocidad de flujo ( $V$ ) y consecuentemente el tamaño requerido del conducto de transmisión del agua usando las siguientes fórmulas:

$$V = K.R^{2/3}.I^{1/2}$$

$V$  = Velocidad (promedio) de flujo en el conducto de agua (m/seg)

\*\*  $K$  = Coeficiente de rugosidad de las paredes y fondo del conducto (mm)

$R$  = Radio hidráulico (m)

$I$  = Gradiente hidráulico ( $m/m^1$ )

Para propósitos de diseño, el Cuadro 18.1 ofrece valores indicativos del coeficiente de aspereza para varios tipos de revestimiento en canales rectos y limpios\*.

\* En la práctica, un canal no tiene un solo valor  $C$ . Frecuentemente varía para secciones diferentes del canal y a menudo también hay variaciones estacionales.

\*\* Nota del traductor.- La fórmula corresponde a Gauckler - Strickler.

## Cuadro 18.1

Valores indicativos para la aspereza de varios tipos de revestimiento

Tipo de revestimiento	Coefficiente de rugosidad (K)
Madera plana, uniones niveladas	80
Madera aserrada, uniones desniveladas	70
Concreto con terminación a cuchara	80
Mampostería	
. Enlucido de cemento puro	70
. Enladrillado; buen acabado	65
. Enladrillado; áspero	60
Excavado	
. Tierra	45
. Grava	40
. Roca cortada suave	30
. Roca cortada dentada	25

Tuberías

La fórmula más precisa para calcular la pérdida de carga del agua que fluye a través de una tubería es la fórmula Colebrook-White ("universal"):

$$H = \frac{8\lambda}{\pi^2 g} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \cdot L = I \cdot L$$

Donde:

H = pérdida de carga (m)

L = longitud de la tubería (m)

 $\lambda$  = coeficiente de fricción

D = diámetro interno de la tubería (m)

Q = tasa de flujo (m<sup>3</sup>/s)g = factor gravitacional (aprox. 9.8 m/seg<sup>2</sup>)

I = gradiente hidráulico (m/m o m/km)

El factor  $\lambda$  es el coeficiente de fricción, el cual es una función de la rugosidad de la pared de la tubería (K), la viscosidad (cinemática) del agua ( $\nu$ ), la velocidad de flujo (V) y el diámetro interno de la tubería (D). La fórmula Colebrook-White es demasiado complicada para cálculos numéricos. Se ha preparado cuadros y monogramas para valores diferentes de la rugosidad de la pared de la tubería.

El Cuadro 18.2 es un ejemplo. Proporciona la pérdida de carga para el agua que corre a través de tuberías de paredes con revestimiento lisos (aspereza de la pared K = 0.1 mm). La Figura 18.7 es un ejemplo de un gráfico de determinación de pérdida de carga para tuberías con una rugosidad de las paredes de K = 0.2 mm.

Cuadro 18.2  
Pérdida de carga en m/km

temperatura 20°C

para tuberías internamente lisas (aspereza de la pared  $k = 0.1$  mm)

D en mm	15	20	25	30	50	70	100	120	150	200
Q en en l/s										
0.1	44.1	10.5	3.51	1.45						
0.15	94.1	22.0	7.28	2.97						
0.2	162	37.6	12.3	4.99						
0.3		80.5	26.0	10.5	0.85					
0.5		214	68.1	27.0	2.13					
0.7			129	51.0	3.94	0.76				
1.0				101	7.60	1.44				
1.5					16.2	3.02				
2					28.0	5.15	0.88			
3					60.9	11.0	1.86	0.76		
5					164	29.1	4.81	1.94	0.65	
7						55.7	9.09	3.64	1.20	
10						111	17.9	7.13	2.33	0.56
15							39.2	15.5	5.01	1.19
20							68.6	26.9	8.66	2.04
30							152	59.3	18.9	4.39
50								161	51.0	11.7
70									98.7	22.5
100									199	45.1

Ejemplo 1

¿Cuál es la pérdida de carga en una tubería de 1,200 m de largo con un diámetro de 50 mm, para un flujo de 3 m<sup>3</sup>/hora?

Un flujo de 3 m<sup>3</sup>/hora es igual a 0.83 l/seg. Usando la tabla:

$Q = 0.7$  l/seg;  $I = 3.94$  m/km, así

$$I = \left[ \frac{(0.83)}{(0.7)} \right]^2 (3.94) = 5.54 \text{ m/km}$$

$Q = 1.0$  l/seg,  $I = 7.60$

$$I = \left[ \frac{(0.83)}{(1.0)} \right]^2 (7.60) = 5.24 \text{ m/km}$$

El promedio es  $(5.54 + 5.24) : 2 = 5.4$  m/km de tal forma que sobre una longitud de 1.2 km la pérdida de carga será

$(1.2) \times (5.4) = 6.5$  m de carga de agua.

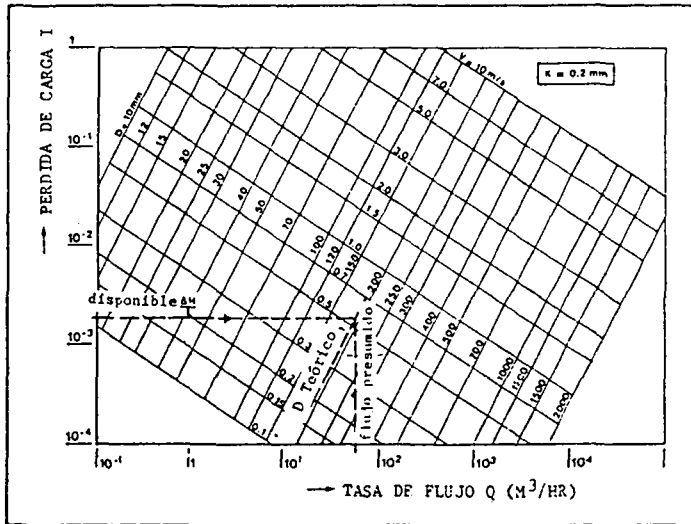


Figura 18.7  
Gráfico de determinación de la pérdida de carga

Ejemplo 2

¿Cuál será el flujo en una tubería de 50 mm de diámetro para transportar agua desde una represa pequeña hasta un tanque a 600 m de distancia? La diferencia de elevación entre los dos puntos es de 5.40 m.

Así el gradiente hidráulico es  $5.40/0.6 = 9 \text{ m/km}$ .

De acuerdo al cuadro, el gradiente hidráulico para un flujo de 1 litro/seg es 7.60 m/km. Así, el flujo verdadero será:

$$Q = 1.0 \sqrt{\frac{9}{7.6}} = 1.1 \text{ litros/seg, o aproximadamente}$$

4 m<sup>3</sup>/hora.

Ejemplo 3

Cuál será el flujo en el ejemplo 2 cuando se escoge una tubería de 55 mm de diámetro?

$$Q = (1.1) \left( \frac{(55)}{(50)} \right)^{2.5} = 1.4 \text{ litros/seg.}$$

A continuación se muestra valores indicativos de rugosidad de la pared de la tubería (K):

Material de la tubería

Rugosidad de la pared de la tubería\*

Asbesto-cemento (A.C.)	k = 0.1	mm
Polivinilclorido (PVC)	k = 0.1	mm
Polietileno (P.E.)	k = 0.05	mm
Hierro dúctil (I.D.) (no revestido)	k = 0.25	mm
Hierro dúctil (I.D.) (revestido con cemento)	k = 0.125	mm
Acero (revestido)	k = 0.125	mm
Acero galvanizado (A.G.)	k = 0.15	mm

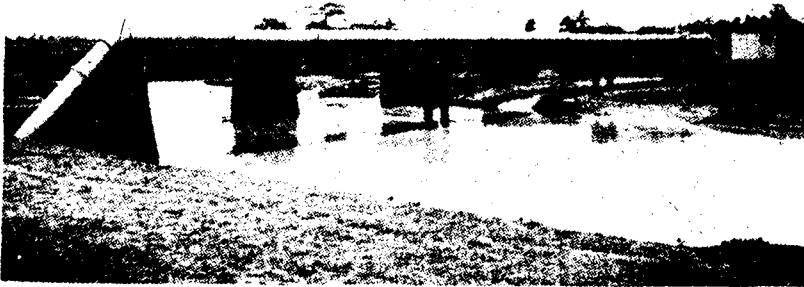


Figura 18.8  
Tubería principal de transmisión de agua que atraviesa un río

18.5 CONDUCCION DE AGUA MEDIANTE BOMBEO

Para la transmisión de agua mediante bombeo, se puede calcular la pérdida de carga correspondiente a la escala de flujo señalado para cualquier diámetro de tubería, usando cuadros y monografías como los que se presentan en la Sección 18.4. La carga de bombeo es la carga total, esto es, la carga estática más la pérdida de carga por fricción para la tasa del flujo señalado. La bomba seleccionada debe ser capaz de proveer esta carga (Figura 18.9).

\* Después de varios años de servicio, y considerando el efecto de las uniones y algún mal alineamiento de las tuberías.

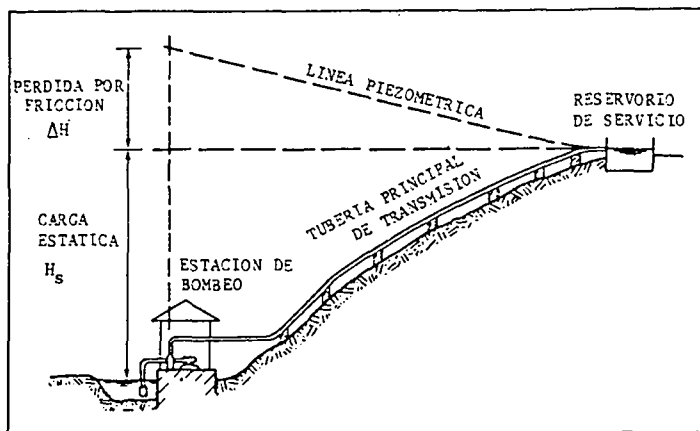


Figura 18.9  
Abastecimiento mediante bombeo

Se debe repetir este cálculo para varios diámetros de tuberías. Cada combinación de carga de bombeo y diámetro de tubería será capaz de abastecer la tasa requerida de flujo en toda la distancia requerida y hasta el reservorio de servicio. Sin embargo, sólo un diámetro de tubería representará la alternativa de menor costo tomando en cuenta los costos iniciales (inversión de capital) y los costos de energía para el bombeo. El costo total, capitalizado, es la base para la selección del diámetro de tubería más económico.

Para este análisis los costos calculados para tamaños diferentes de tubería son trazados en un gráfico; la Figura 18.10 muestra un ejemplo de éste.

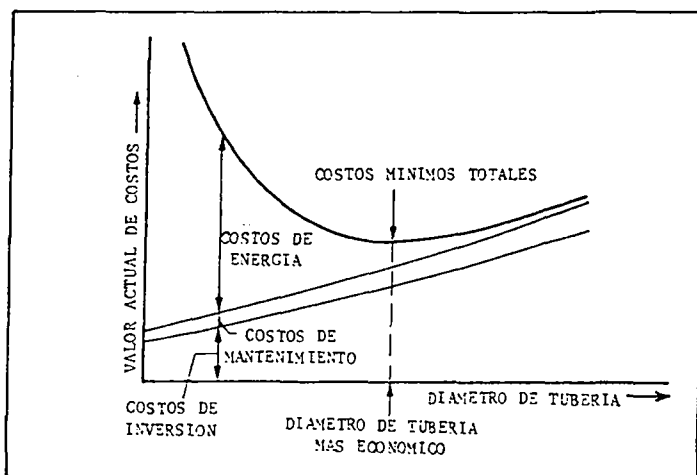


Figura 18.10  
Determinación del diámetro de tubería más económico



El diámetro de tubería más económico sería mayor:

- cuando los costos de energía sean elevados,
- cuando sean bajos los costos por metro lineal de tubo y
- cuando sean bajas las tasas de interés del capital.

Para un estimado tentativo del diámetro de tubería más económico, se puede calcular éste usando una velocidad de flujo de 0.75 m/seg.

### Selección de bombas

En el Capítulo 10 se ha mencionado varios tipos de bombas: centrífuga, de flujo axial, de flujo mixto y recíprocas. Por lo general la elección entre éstas depende de su rendimiento en términos de carga y capacidad de bombeo.

Las bombas con partes giratorias tienen un eje ya sea horizontal o vertical. Por lo general, la elección entre éstas se basa en el arreglo de conducción del motor de la bomba y en las condiciones del sitio. En un sitio sujeto a inundación, se debe colocar el motor y cualquier otro equipo eléctrico sobre el nivel de inundación.

En la transmisión de agua para el abastecimiento de comunidades, es usual que se requiera una carga sustancial. Esto implica que, con frecuencia, las bombas seleccionadas sean del tipo centrífuga (flujo radial).

Se diseña muchas bombas de agua corriente para funcionar (casi) continuamente durante largos períodos de tiempo. Una gran eficiencia de un porcentaje pequeño puede representar un ahorro considerable en los costos de funcionamiento durante un largo período de tiempo. Sin embargo, para abastecimientos de agua rurales, un requerimiento aún más importante es que cualquier bomba instalada debe ser confiable.

La característica de carga/capacidad de bombeo y la eficiencia de la bomba están indicadas en los gráficos suministrados por los fabricantes de la misma. La Figura 18.11 muestra un ejemplo.

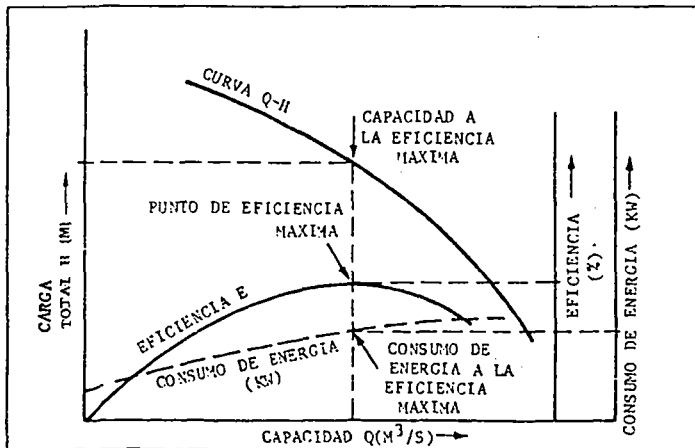


Figura 18.11  
Curva típica de características de una bomba

En la práctica rara vez es posible tener a la bomba en funcionamiento permanente a su eficiencia máxima debido a que su punto de operación es determinado tanto por la carga como por la capacidad de bombeo, y éstas pueden variar en forma considerable. Frecuentemente, es bastante baja la eficiencia de las bombas de poca capacidad que operan en áreas rurales en países en desarrollo. Un estimado tentativo estaría en la escala del 30% para una bomba de 0.4 kilovatios a 60% para una bomba de 4 kilovatios

### Requerimientos de energía

La energía requerida para conducir una unidad de bombeo se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot Q (H_s + i \cdot L)}{e}$$

Donde:

N = Energía requerida para el bombeo (vatios)

Q = Fuerza de bombeo (l/seg)

$\rho$  = Densidad del agua (Kg/dm<sup>3</sup>)

e = Eficiencia de bombeo (porcentaje)

H<sub>s</sub> = Carga estática (m)

i = Pérdida de carga bajo condiciones de operación (m de carga/m de tubería)

L = Longitud de la tubería (m)

Para  $g = 9.81 \text{ m/seg}^2$ ;  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ , y e para bombas de poca capacidad calculada en el 50 por ciento, la fórmula se puede simplificar a:

$$N = 20 Q (H_s + i \cdot L) \text{ Vatios}$$

### Ejemplos

Para un abastecimiento de agua se requiere bombeo en una tasa de 110,000 litros por 12 horas. La carga estática es de 26 m, y la longitud de la tubería es de 450 m. Determine el diámetro de la tubería y el requerimiento de energía para el bombeo.

$$Q = 110,000/12 \times 3,600 = 2.55 \text{ l/seg}$$

El Cuadro 18.2 indica que se puede seleccionar una tubería de 50 mm de diámetro con una pérdida de carga de 43 m/km para la tasa señalada de flujo de 2.55 l/seg. El requerimiento de energía sería:

$$N = 20 \times 2.55(26 + 0.043 \times 450) = 2,310 \text{ vatios} = 2.3 \text{ kilovatios}$$

### Instalaciones de bombas

Las estaciones de bombeo pueden ser del tipo pozo húmedo (con bombas sumergibles o con motores colocados sobre la bomba en el sumidero) o del tipo pozo seco (bomba instalada en un cuarto de bombeo). El tipo pozo-húmedo tiene las bombas sumergidas en el agua, y el tipo pozo-seco tiene la bomba en un cuarto seco separado del agua mediante una pared.

Para facilitar la instalación, algunas veces se sitúa las bombas horizontales sobre el nivel del suelo. En ese caso debe ser del tipo de autocebado, el que por lo general no es un arreglo muy confiable para instalaciones de abastecimiento de agua rural.

En las Figuras 18.12 y 18.13 se muestra ejemplos de varios tipos de instalaciones de bombas.

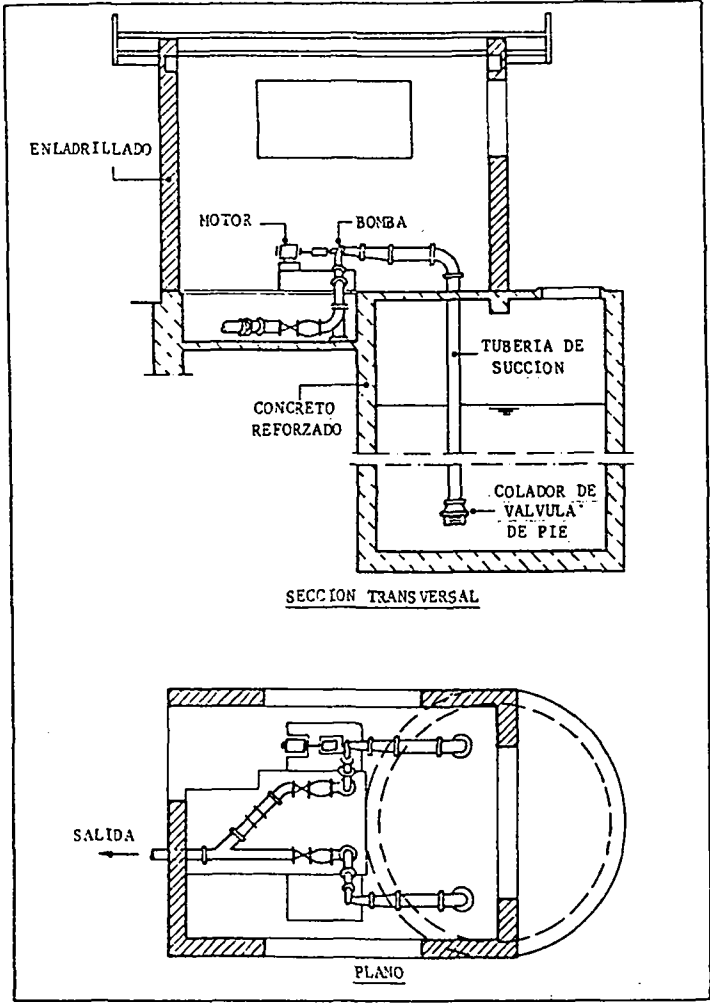


Figura 18.12  
Estación de bombeo con bombas horizontales (autocebadoras)

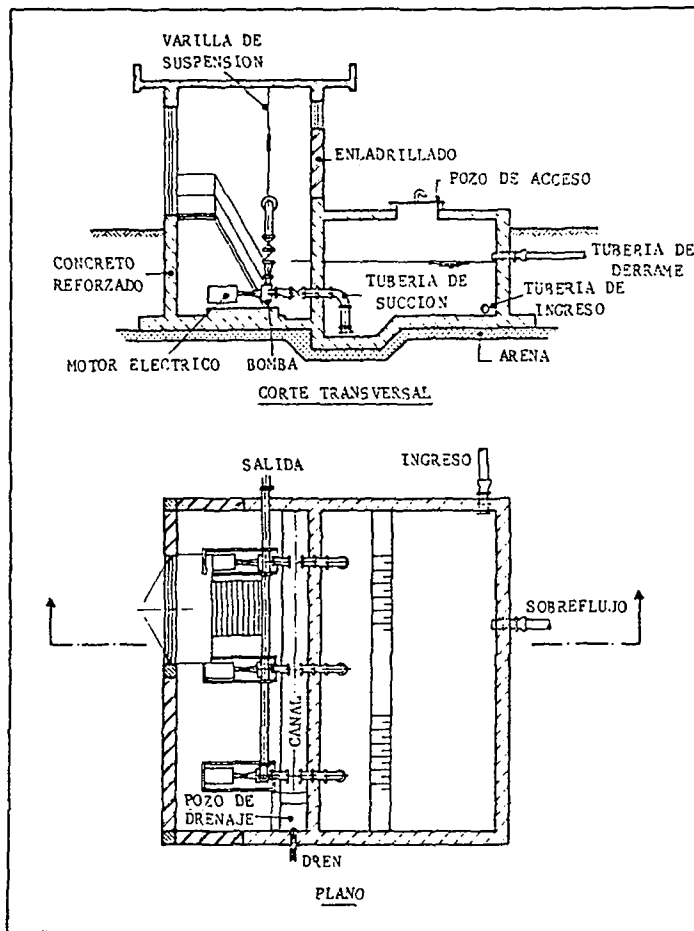


Figura 18.13  
 Instalación de bombeo (pozo seco)

### 18.6 MATERIAL DE TUBERIAS

Frecuentemente las tuberías representan una inversión considerable y la selección del tipo correcto de tubos es importante. Estos están disponibles en varios materiales, tamaños y clases de presión. Los materiales más comunes son el hierro fundido (HF), hierro dúctil, acero, asbesto-cemento (AC), polivinilclorido (PVC) y polietileno de alta densidad (PE).

Además de estos, algunas veces tienen aplicación limitada materiales naturales tales como el bambú.

La adaptabilidad de cualquier tipo de tubería en una situación dada está influenciada por su disponibilidad en el mercado, costo, diámetros disponibles y clases de presión y susceptibilidad a la corrosión o al daño mecánico. Aunque las condiciones específicas variarán de un país a otro, las siguientes observaciones generales se aplican en la mayoría de los casos.

El hierro dúctil y el acero son los materiales de tuberías más fuertes, lo que los hace ser la mejor alternativa cuando se espera presiones de operación muy elevadas. Sin embargo, los costos de ajustes, válvulas, etc., aumentan rápidamente para los tipos de tuberías de presión elevada y, por lo tanto, a menudo es aconsejable reducir la presión interna máxima de la tubería proveyendo una válvula reductora de presión o un tanque de interrupción. Por lo general, un tanque de interrupción de la presión es más confiable que una válvula reductora.

Puede que el asbesto-cemento sea menos adecuado para las tuberías principales de transmisión debido a que es posible la derivación no autorizada de esas tuberías principales. Más aún, este material de tubería puede estar sujeto a reventar en escala cuando se le hace conexiones sin los conocimientos suficientes.

También es difícil evitar la conexión no autorizada de las tuberías principales de plástico rígido (PVC). Es casi imposible hacer conexiones de tuberías de acero y de hierro dúctil sin equipo y herramientas especiales.

Las tuberías de plástico (PVC; PE) son muy resistentes a la corrosión. Sin embargo, el PVC sufre una cierta pérdida de su fuerza cuando se le expone a la luz solar durante largos períodos de tiempo, y se debe tener cuidado de cubrir las cuando se les almacena al descubierto.

El polietileno de alta densidad es un material muy adecuado para tuberías principales de diámetro pequeño debido a que se le puede suministrar en rollos (para diámetros de tuberías de 160 mm y menos). Así, se reduce grandemente el número de las uniones necesarias. Particularmente en los casos en que los materiales rígidos de tubería necesiten un número considerable de partes especiales tales como codos y curvas, el PE flexible constituye un material ideal. El polietileno no se deteriora cuando se le expone directamente a la luz solar.

Resumiendo, para tuberías de diámetro pequeño (menos de 150 mm) puede que generalmente el PE y el PVC sean los mejores. Para tuberías de tamaño medio (diámetro de 300 a 400 mm) se debe considerar el asbesto-cemento. Por lo general, se usa el hierro fundido, el hierro dúctil y el acero sólo para tuberías principales de gran diámetro, y también en casos donde se necesite presiones muy elevadas en tuberías de diámetro pequeño.

En el Cuadro 18.3 se muestra una lista de las características comparativas de los materiales para las tuberías.

Cuadro 18.3

## Comparación de materiales de tuberías

Material de tubería	P.V.C. y P.E.	A.C.	C.I. y D.I.		Acero	
			No reves- tido	Reves- tido con cemento	No reves- tido	Reves- tido con cemento
1. Costo de la tubería	+	+	-	-	-	-
2. Disponibilidad de diámetros grandes	-	+	+	+	+	+
3. Fuerza mecánica	+	+	++	++	++	++
4. Resistencia a reventar cuando se le conecta ilegalmente	+	-	++	++	++	++
5. Resistencia a la corrosión	++	+	+	+	-	+

++: muy bien adecuado

+ : bien adecuado

+ : adecuado

- : menos adecuado

Además de las válvulas de evacuación ("compuertas") y válvulas sin retorno colocadas en los escapes de la bomba, en el caso de bombeo se usa varios tipos de válvulas y accesorios en la misma tubería de transmisión. Como normalmente la tubería seguirá el terreno, se debe tomar provisiones para el escape del aire atrapado en puntos elevados y para la limpieza de depósitos en puntos bajos. Se debe proveer válvulas liberadoras de aire (véase Figura 18.14) en todos los puntos altos en la tubería y puede que también se les requiera en posiciones intermedias a lo largo de gradientes parejos. Para evitar la subpresión, también se tendrá que usar válvulas de admisión de aire. Estas sirven para hacer ingresar aire a la tubería cuando la presión interna cae por debajo de cierto nivel. Se debe instalar válvulas de drenaje o descarga en los puntos más bajos de la tubería para facilitar el vaciado o la limpieza de ésta.

En tuberías largas, se debe instalar válvulas de evacuación para permitir el aislamiento de las secciones para propósitos de reparación o inspección. Especialmente cuando se utiliza tuberías gemelas resulta ventajoso conectarlas en intervalos. En el caso que se produzcan filtraciones o que reviente la tubería, sólo se necesita retirar de funcionamiento una sección de esta tubería gemela, mientras que se puede seguir usando las otras secciones y toda la otra tubería principal. De esta manera, se reduce en muy poco la capacidad de la tubería gemela como tal. Se debe mencionar que se obtiene esta ventaja con un cierto costo, porque cada conexión entre las tuberías gemelas requiere por lo menos cinco válvulas.

Las válvulas de evacuación realizan su función ya sea totalmente abiertas o completamente cerradas. Para diámetros de tubería de 350 mm y menos se puede usar una sola válvula. Para diámetros mayores, se necesitará un by-pass de diámetro pequeño con una segunda válvula porque de lo contrario puede resultar muy difícil el cierre de la válvula de diámetro grande. En estos casos, en que se tiene que interrumpir el flujo de agua por medio de una válvula, se debe usar las válvulas de mariposa. También se puede usar este tipo de válvula en lugar de las de evacuación mencionadas anteriormente, pero su costo por lo general es algo mayor. La Figura 18.15 muestra varios tipos de válvulas.

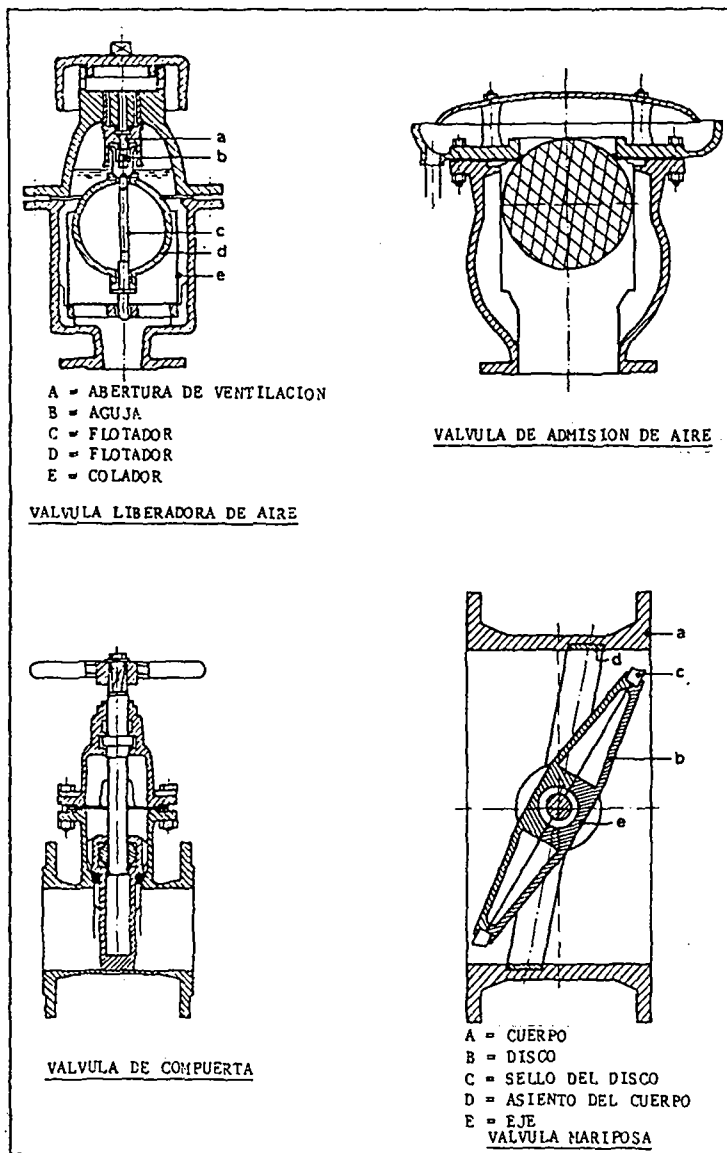


Figura 18.14  
 Varios tipos de válvulas

TRANSMISION O CONDUCCION DEL AGUA

Azevedo Netto, J.M.; Alvarez, G.A.  
MANUAL DE HIDRAULICA  
Edgard Blücher Editor, Sao Paulo, 1975

Bartlett, R.E.  
PUMPING STATIONS FOR WATER AND SEWAGE  
Applied Science Publishers Ltd., Londres, 1974

Domínguez, F.J.  
CURSO DE HIDRAULICA  
G. Gilí Editor, Santiago de Chile, 1945

Fair, G.M.; Geyer, J.C.; Okun, D.A.  
WATER AND WASTEWATER ENGINEERING (1st Volume)  
John Wiley & Sons, Nueva York, 1966

King, H.W.  
HANDBOOK OF HYDRAULICS  
McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1930

MANUAL OF BRITISH WATER SUPPLY PRACTICE  
Institution of Water Engineers, Londres, 1950

Schlag, A.  
HYDRAULIQUE GENERALE ET MECANIQUE DES FLUIDS  
Liège, 1950

Trueba Coronel, S.  
HIDRAULICA  
México, 1955





## 19. DISTRIBUCION DE AGUA

### 19.1 INTRODUCCION

El sistema de distribución de agua (o sistema de "retícula") sirve para conducir el agua extraída desde la fuente y tratada cuando fuera necesario, hasta el punto en donde se la entrega a los usuarios. Para abastecimientos de agua a pequeñas comunidades, se debe mantener la simplicidad del sistema de distribución y de cualquier provisión para el almacenamiento de agua (por ejemplo, reservorio de servicio). Aun así, puede representar una inversión sustancial de capital y se debe hacer el diseño en forma adecuada.

Por lo general, el sistema de distribución de un abastecimiento de agua a pequeñas comunidades está diseñado para satisfacer los requerimientos domésticos y otros requerimientos residenciales de agua. También se puede proveer para el abrevadero del ganado y agua para irrigación de huertos.

La demanda de agua de una comunidad varía considerablemente en el curso de un día. El consumo de agua es más elevado durante las horas en que se la usa para la higiene personal y la limpieza y cuando se realiza la preparación de alimentos y el lavado de la ropa. Durante la noche, el uso del agua será el más bajo.

Los reservorios de servicio sirven para acumular y almacenar agua durante la noche de tal forma que se puede abastecer de agua durante las horas de demanda elevada en el día.

Es necesario mantener una presión suficiente en el sistema de distribución con el fin de protegerlo contra la contaminación por el ingreso de agua contaminada de filtración. Para los abastecimientos a pequeñas comunidades, en la mayoría de los casos, una presión mínima de 6 m de carga de agua sería la adecuada.

### 19.2 TIPOS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION

Básicamente hay dos tipos principales de sistemas de distribución:

1. Sistema ramificado (Figura 19.1a)
2. Sistema de redes cerradas (Figura 19.1b)

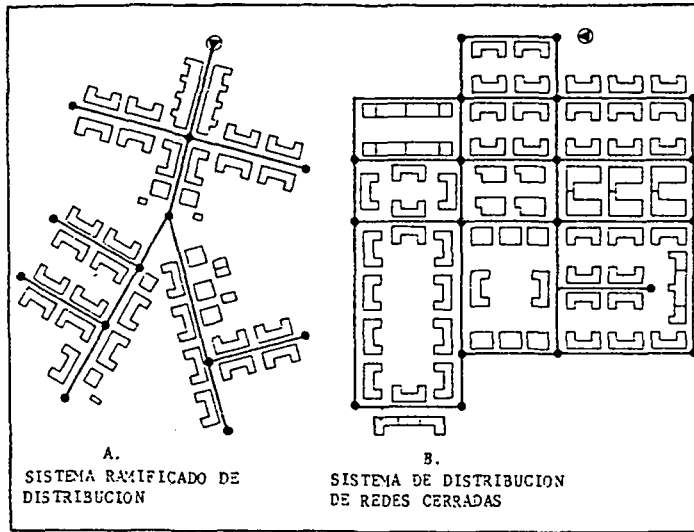


Figura 19.1  
Tipos de sistemas de distribución

En general, los sistemas ramificados se usan sólo para abastecimientos públicos de poca capacidad que entregan el agua mayormente a través de fuentes públicas y que tienen pocas o ninguna conexión domiciliaria. Para sistemas de distribución más grandes, son más comunes los sistemas de rejillas o redes cerradas.

Los sistemas ramificados tienen la ventaja de que su diseño es directo. Se puede determinar fácilmente la dirección y la tasa de flujo de agua en todas las tuberías. Esto no es tan fácil en el sistema de redes cerradas (o "rejillas") en donde se puede alimentar cada tubería secundaria desde dos lados. Esto influye grandemente en el diseño hidráulico de la red de distribución. También es de suma importancia en el caso de que una de las tuberías principales esté fuera de operación (por ejemplo, por limpieza o para reparación). Por lo general, un red cerrada tiene un aro de tuberías principales a las cuales se conecta las tuberías secundarias. En sistemas de distribución grandes (urbanos), por lo general las tuberías secundarias están interconectadas, lo que requiere muchas válvulas y partes especiales (Figura 19.2).

Para sistemas pequeños de distribución, las tuberías secundarias de cruce superior que no están interconectadas pueden ser ventajosas con un considerable ahorro de costo (Figura 19.3).

El número y tipo de los puntos (conexiones de servicio) en los cuales se entrega el agua a los usuarios, tiene considerable influencia en el diseño de un sistema de distribución de agua.

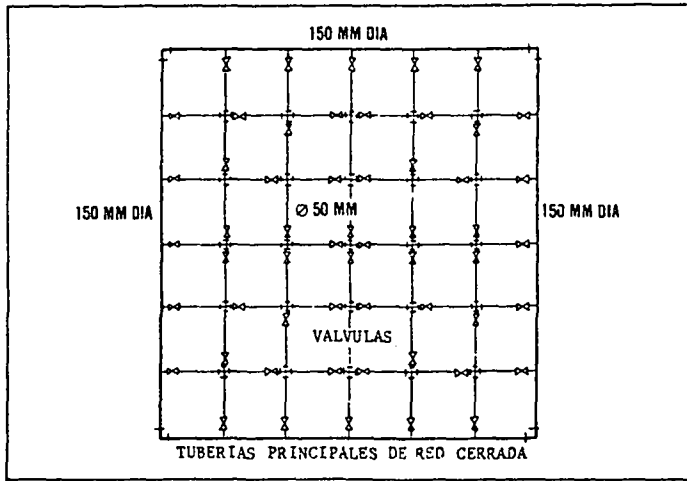


Figura 19.2  
Tuberías completamente interconectadas

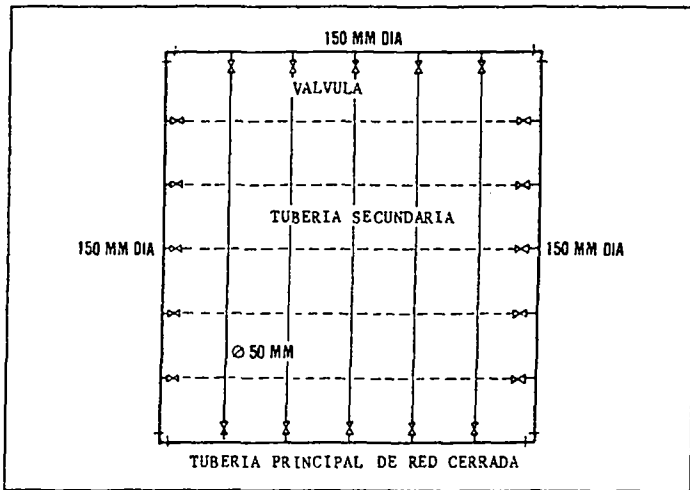


Figura 19.3  
Tuberías simples de cruce superior

Se puede distinguir los siguientes tipos de conexiones de servicio:

- Conexión domiciliaria
- Conexión de patio
- Fuente pública

Una conexión domiciliaria es una tubería de servicio de agua conectada con plomería interior a uno o más grifos, por ejemplo, en la cocina y en el baño. Por lo general se usa grifos de 3/8 de pulgada (9 mm) y 1/2 pulgada (12 mm). En la Figura 194 se muestra una disposición típica.

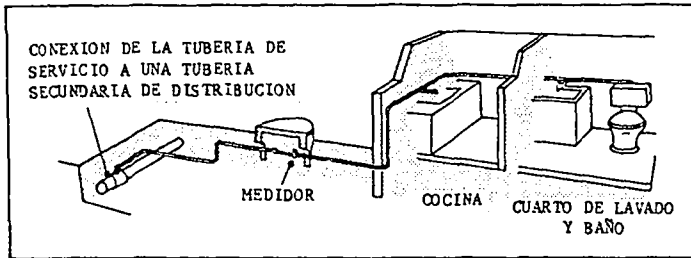


Figura 19.4  
Conexión domiciliaria

La tubería de servicio es conectada a la tubería principal de distribución en la calle por medio de una pieza T (en tuberías de diámetro pequeño), una pieza especial insertada ("férula") o una silleta (en tubería secundaria de mayor tamaño). Mayormente se usa una pieza especial insertada para tuberías de hierro fundido y hierro dúctil.

Una conexión de patio es bastante similar a una conexión domiciliaria; la única diferencia es que el (los) grifo(s) es colocado en el patio fuera de la(s) casa(s). No se provee ningún sistema de tuberías en el interior ni ningún accesorio (Figura 19.5).

Se usa las tuberías de plástico (cloruro de polivinilo o polietileno), hierro fundido y tuberías de acero galvanizado tanto para las conexiones domiciliares como para las conexiones de patio

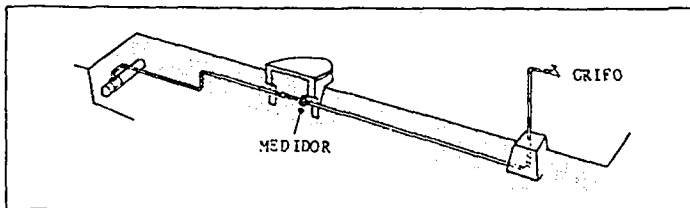


Figura 19.5  
Conexión de patio

Las fuentes públicas han sido usadas durante mucho tiempo para la distribución de agua y, por razones de costo y factibilidad técnica, tendrán que seguir sirviendo a este propósito en muchos países, durante un largo periodo futuro. Cada fuente pública debe estar situada en un punto adecuado dentro del área de la comunidad con el fin de limitar la distancia que los usuarios del agua tendrán que recorrer para recolectarla. La distancia a recorrer a pie, para el usuario más alejado de la fuente debe, en lo posible, estar limitada a 200 m; en áreas rurales escasamente pobladas se puede aceptar 500 m. Normalmente la capacidad requerida de descarga de una fuente pública es de aproximadamente 14-18 litros/minuto, en cada salida. Preferiblemente, una fuente pública de un solo grifo debe ser usada por no más de 40-70 personas, una de varios grifos puede proveer un servicio razonable hasta para 250-300 personas; en ningún caso el número de usuarios dependientes de una fuente pública debe exceder las 500 personas.

Las fuentes públicas pueden operar con una presión baja. Por lo tanto, los sistemas de distribución que sirven sólo a éstas, pueden usar tuberías de presión baja. Las tuberías para los sistemas de distribución con conexiones domiciliarias generalmente tienen que ser de clase de presión elevada.

El desperdicio del agua de las fuentes públicas, especialmente cuando los usuarios no cierran los grifos, puede constituir un serio problema. También es común que los grifos sean dañados por los usuarios. Algunas veces se producen robos. Un drenaje pobre del agua derramada puede provocar charcos estancados de agua sucia con los consiguientes riesgos para la salud.

El agua obtenida en una fuente pública tendrá que ser llevada a casa en un contenedor (cubo, bidón, vasijas, ollas, etc.). Esto quiere decir que el agua que era segura al momento de la extracción, puede que no lo sea al momento de usarla en la casa. Generalmente, el consumo de agua de las fuentes públicas no es superior a los 20 a 30 litros por persona al día.

Es probable que el uso del agua para otros propósitos que no sean la bebida y la cocina sea reducido cuando se tiene que transportar el agua desde una fuente pública. Generalmente las conexiones de patio y caseras favorecerán un uso más generoso del agua para propósitos de higiene personal y de limpieza.

Las fuentes públicas pueden tener uno o más grifos. En áreas rurales los tipos más comunes son las fuentes de uno y de dos grifos. Estas están hechas de ladrillo, mampostería, concreto o usan postes de madera y materiales similares. Las fuentes públicas pueden tener plataformas en niveles diferentes, haciendo fácil para los adultos y niños usarlas con contenedores de tamaños diferentes. En las Figuras 19.6 y 19.7 se muestra ejemplos. Los grifos públicos que extraen agua de un reservorio pequeño ("cisterna") representan un método alternativo de distribución de agua (Figura 19.8)

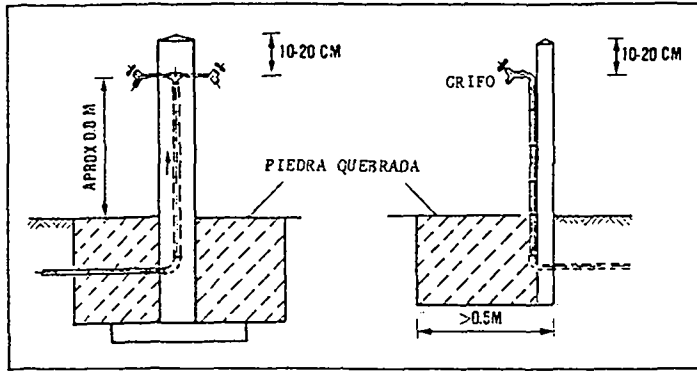


Figura 19.6  
Sección transversal de una fuente pública simple

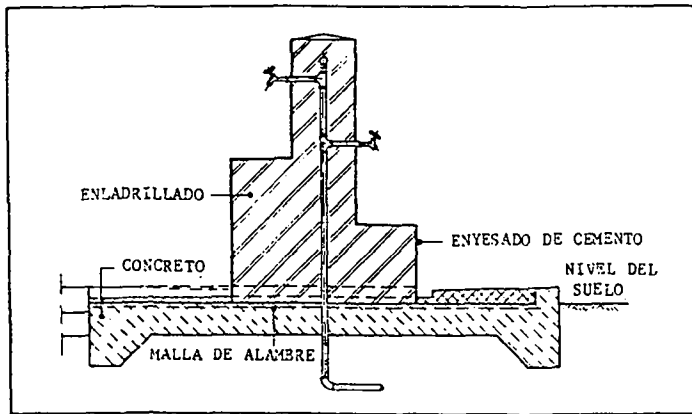


Figura 19.7  
Sección transversal de una fuente pública de grifos múltiples

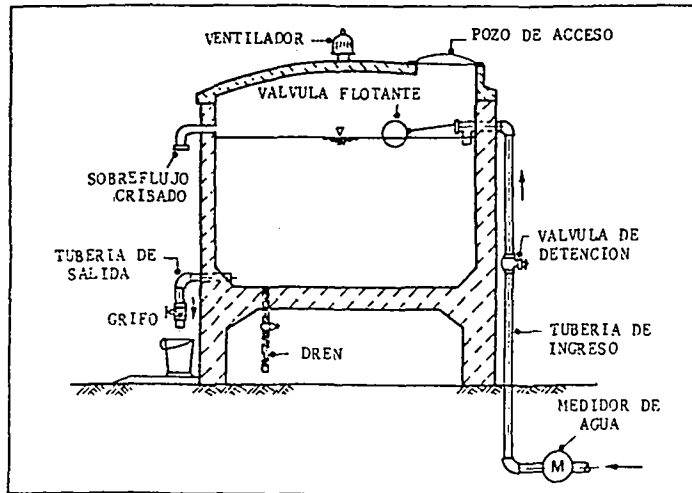


Figura 19.8  
Grifos comunales abastecidos para un reservorio pequeño ("Cisterna")

A pesar de sus deficiencias, las fuentes públicas son realmente la única opción práctica para la distribución de agua a un costo mínimo a un gran número de personas que no pueden afrontar los costos mucho más elevados de las conexiones domiciliarias o de patio. De hecho, frecuentemente las casas no están convenientemente construidas para permitir la instalación de sistemas internos. Más aún, a menudo es imposible para una pequeña comunidad obtener el capital sustancial para un sistema de distribución de agua con conexiones domiciliarias. Igualmente, los costos de agua de desecho generados por un servicio de abastecimiento de agua conectado en casa, impondrían una carga financiera adicional a la comunidad. En consecuencia, se tendrá que proveer fuentes públicas y la principal preocupación debe ser reducir sus deficiencias inherentes en todo lo posible.

#### Desarrollo en etapas de sistemas de distribución

La experiencia muestra que es posible desarrollar un sistema de distribución de agua en etapas, mejorándolo en pasos sucesivos, cuando el estándar de vida de una comunidad mejora y cuando se dispone de fondos. Por lo tanto, cuando se diseña un sistema de distribución, se debe hacer provisiones para su posterior mejoramiento. El ingeniero de diseño debe tener en cuenta la demanda más elevada de agua per cápita, la que está asociada con mejores instalaciones para el abastecimiento del agua.

El costo de un sistema de distribución del agua depende principalmente de la longitud total de las tuberías instaladas y en menor grado de los diámetros de estas tuberías. Por lo tanto, generalmente es ventajoso diseñar un sistema de distribución, en todo caso con sus componentes principales, directamente adecuados para su capacidad final. Esto es así incluso cuando inicialmente se instala sólo parte del sistema de distribución para el abastecimiento de agua a unas cuantas fuentes públicas. Así, para comenzar se provee fuentes públicas con bastante espacio entre ellas, a las que probablemente se puede abastecer de una o unas cuantas tuberías principales. Un reservorio elevado (o tanque) será muy útil para obtener un abastecimiento confiable de agua hacia el sistema de distribución, particularmente si se toma el agua de la fuente mediante bombeo.

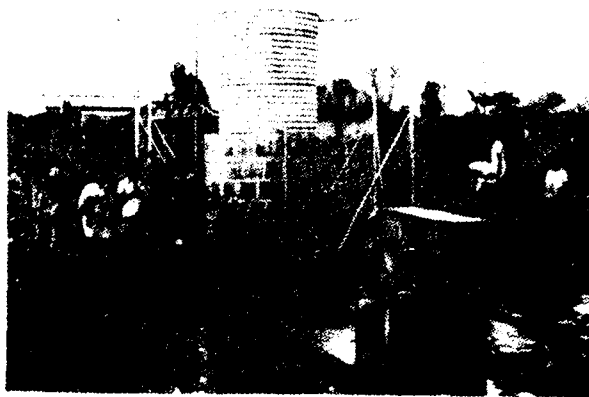


Foto CIR

Figura 19.9  
Fuente pública comunal abastecida por tanque elevado (Kenya)



En la siguiente etapa se instala fuentes públicas adicionales para reducir el espaciamiento y, así, la distancia que el agua tiene que ser transportada por los usuarios. Esto puede requerir la colocación de más tuberías principales de distribución con tuberías secundarias que sirvan a las partes más densamente pobladas de la comunidad. Cuando se ha difundido este nivel básico de servicio de agua a toda la comunidad, puede seguir la instalación de grifos de patio y conexiones domiciliarias. Esto probablemente coincida con la provisión de más fuentes públicas para mejorar el servicio a aquellos usuarios que dependen de este tipo de abastecimiento.

Así, el desarrollo en etapas de un sistema de distribución iría paralelo al verdadero crecimiento del uso de agua en una comunidad. Esto considera que en los primeros años muchas de las viviendas existentes puede que no permita la instalación de plomería y accesorios requeridos para una conexión domiciliaria.

### 19.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

#### Demanda de agua; factores de pico

La demanda diaria de agua en una comunidad variará durante el año debido al patrón estacional del clima, la situación de trabajo (por ejemplo, época de cosecha) y a otros factores, tales como ocasiones culturales o religiosas. Las cifras típicas para el uso doméstico y otros requerimientos de agua, como las que se ofrece en el Capítulo 3, son cifras promedios. Por lo general, se calcula la demanda máxima diaria añadiendo del 10 al 30 por ciento a la demanda diaria promedio. Así, el factor pico para la demanda diaria ( $k_1$ ) es 1.1 a 1.3.

La variación horaria en la demanda de agua durante el día frecuentemente es mucho mayor. Generalmente, se puede observar dos períodos de pico, uno en la mañana y otro en la tarde (Figura 19.8). Se puede expresar la demanda de la hora pico como la demanda horaria promedio multiplicada por el factor horario de pico ( $k_2$ ). Para un área particular de distribución, este factor depende del tamaño y carácter de la comunidad servida. El factor de pico horario tiende a ser elevado para poblados rurales pequeños, por lo general, es menor para comunidades más grandes y pequeños pueblos. En lugares en donde los tanques en los techos y otros recipientes de almacenamiento de agua son comunes, se reducirá en mucho el factor horario de pico. Generalmente, se elige el factor  $k_2$  en la escala de 1.5 - 2.

Típicamente se diseña un sistema de distribución de agua para satisfacer la demanda horaria máxima. Se puede calcular esta demanda máxima por hora como  $k_1 \times k_2 \times$  demanda horaria promedio.

#### Ejemplo

Para un área particular de distribución la demanda de agua diaria promedio se calcula (usando las cifras de diseño proporcionadas en el Capítulo 3) en 500,000 litros/día.

$Q$  día promedio = 500,000 litros/día  
 $Q$  día pico =  $1.2 \times 500,000 = 600,000$  litros/día  
 $q$  hora promedio en día pico =  $600,000 : 24 = 25,000$  litros/hora  
 $q$  hora pico =  $1.8 \times 25,000 = 45,000$  litros/hora

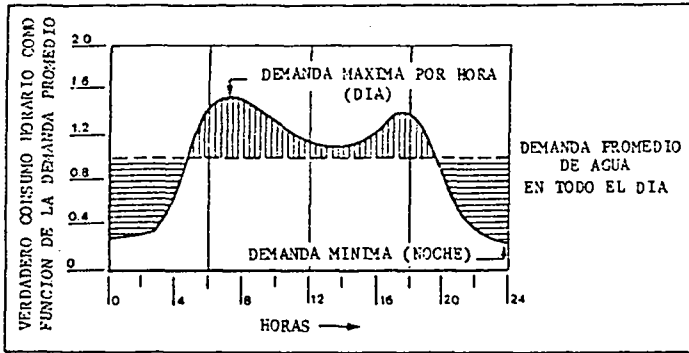


Figura 19.10  
 Variación de la demanda de agua durante el día

Reservorio de almacenamiento

Si no hubiera ningún almacenamiento de agua en el área de distribución, la fuente de abastecimiento y la planta de tratamiento de agua tendrían que ser capaces de seguir todas las fluctuaciones de la demanda de la comunidad servida. Por lo general, esto no es económico y algunas veces ni siquiera técnicamente factible.

Por lo general se escoge las capacidades de diseño de los diferentes componentes de un sistema de abastecimiento de agua como se indica en la Figura 19.11.

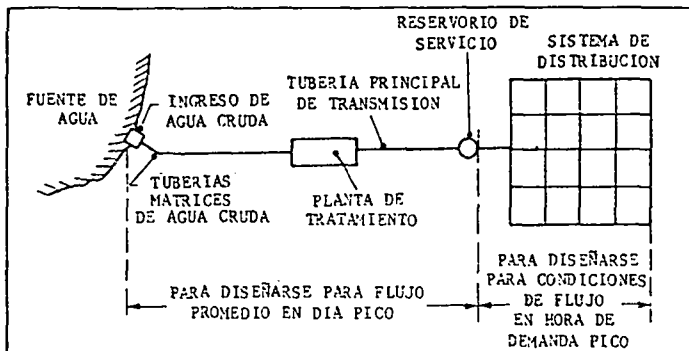


Figura 19.11  
 Capacidades de diseño para componentes de sistemas de abastecimiento de agua

En resumen:

Componentes del sistema

Capacidad de diseño

- . Fuente de agua, tubería matriz de agua cruda; planta de tratamiento de agua
  - . Sistema de distribución
- Demanda pico diaria de agua
  - Demanda pico horaria de agua

Se provee el reservorio de servicio para equilibrar la tasa de abastecimiento (constante) de la planta de fuente/tratamiento de agua con la demanda fluctuante de agua en el área de distribución. El volumen de almacenamiento debe ser lo suficientemente grande como para acomodar las diferencias acumulativas entre el abastecimiento y la demanda de agua.

Se puede determinar el volumen requerido de almacenamiento de la siguiente manera. Se expresa la demanda horaria estimada de agua (ejemplo dado en la Figura 19.10) como un porcentaje de la demanda total sobre el día pico y trazado en una curva acumulativa de la demanda de agua (Figura 19.12). Entonces se dibuja la misma escala constante de abastecimiento en el mismo diagrama, como una línea recta\*.

Ahora se puede leer en el gráfico el volumen requerido de almacenamiento. Para un abastecimiento de tasa constante, 24 horas diarias, se representa el almacenamiento requerido por A-A' más B-B', aproximadamente el 28% de la demanda diaria máxima. Si la capacidad de abastecimiento es tan elevada que se puede satisfacer la demanda diaria con 12 horas de bombeo al día, se encuentra que el almacenamiento requerido es C-C' más D-D', aproximadamente 22% de la demanda total diaria máxima.

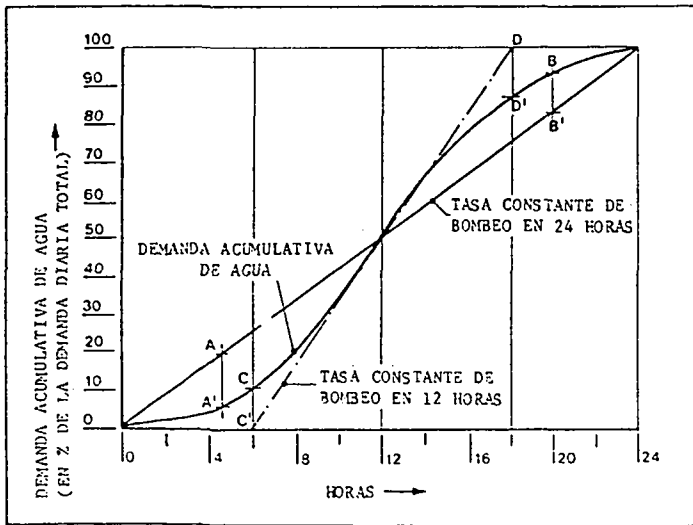


Figura 19.12  
Determinación gráfica del volumen requerido de almacenamiento (reservorio de servicio)

\* En el ejemplo, el abastecimiento opera a una tasa constante. Si la tasa de abastecimiento no es constante, la cantidad acumulativa del agua abastecida estará representada por una línea partida.

Por lo general sería adecuado un reservorio de servicio con un volumen de almacenamiento de 20 a 40 por ciento de la demanda diaria máxima de agua, aunque se puede requerir un reservorio más grande en situaciones en las que cualquier interrupción del abastecimiento de agua sea particularmente crítica.

Se debe situar el reservorio lo más cerca posible al área de distribución y a una elevación mayor que ésta. Si se dispone de un lugar así, únicamente a cierta distancia, se debe colocar ahí el reservorio. La Figura 19.13 muestra dos arreglos posibles.

En áreas llanas donde no se dispone de sitios altos adecuados u otros puntos altos para reservorios en el terreno, se tiene que usar torres de agua o tanques elevados. En principio esas torres o tanques deben tener el mismo volumen de almacenamiento que el reservorio en el terreno. Sin embargo, en la práctica, las torres de agua y los tanques elevados tienen volúmenes relativamente pequeños debido a que son mucho más caros de construir que un reservorio en el terreno.

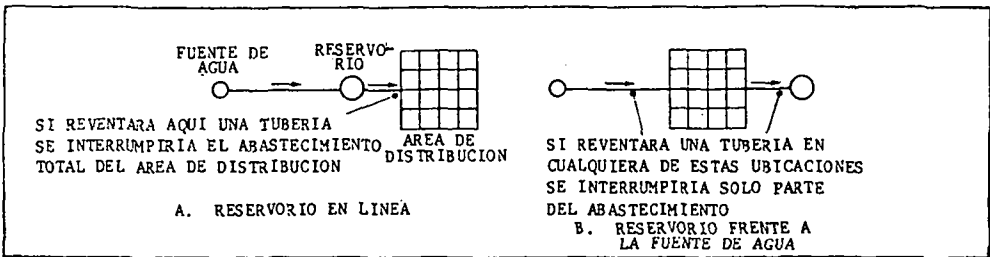


Figura 19.13  
Ubicación del reservorio

Algunas veces se utiliza una combinación de un reservorio en el terreno y una estación de bombeo (Figura 19.14). Sin embargo, generalmente ésta es un arreglo demasiado complejo para un abastecimiento público pequeño.

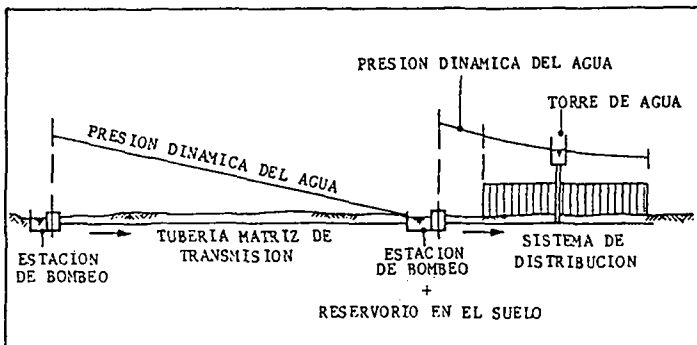


Figura 19.14  
Reservorio en el terreno con estación de bombeo

Normalmente los reservorios en el terreno que tienen cierto tamaño son de concreto reforzado; los pequeños pueden ser hechos de concreto macizo o mampostería de ladrillo. Los reservorios elevados son de acero, concreto reforzado o enladrillado sobre columnas de concreto. Mayormente se colocan los tanques de acero en un marco de soporte de acero o de madera.

En las Figuras 19.15 y 19.16 se muestra ejemplos de reservorios de servicio.

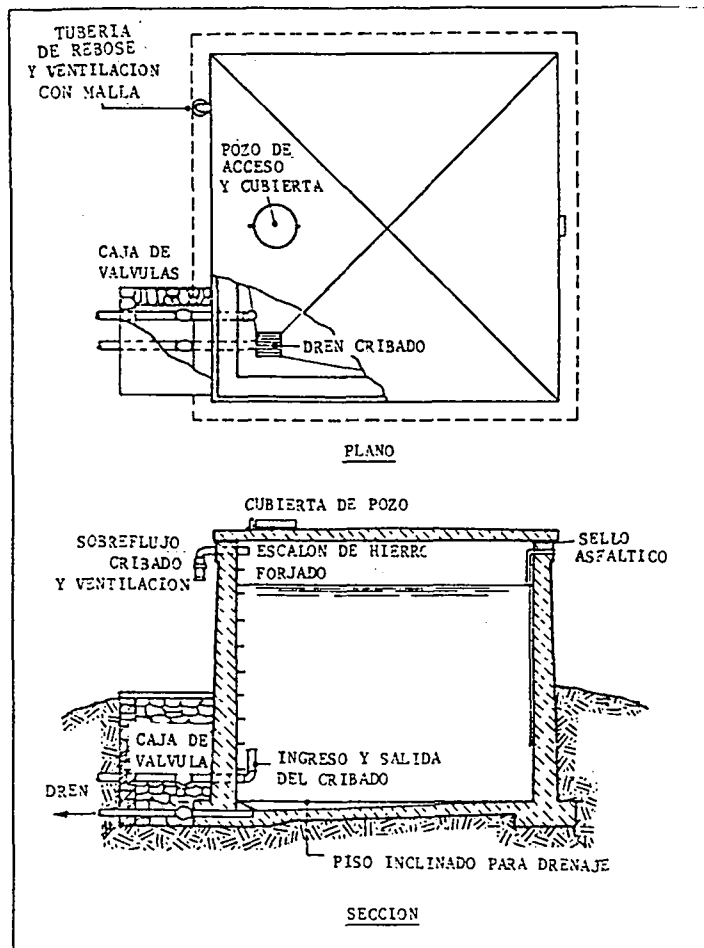


Figura 19.15  
 Detalles de construcción de un reservorio pequeño

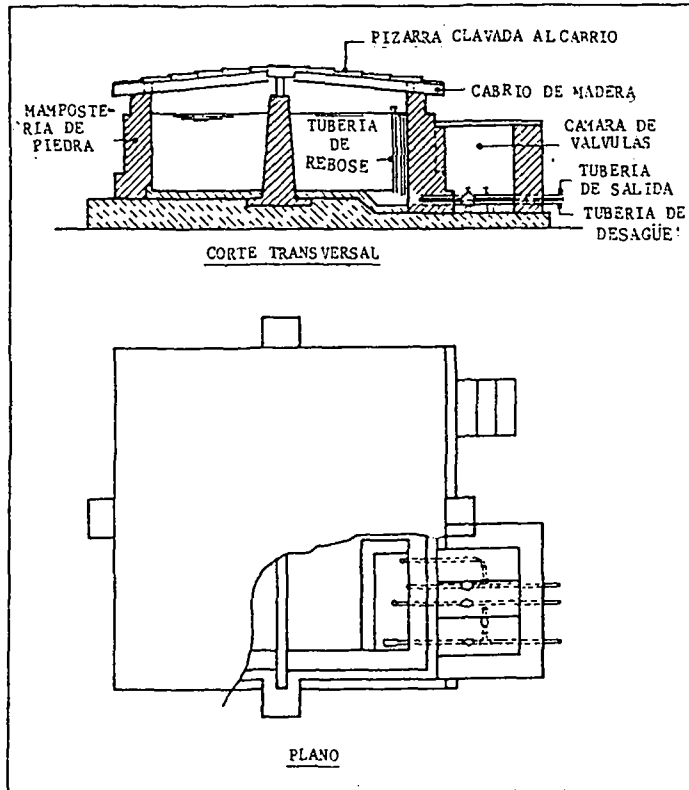


Figura 19.16  
Pequeño reservorio de servicio

En la Figura 19.17 se muestra un reservorio elevado de servicio (tanque de acero sobre soporte de mampostería de ladrillo) y la Figura 19.18, representa un tanque reforzado con enladrillado con soporte de paredes de mampostería.

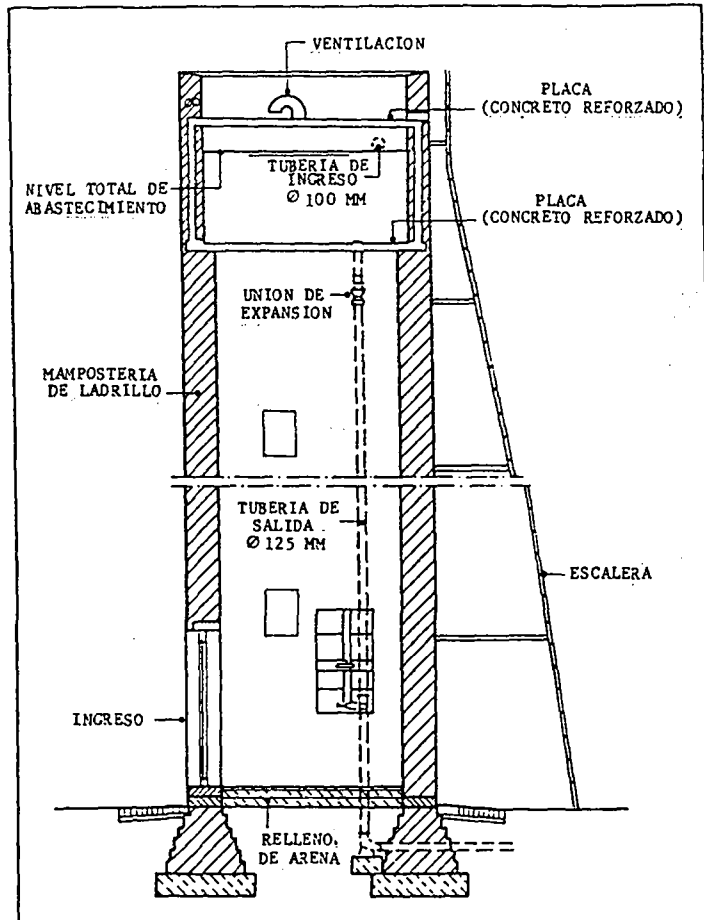


Figura 19.17  
Reservorio elevado de servicio

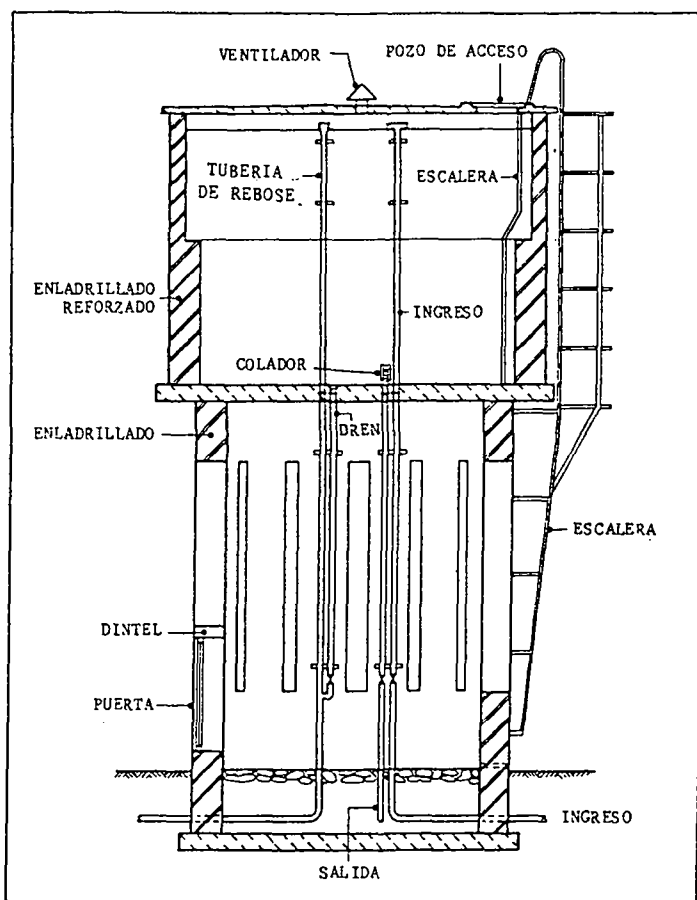


Figura 19.18  
Reservorio elevado de servicio



#### 19.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION

Después de establecer la disposición general de un sistema de distribución y sus componentes principales, se debe dividir el área de distribución en un número de sectores de acuerdo a la topografía, clasificación del uso de la tierra y densidad de población. Se puede establecer límites a lo largo de ríos, caminos, puntos altos u otras características que distinguen a cada sector. Entonces se puede trazar en el plano las tuberías matrices de distribución y las tuberías secundarias.

Una vez que se ha fijado todos los sectores, se puede estimar el número de pobladores para cada sector o calcularlos a partir de cualquier dato disponible. Entonces, se calcula la demanda de agua por sector usando cifras de uso de agua y valores seleccionados para los otros requerimientos no domésticos del agua.

Aunque en la práctica se extraerá el agua en muchos puntos a todo lo largo de las tuberías, es una práctica común de ingeniería suponer que todas las extracciones se concentran en los puntos nodales del sistema de distribución. El cálculo hidráulico se ve simplificado en mucho por esta suposición y los errores son insignificantes.

Habiéndose determinado las extracciones en los puntos nodales, se puede suponer una distribución de flujo en las diferentes tuberías y se puede calcular los diámetros requeridos de tubería. Una forma de hacer la primera suposición para los diámetros requeridos de tubería es asignar secciones imaginarias en todo el sistema de distribución. Conociéndose la demanda total de agua en el extremo de la sección corriente abajo, la velocidad de flujo de diseño selecciona y proporciona un primer cálculo del área transversal total de las tuberías que son cortadas por la sección imaginaria (Figura 19.19). Entonces, se puede dar a las tuberías individuales un tamaño tal que juntas provean al área transversal requerida.

Para el diseño preliminar de sistemas simples de distribución, se puede emplear un método bastante simple usando la tasa de consumo de agua por metro lineal de tubería de distribución. Por supuesto, esta tasa está grandemente influenciada por el tipo de abastecimiento de agua ofrecido: fuentes públicas, grifos de patio, conexiones domiciliarias o combinaciones de estos.

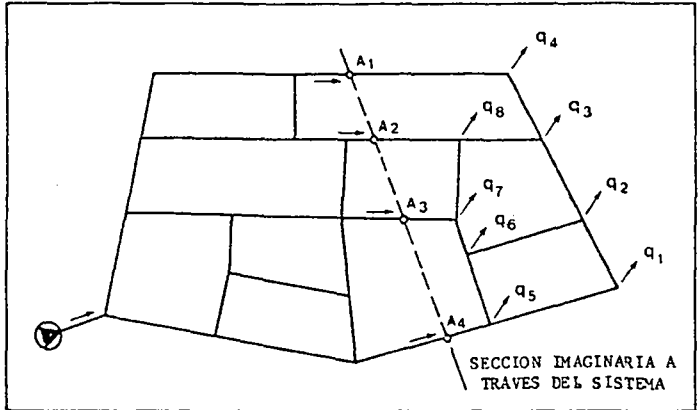


Figura 19.19  
Método de diseño de una sección imaginaria

El siguiente ejemplo ilustra este método de diseño simplificado (Figura 19.20).

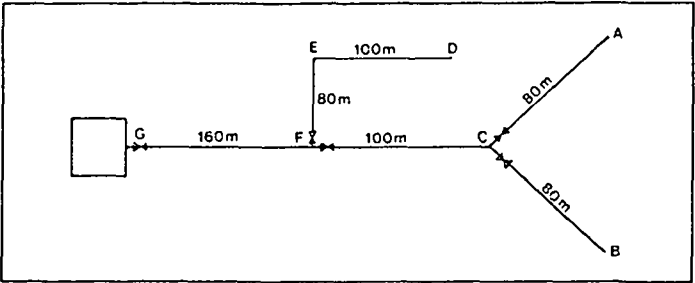


Figura 19.20  
Sistema simple de distribución de agua (esquemático)

Datos de diseño:

Número de personas servidas	1,750
Longitud total de las tuberías	600 m
Uso promedio diario de agua	50/litros/día/persona
Factor pico de demanda diaria de agua ( $k_1$ )	1.2
Factor pico de demanda horaria de agua ( $k_2$ )	1.5

### Cálculo

Flujo promedio de agua transportada por el sistema de distribución:

$$Q_{av} = 1,750 \times 50 = 87,500 \text{ litros/día} = 1.0 \text{ litros/seg.}$$

Flujo pico transportado por el sistema:

$$Q_{pico} = 1.2 \times 1.5 \times 1.0 = 1.8 \text{ litros/seg.}$$

Tasa de uso de agua por metro lineal del sistema de distribución:

$$q_{unidad} = \frac{1.8}{600} = 0.003 \text{ litros/seg por m}^1$$

Multiplicando la longitud acumulativa de la tubería para cada sección individual, por la tasa unitaria de flujo se obtiene el flujo tentativo de diseño del cual se puede calcular el diámetro de la tubería para una velocidad seleccionada de flujo. El flujo máximo transportado por tuberías de plástico es tabulado en el Cuadro 19.1 para una velocidad de diseño de 0.75 m/seg.

#### Cuadro 19.1

Capacidad de carga máxima de tuberías de plástico (para  $V = 0.75 \text{ m/seg}$ )

Diámetro		Flujo máximo	Gradiente hidráulico
mm	Pulgadas*	l/seg	m/m <sup>1</sup>
30	1.1/4	0.6	0.023
40	1.1/2	0.9	0.020
50	2	1.5	0.015
60	2.1/2	2.1	0.011
80	3	3.4	0.009
100	4	6.0	0.007
150	6	13.3	0.004

\* Aproximado

Los cálculos tentativos de diseño se realizan con mayor facilidad en forma tabulada (Cuadro 19.2).

Cuadro 19.2

Determinación tentativa de tamaños de tuberías en un sistema de distribución

Secciones	Longitud (m)	Longitud Acumulativa (m)	Flujo de Diseño (litro/seg)	Diámetro de tubería (mm)
A-C	80	80	0.24	30
B-C	80	80	0.24	30
C-F	100	260	0.78	40
D-E	100	100	0.30	30
E-F	80	180	0.54	30
F-G	160	600	1.86	60

Velocidad de diseño: 0.75 m/seg.

### 19.5 MATERIALES DE TUBERIA

Las tuberías comúnmente usadas en sistemas pequeños de distribución de agua son de hierro fundido (HF) asbesto-cemento (AC), polivinilclorido rígido (PVC) y plástico flexible de polietileno (PE). Algunas veces se selecciona el acero galvanizado (A) debido a su elasticidad, para situaciones en las que se espera el hundimiento de las tuberías. Los factores que influyen en la selección del material de tubería son: el costo y la disponibilidad de diferentes tipos de tubería, la presión señalada en el sistema de distribución, la corrosividad del agua y del terreno en el que se va a colocar las tuberías y condiciones tales como sobrecarga de tráfico, proximidad a líneas de desagüe y áreas residenciales muy pobladas.

Las tuberías de hierro fundido han sido y siguen siendo usadas a pesar de su elevado costo inicial debido a que tienen una larga vida y apenas si requieren mantenimiento. El hierro fundido es resistente a la corrosión incluso para agua que es en cierta forma corrosiva. Para mayor protección, se puede aplicar un revestimiento. Las tuberías de asbesto-cemento son muy resistentes a la corrosión ligera y fáciles de manipular. Se les utiliza ampliamente en tamaños de hasta 300 mm, principalmente para tuberías secundarias y para tuberías matrices de baja presión.

En suelos que contienen sulfato, las tuberías de asbesto-cemento están propensas a la corrosión. Las tuberías de polivinilclorido tienen la ventaja de unirse fácilmente y su resistencia a la corrosión es buena. Se les puede fabricar en varias clases de calidad para satisfacer la presión señalada seleccionada. Algunas veces se escoje el acero galvanizado para situaciones en las que ocurren elevadas presiones en el sistema de distribución pero, por lo general, no se les necesita en esquemas pequeños.

Se ofrece el Cuadro 19.3 para una referencia rápida sobre los diámetros disponibles y clases de presión para diferentes tipos de tubería.

Cuadro 19.3

Datos de selección de material de tubería

Material	Clase	Presión de prueba m de agua	Presión de trabajo m de agua	Escala disponible de tamaño (D), mm
Hierro fundido (HF)	A	120	60	50 - 900
	A	180	90	50 - 900
	B	240	120	50 - 900
Asbesto-cemento (AC)	5	50	25	80 - 300
	10	100	50	80 - 300
	15	150	75	80 - 300
Polivinilclorido (PVC)	2.5 kg/cm <sup>2</sup>	50	25	90 - 315
	4.0	80	40	50 - 315
	6.0	120	60	40 - 315
	10.0	200	100	16 - 125

DISTRIBUCION DEL AGUA

Appleyard, J.R.

LEAST-COST DESIGN OF BRANCHED PIPE NETWORK SYSTEMS  
Journal of Environmental Engineering Division  
American Society of Civil Engineers, 1975 No. 101, EE4

Azevedo Netto, J.M.

LOW-COST DISTRIBUTION SYSTEMS

En: International Training Seminar on Community Water Supply in Developing Countries (Amsterdam, 1976)  
International Reference Centre for Community Water Supply, La Haya, 1977  
(Bulletin No. 10, pp. 258-265)

Babbitt, H.E.; Doland, J.J.; Cleasby, J.L

WATER SUPPLY ENGINEERING

McGraw-Hill Book, Nueva York, 1962 (6th edition), pp. 319-346

Bonnet, L.

TRAITE PRATIQUE DE DISTRIBUTION DES EAUX

Bordas-Dunod, París, 1952

Ginn, H.N.; Lorey, M.W.; Riddlebrooks, E.J.

DESIGN PARAMETERS FOR RURAL WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

Journal Am. Water Works Assoc., Nueva York, 1966

Gomella, C.; Guerrée, H.

LA DISTRIBUTION D'EAU DANS LES AGGLOMERATIONS URBAINS ET RURALES

Editions Eyrolles, París, 1970, 4me partie, pp. 177-220

Lauria, D.T.; Kolsky, P.J.; Middleton, R.N.

DESIGN OF LOW-COST WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

The World Bank (Energy, Water & Telecommunications Dpt.), 1977  
(P.U. Report No. Res. 11)

McJunkin, P.E.; Pineo, C.S.

ROLE OF PLASTIC PIPE IN COMMUNITY WATER SUPPLIES IN DEVELOPING COUNTRIES

U.S. Agency for International Development, Washington, D.C., 1969

Munizaga Diaz, E.

REDES DE AGUA POTABLE

Ediciones Universidad Católica, Santiago, 1974

PUBLIC STANDPOST WATER SUPPLIES

International Reference Centre for Community Water Supply, La Haya, 1980  
(Technical Paper No. 13)

Trelles, R.A.; et al  
ABASTECIMIENTOS DE AGUA POTABLE A COMUNIDADES RURALES  
Instituto de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería  
Buenos Aires, 1971, pp. 255-304

Twort, A.C.; Hoather, R.C.; Law, F.M.  
WATER SUPPLY (2nd edition)  
Edward Arnold (Publishers) Ltd., Londres, 1974

**dnexos**





## 1. ENCUESTA SANITARIA

Definición

Una encuesta sanitaria es una inspección y evaluación en el sitio realizada por una persona calificada sobre todas las condiciones, dispositivos y prácticas en el sistema de abastecimiento de agua que plantean o pueden plantear un peligro para la salud y el bienestar del consumidor del agua. Las encuestas sanitarias pueden incluir todo o parte del sistema de abastecimiento de agua, dependiendo de sus propósitos. No se puede dejar de enfatizar la importancia de una encuesta sanitaria de fuentes de agua.

Por cuidadoso que sea, ningún examen químico o bacteriológico puede reemplazar un conocimiento completo de las condiciones en las fuentes de abastecimiento y a todo lo largo del sistema de distribución. Todo abastecimiento debe ser inspeccionado regularmente por expertos desde la fuente hasta la salida y - particularmente, para propósitos de examen bacteriológico - se debe repetir el muestreo bajo condiciones climáticas variantes, especialmente después de lluvias fuertes y después de reparaciones importantes o del trabajo de construcción. Se debe enfatizar que, cuando una inspección sanitaria muestra que el agua, conforme es distribuida, está propensa a la contaminación, se le debería declarar como no apta sin tomar en consideración los resultados del examen químico o bacteriológico. A menudo la contaminación es intermitente y puede que el examen químico o bacteriológico o un simple muestreo no la revele, ya que éstos sólo pueden proporcionar información sobre las condiciones prevalecientes en el momento del muestreo. Un resultado satisfactorio no puede garantizar que las condiciones encontradas persistirán en el futuro.

Con un abastecimiento nuevo, se debe realizar la encuesta sanitaria en conjunción con la colección de datos iniciales de ingeniería sobre la adaptabilidad de una fuente particular y su capacidad para satisfacer demandas existentes y futuras. La encuesta sanitaria debe incluir la detección de todas las fuentes posibles de contaminación del abastecimiento y una evaluación de su importancia actual y futura. En el caso de un abastecimiento existente, se debe realizar la encuesta sanitaria con la frecuencia requerida para el control de los riesgos de contaminación y el mantenimiento de la calidad del agua.

Se considera que la responsabilidad de las autoridades de vigilancia va más allá de la de un simple pronunciamiento de que el agua, conforme es entregada, satisface o no logra satisfacer un cierto estándar de calidad. La vigilancia debe incluir el aconsejar sobre cómo se puede eliminar los defectos y mejorar la calidad; así, a su vez, implica un conocimiento del sistema de abastecimiento de agua, incluyendo el proceso de tratamiento y una cercana vinculación con los trabajadores de laboratorio y con los operadores del abastecimiento de agua involucrados.

## Cuando se debe realizar una encuesta sanitaria

Se debe realizar las encuestas sanitarias:

- (1) Cuando se desarrolla nuevas fuentes de agua y en suficiente detalle para determinar, en primer lugar, la adaptabilidad de la fuente y, en segundo lugar, el grado de tratamiento requerido antes de que se pueda considerar al agua cruda apta para el consumo humano. No se debe aprobar ningún abastecimiento público de agua sin una encuesta sanitaria hecha, o aprobada, por una entidad con responsabilidad de vigilancia.
- (2) Cuando los análisis de laboratorio de una muestra tomada del sistema de agua indican un riesgo para la salud, se debe iniciar inmediatamente una encuesta para identificar la(s) fuente(s) de contaminación. Se debe prestar primera atención a las causas más comunes de contaminación, por ejemplo, deficiencias en la cloración.
- (3) Cuando se produce un brote de una enfermedad transmitida por el agua en o cerca al área servida por el abastecimiento de agua.
- (4) Cuando se interpreta análisis bacteriológicos, químicos y físicos de muestras de agua.
- (5) Cuando se nota cualquier cambio significativo que pueda afectar el sistema de agua, por ejemplo, la construcción de una industria nueva en la vertiente.

Las encuestas sanitarias mencionadas se realizan sólo una vez o en intervalos irregulares.

- (6) Las encuestas sanitarias también deben realizarse sobre una base regular. Su frecuencia y regulación temporal depende del tamaño del sistema y del personal y recursos disponibles. Los operadores de la planta de tratamiento deben realizar sus propias encuestas sanitarias regulares y anotarlas en el libro de registro de la planta. Lo ideal para la agencia de vigilancia sería visitar cada planta por lo menos anualmente.

El agua de sistemas grandes afecta más gente; sin embargo, los sistemas más pequeños a menudo tienen proporcionalmente más riesgos. Sin embargo, se debe inspeccionar los sistemas más grandes con mayor frecuencia y a la mayor eficacia de costo de la vigilancia. También se debe encuestar los sistemas más pequeños, pero con frecuencia realista. Las áreas rurales ofrecen un problema especial con respecto a las encuestas sanitarias, principalmente la imposibilidad física y económica de vigilar innumerables abastecimientos pequeños de agua. Los esfuerzos de las entidades de vigilancia deben centrarse primariamente en el incentivo y estímulo para que los individuos y los grupos comunitarios realicen sus propias mejoras; provean información sobre técnicas probadas y provean asistencia técnica en la selección del sitio, en el diseño y en la construcción. Lo que se busca es la demostración de prácticas adecuadas y no la simple condena de lo no adecuado.

## Calificaciones de los encuestadores

El juicio y la competencia profesional del funcionario de vigilancia determina, en última instancia, la confiabilidad de los datos e información recolectados. Por lo general, la vigilancia rutinaria externa la proveen inspectores sanitarios y de salud pública que no están completamente capacitados en las disciplinas de ingeniería relacionadas con las instalaciones de abastecimiento de agua. La observación de numerosos programas indica que se puede realizar programas exitosos de vigilancia usando, bajo una supervisión cercana y calificada, graduados de escuela secundaria con una instrucción técnica de uno o dos años, y experiencia de capacitación en el lugar de trabajo. Estos inspectores deben disponer de asistencia técnica, si fuera necesario. Los sistemas más grandes y más complejos deben ser vigilados por el personal "de más experiencia".

La falta de un número adecuado de personal calificado no debe tomarse como excusa para la inactividad, sino como un reto para establecer programas adecuados de capacitación. A través de varias organizaciones internacionales y otras entidades, se dispone de asistencia técnica y de becas.

La mayor parte de las encuestas sanitarias de rutina deben ser realizadas por operadores de planta. Esto puede necesitar una capacitación adicional del operador. El operador principal debe acompañar al funcionario de encuesta durante su inspección, no sólo para remediar cualquier defecto no cubierto sino porque se debe considerar a la encuesta como una sesión de capacitación. Además de explicar el "por qué" de varias actividades de investigación y de los procesos de tratamiento, se debe mostrar al operador, en lugares en donde sea aplicable, métodos adecuados para la selección de puntos de muestreo, para la toma de muestras para análisis bacteriológicos y químicos y para la medición del cloro residual.

Un requerimiento absoluto mínimo para cualquier sistema, sin considerar el tamaño, es que se debe designar a una persona como responsable por el funcionamiento del sistema; esta persona u otra designada por él debe ser localizable ("de turno") a cualquier hora en la que esté en operación un sistema que use fuentes superficiales y desinfección y, para sistemas que empleen la cloración, el operador principal debe tener a mano dispositivos o equipo para medir el cloro residual y debe ser competente en su uso, incluyendo los ajustes indicados en las escalas de dosaje de cloro.

La confiabilidad del sistema de agua durante la operación normal de emergencia, el mantenimiento adecuado y las características de diseño establecen la continuidad de operación. Los ejemplos incluyen la provisión de dos o más pozos para sistemas con fuente de agua subterránea, fuente auxiliar de energía o la provisión de almacenamiento elevado y el uso de válvulas en el sistema de distribución para permitir cierres parciales para reparaciones.

## REGISTROS Y HOJAS DE INFORMES

Una ayuda considerable tanto para el personal de la entidad de vigilancia como para los operadores del abastecimiento de agua, ha sido la preparación de pautas impresas, listas de verificación y formularios para llevar a cabo las encuestas sanitarias. A menudo éstas son mimeografiadas en papel barato en el idioma nacional. Varias de las publicaciones presentadas en listas en la referencias ofrecen una guía excelente a este respecto. Además de su valor educativo y su utilidad como listas de verificación, estos formularios se convierten en parte del registro permanente y, como tales, son útiles para acciones de ejecución y seguimiento.

El informe debe explicar en forma clara e inequívoca las recomendaciones hechas, las acciones que deben tomarse y las fechas límites para la acción. Se debe evitar cualquier confusión entre acción "sugerida" o "deseable" y acción obligatoria.

## MUESTREO Y MONITOREO

### Propósito

Se extrae las muestras de sistemas de agua potable para determinar si el agua abastecida es segura para el consumo humano. En cuanto a que es imposible analizar toda el agua, la pequeña porción o muestra debe ser representativa de la gran cantidad que es usada. Si se toma la muestra en forma descuidada o se le toma de locaciones que no son verdaderamente representativas del sistema, entonces se iría contra el propósito del muestreo. Ese muestreo puede incluso ser peligroso debido a la creación de un falso sentido de seguridad.

Una muestra de un sistema de agua es de valor limitado. Son deseables los registros extensos de muestras múltiples.

### Frecuencia y número de muestreos

Tradicionalmente, la frecuencia de muestreo para los abastecimientos públicos de agua ha estado basada en un número mensual mínimo acordado para la población servida por un abastecimiento dado de agua, requiriéndose así menos muestras bacteriológicas de abastecimientos pequeños. Sin embargo, la frecuencia de muestreo también debe tomar en cuenta la frecuencia pasada de muestras no satisfactorias; la calidad del agua cruda tratada, el número de fuentes de agua cruda, la adecuación y capacidad del tratamiento, los riesgos de contaminación en las fuentes y, en el sistema de distribución, la complejidad y tamaño del sistema de distribución, los peligros de brotes epidémicos, por ejemplo, en puertos internacionales o centros de peregrinación, y la aplicación de la cloración.

Superficialmente, la cloración puede implicar que se necesita menos muestreo. Sin embargo, los estudios de campo en países en desarrollo indican que a menudo la cloración de abastecimientos de agua no se practica en abastecimientos más pequeños con fuentes naturalmente protegidas; por ejemplo, pozos profundos. En vez de esto, se practica la cloración en sistemas de abastecimiento de agua con contaminación verdadera o potencial de la fuente o distribución en donde la falla del sistema de cloración podría resultar en un serio riesgo para la salud de la población servida. Así, se necesita revisiones constantes de la concentración residual de cloro y de la calidad bacteriológica para asegurar que se puede tomar una acción inmediata de remedio, si ingresa agua de dudosa calidad al sistema de distribución.

Debido a las numerosas variables subrayadas anteriormente y a la amplia variedad en recursos disponibles para la vigilancia, no es posible una frecuencia de muestreo universalmente aplicable. En principio, el examen bacteriológico del agua clorada debe hacerse diariamente. Esto es factible en los abastecimientos más grandes; pero, en los abastecimientos pequeños que sirven a una población de 10,000 personas o menos, puede que el muestreo bacteriológico diario no sea practicable y se tenga que confiar en los análisis bacteriológicos en intervalos semanales o mensuales. En los abastecimientos más pequeños, se tiene que confiar plenamente en las encuestas e inspecciones sanitarias y, en lugares donde se practica la cloración, en la determinación frecuente de la concentración residual de cloro.

La OMS ha publicado, en las "Normas Internacionales para el Agua Potable", recomendaciones-guías para el número y frecuencia de muestreo. El número real y frecuencia de muestreo lo deben decidir la entidad de control y vigilancia, considerando las condiciones locales. Los criterios y estándares adoptados para uso local deben ser claramente establecidos y distribuidos en escritos para una adecuada vigilancia y para el uso de los trabajadores del agua y, sobre todo, deben ser adecuados al tipo y tamaño de los abastecimientos de agua especificados. Los estudios de campo en los países en desarrollo indican un uso extendido, "en el papel", de los números y frecuencias de muestreo adoptados en los Estados Unidos, el Reino Unido y otros lugares; en realidad, con la excepción de unas pocas ciudades capitales, hay en la práctica poca adherencia a la norma.

#### Ubicación de puntos de muestreo

No se debe tomar las muestras de los mismos puntos en cada ocasión, sino que se debe rotar a través de otras zonas del sistema de distribución. Un hábito común, que puede producir resultados engañosos, es la colección de muestras de los mismos puntos mes tras mes; típicamente, el grifo del laboratorio en el edificio municipal, la estación de policía o la residencia de un empleado de la empresa de agua.

Una mayor parte de las muestras para análisis bacteriológicos y para análisis de cloro residual debe extraerse de áreas problemáticas conocidas, por ejemplo, áreas con resultados pobres en el pasado, zonas de baja presión, áreas con filtraciones elevadas, áreas densamente pobladas con desagüe inadecuado, reservorios de servicio al descubierto o no protegidos, terminales de punto muerto de las tuberías, áreas más distantes en la periferia del sistema de tuberías y áreas en la periferia del sistema más distantes de las instalaciones de tratamiento.

Muchas áreas urbanas usan agua de varias fuentes, a menudo de tres o cuatro y algunas veces de 20 ó más. La ubicación de los puntos de muestreo en el sistema de distribución debe asegurar que se realice muestras con el agua de cada fuente, en forma periódica. Se debe realizar con mayor frecuencia en las fuentes que sirven a poblaciones más grandes, fuentes superficiales de agua, fuentes que sirven sistemas antiguos de distribución y fuentes con problemas conocidos en la calidad del agua en el pasado.

Un método común de distribución de agua en muchas ciudades grandes es mediante el uso de camiones cisterna. En algunas ciudades, más de la mitad de la población puede recibir su agua potable por este medio.

Las estaciones de agua donde se llena los camiones deben ser periódicamente examinadas y el agua, conforme se distribuye en los camiones, también debe ser examinada sin advertir previamente al conductor-proveedor.

#### Colección de muestras

Se debe instruir a los colectores de muestras en los procedimientos de muestreo, incluyendo:

1. Ubicación del punto de muestreo como se describió anteriormente. Se debe instruir específicamente a los técnicos en cuanto a los sitios de muestreo.
2. El uso y propósito de compuestos decloradores tales como trisulfato de sodio añadido a la botella de muestra.
3. Medida de OT, OTA o DPD cloro residual. Se debe realizar estas pruebas inmediatamente después de la toma de la muestra.
4. Procedimientos adecuados para la colección de las muestras para asegurar que son representativas y que, para las muestras bacteriológicas, se mantiene la esterilidad de la botella de muestra. En lugares donde los colectores contaminan repetidas veces las muestras, se puede desarrollar una actitud complaciente con respecto a las muestras que presentan coliformes.
5. Transporte y almacenamiento adecuados de las muestras. Estas deben llegar al laboratorio dentro de las 30 horas. No se necesita refrigerarlas, pero se les debe proteger de la exposición al calor o a la luz solar.

### Transporte de las muestras

A menudo en muchos países los colectores de muestras no tienen vehículos personales y se tiene que hacer arreglos especiales para el transporte de ellas. En algunas áreas ha sido exitoso el uso de transportes públicos, en especial autobuses e incluso trenes, botes y aeroplanos; pero no ha sido así en lugares donde el colector de muestras debe pagar por la carga de su propio bolsillo. El transporte de muestras debería ser un factor clave en la ubicación de laboratorios regionales.

### Coordinación con el laboratorio

La necesidad de coordinación entre los colectores de muestras y el personal de laboratorio debe ser obvia; pero, desafortunadamente, existen muchos ejemplos de muestras que llegan y permanecen en la estación de ómnibus por días y que llegan al laboratorio durante los fines de semana cuando éste está cerrado y de prácticas similares que perjudican la utilidad de la muestra.





## 2. METODOS DE PERFORACION DE POZOS

## INTRODUCCION

El equipo y herramientas de perforación de pozos más modernos y caros no son necesariamente los mejores con los que se puede perforar un pozo, aunque puede que el folleto de ventas de los fabricantes diga lo contrario. La perforación de pozos pertenece al pequeño grupo de actividades de ingeniería que están tan influenciadas por factores locales y quizás por condiciones subterráneas desconocidas, que rara vez existe una ubicación que invite a la aplicación de un método preciso de perforación y de construcción de pozos.

Para el observador inexperto, un viejo equipo de herramientas de cable golpeando fuertemente todo el día con herramientas de aspecto tosco y maquinaria no sofisticada puede parecer un enfoque retrógrado, pero bien puede haber sido esta característica de simpleza la que dictó la elección del método.

No hay ningún equipo ideal de perforación de uso múltiple, ni ningún sistema ideal de perforación. Si uno examina las estadísticas del escenario de perforación norteamericano, en donde tres cuartas partes de un millón de pozos de agua fueron perforados por unos nueve mil contratistas en un año (1978), se vuelve inmediatamente obvia la fuerte tendencia hacia la perforación rotatoria. También se apreciará que generalmente las comunicaciones entre los Estados Unidos de América y Canadá son excelentes permitiendo el movimiento rápido de repuestos y de ingenieros de servicio, especializados; en estos países en muchos casos se dispone rápidamente de datos hidrogeológicos y los elevados costos de trabajo y la competencia intensiva demandan un ritmo rápido de perforación.

En los países en desarrollo con finanzas limitadas, la perforación de pozos en área remotas, con mano de obra en su mayoría no calificada y un mínimo de apoyo, debe considerar cuidadosamente el grado de sofisticación que se puede tolerar. Otro grupo de condiciones prevalecen en Europa Occidental, en donde el énfasis está puesto en relativamente pocos pozos de gran diámetro con bombas de gran salida que distribuyen agua a través de una amplia red de abastecimiento sobre áreas de distribución de tamaño considerable.

Antes de proseguir describiendo los diferentes métodos de perforación de pozos, se debe mencionar que hay cierta variación entre los nombres dados a ciertas herramientas en los países de habla inglesa. En donde es posible, se usa los términos más comunes y en forma ocasional se pondrá entre paréntesis una alternativa. Algunos contratistas se llaman a sí mismos "perforadores de pozo", otros "perforadores". Los términos "tubería de revestimiento", "entubado", "revestimiento" o "funda" de un pozo deberían ser auto-explicatorios, pero algunas veces surge cierta confusión sobre las palabras "pozo excavado" y "pozo tubular". Hablando en forma general, se refieren a lo mismo, aunque los puristas pueden insistir en que un pozo excavado es hecho manualmente y un pozo tubular es perforado con máquinas.

## Perforador con herramientas de cable (de percusión)

La perforación de percusión con herramientas de cable es un método muy antiguo; ya que se le usaba hace más de 1,000 años en China. Básicamente el método no ha cambiado, pero se ha mejorado enormemente las herramientas. Es adecuado para la perforación tanto de excavaciones pequeñas como de excavaciones grandes, a profundidades de hasta 300-500 m. La perforación por percusión de cable usa equipo relativamente barato. Su mayor desventaja está en que es un método muy lento. Esto constituye una limitación en su uso en países en desarrollo, en donde a menudo se necesita perforar un gran número de pozos lo más rápidamente posible.

En la perforación de percusión con herramienta de cable, se levanta y deja caer una pesada barrena o trépano de perforación para quebrar la roca y así abrir camino dentro de la formación. Un juego de herramientas se encuentra suspendido de un cable de acero que se hace pasar sobre una polea cabecera con un sistema de amortiguación formado por resortes y soportes de caucho, en la parte superior del equipo de perforación y bajo una polea tensora al extremo de un balancín. Luego pasa encima y sobre una polea posterior para enrollarse en un tambor de freno conocido como carrete de giro o carrete principal (elevador de herramientas) (Figura 1).

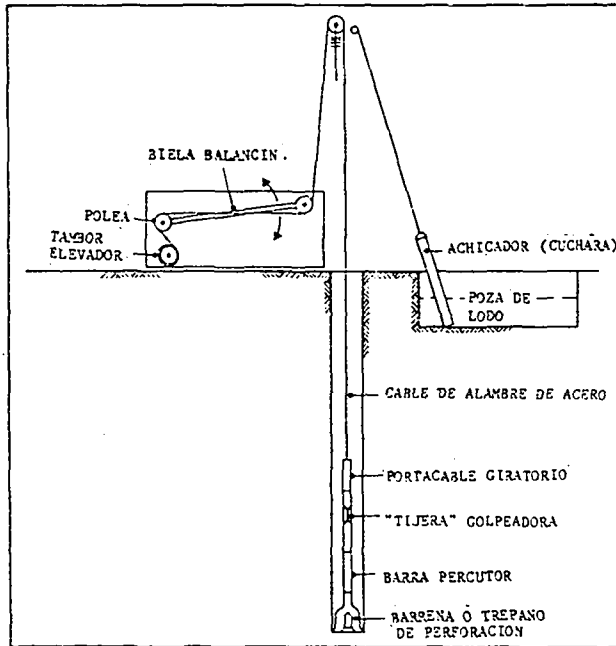


Figura 1  
Herramienta de cable o equipo de perforación de percusión

Una varilla de conexión transmite movimiento desde una manivela de carrera variable hasta el extremo libre del balancín, el que imparte por sí mismo una acción recíproca al cable y a las herramientas suspendidas.

El juego de herramientas consiste en una barrena o trépano de perforación (cortadora) bajo un vástago de perforación (barra perforadora), quizás percutores de perforación, luego un portacable giratorio conteniendo un mandril dentro del cual se asegura el cable (Figura 2).

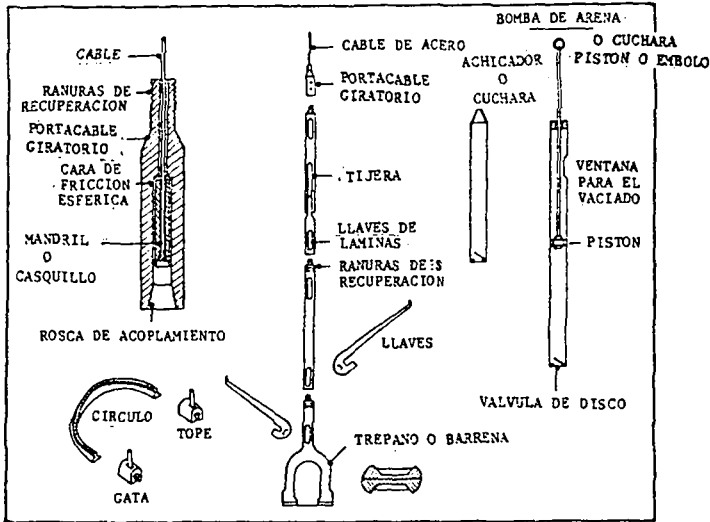


Figura 2  
Herramientas de percusión

Los perforadores se funden en acero de alto carbono y se requiere que penetren, triturén, mezclen y ensanchen. Los perforadores para formaciones duras tienen un ángulo directo de penetración, una gran área transversal (para proporcionar fuerza) y tienen pequeños "canales" o canales de agua a los lados; los perforadores para un estrato de arcilla suave tienen un borde filoso, ángulos amplios y grandes canales de agua con un área pequeña para permitir una rápida reciprocidad a través de una lechada viscosa.

Originalmente casi todos los equipos de herramientas de cable estaban equipados con un soplador para proveer aire a una forja para el afilamiento y reformación de la barrena o trépanos, pero actualmente la mayoría de equipos cuentan con máquinas de soldar eléctricas portátiles con las cuales se puede aplicar una soldadura por pasos transversales moderadamente fuerte en el lado de trabajo.

La barra de perforación está ubicado sobre la barrena o trépano para proveer peso y más estabilidad direccional. Asimismo, mediante su acción de bombeo, mueve el material cortado hacia arriba, lejos de la barrena.

Se debe colocar la "tijera" de perforación sobre la barra de perforación cuando existe el riesgo de que pedazos de roca caigan dentro y obturen las herramientas en la perforación; estos tienen el propósito de sacudir las herramientas que se atascan en el hoyo de la perforación. Las tijeras no ayudan de ninguna manera a la función de perforación; por el contrario, se suman a la lista de puntos mecánicos débiles y por esta razón a menudo el operador los evita cuando la prudencia aconsejaría su inclusión. En efecto, son eslabones deslizantes que dan unos 150 mm de movimiento vertical libre diseñados de forma tal que tengan un diámetro sólo un poquito mayor que el vástago. Por lo general se les opera ejerciendo una tracción continua de energía en el cable y las herramientas que se atascan. Al mismo tiempo, se hace descender un paso coaxial (tope de la tijera) por el cable de perforación. Un golpe en la parte superior del portacable giratorio cierra momentáneamente la tijera, los que regresan hacia atrás para dar un golpe positivo en dirección ascendente.

El objeto que se encuentra más al extremo en el juego de herramientas es el portacable giratorio. Este tiene la doble función de adherir el cable metálico (línea de perforación) a las herramientas e impartir una rotación continua. Dentro del casquillo se encuentra un mandril o casquillo en el cual se asegura la línea de perforación. El hombro superior del mandril consiste en una superficie lisa, endurecida, que se localiza dentro del portacable y lleva todo el peso del juego de herramientas.

La línea de perforación es una varilla de cable de acero no premoldeado, de torsión izquierda. Cuando se inicia la perforación, el peso de la herramienta desarrolla en el cable una rotación en sentido de las agujas del reloj y transmite esta tensión a través de la cara del casquillo/mandril hacia las herramientas, oponiéndose a cualquier tendencia de que las uniones de herramientas puedan desenroscarse hacia la mano derecha. Entonces las herramientas comienzan lentamente a rotar, moviendo el barreno a una nueva posición en cada golpe, asegurando así la perforación de un pozo circular.

Dependiendo de varios factores, tales como viscosidad de los cortes, tensión de la línea, peso de las herramientas, etc., la línea de perforación eventualmente resiste el proceso de desenrollado y retorna a su "ubicación" natural y lo hace interrumpiendo momentáneamente la fricción entre el mandril y el casquillo. Esto ocurre durante cada golpe o con la frecuencia de 60 ó más golpes a profundidades mayores. Por supuesto, la masa de herramientas de rotación lenta no es afectada por esta súbita inversión de la línea, pero el operador lo siente cuando pone la mano en la línea.

En la actualidad existe una columna de herramientas que pesa entre 300 y 4,000 kg alternando en 40-80 veces por minuto en un golpe de entre 1.2 y 0.4 m y rotando lentamente. En esta etapa, el operario hace ajustes vitales a sus controles del equipo; en primer lugar, se establece de tal forma que los golpes por minuto del juego de herramientas apenas pueden ir al paso del movimiento impartido por el balancín recíproco, sin causar un enganche violento en la línea de perforación y, en segundo lugar, la línea de

perforación es arriada del tambor principal hasta que el barrenó sobresalga y dé un fuerte y limpio golpe al fondo del pozo. El movimiento de salida y de rápido retiro están complementados por la polea cabecera amortiguada con caucho y, especialmente a profundidad, por el juego natural en la línea de perforación.

Los dos arreglos anteriores son absolutamente críticos y dejan un pequeño margen de error. Si el retiro es demasiado lento, el barrenó progresará muy poco; si es muy rápido, el equipo se dañará seriamente; si la línea está demasiado suelta, esto invita a problemas de verticalidad y de escaso progreso si la línea está demasiado ajustada, se produce una perforación vertical pero de muy poca longitud en metros y puede que el portacable giratorio no funcione, interrumpiendo así la rotación de la herramienta.

Se ingresa agua al pozo en cantidades pequeñas hasta que se alcance un abastecimiento natural. El propósito del agua es producir lechada del material cortado y suspender este material sobre y fuera de la cara de la barrena. Enfríar y lubricar el juego de herramientas son funciones menores.

Cuando las herramientas golpean correctamente el fondo de la perforación, la profundidad del pozo aumentará y esto alterará los dos arreglos críticos que acaban de discutirse.

Entonces el operario ajusta el control secundario o "fino" en el freno del tambor principal hasta que el tambor comienza a correr y así ganar una fracción de la línea de perforación en cada golpe.

Ahora el equipo de perforación está en operación y, suponiendo que no haya ningún cambio de estrato, continuará hasta que el operario sienta literalmente, que el espesamiento de la lechada demora a las herramientas. Entonces el operario disminuirá los golpes del equipo para ponerlo al ritmo de las herramientas por un momento, o limpiará la perforación, una operación inevitable más tarde o más temprano.

Para este propósito, se utiliza un achicador (o cuchara) (Figura 2). Se retira las herramientas y se hace ingresar el achicador al pozo en una línea separada llamada cable de cuchara. El achicador consiste en un tubo de acero con una válvula de disco en el fondo. La lechada llena el achicador y es levantada a la superficie y vertida en la poza de lechada (Figura 1) repitiéndose la operación hasta que se limpie la perforación.

Cuando se perfora roca dura, el operario puede dejar un poco de lechada en la perforación de tal forma que los cascajos de roca se hallen en suspensión. Se puede introducir incluso un poco de arcilla para este propósito.

Una bomba de arena o cuchara de émbolo (Figura 2) es similar a un achicador, pero incorpora un pistón dentro del tubo y la varilla del pistón está adherida a la línea de arena. Cuando se le hace descender en posición extendida, el tubo llega a descansar en el fondo de la perforación. Un nuevo descenso permite que el pistón llegue hasta el fondo de su carrera con

su válvula de disco abierta. Un rápido retiro hace que el pistón suba con la válvula cerrada hasta el tubo, el que absorbe la lechada a través de la abertura del fondo. En la parte superior de la carrera, el pistón llega a un retén y eleva toda la bomba de arena a la superficie.

Cuando empieza la perforación, siempre se perfora o se hunde manualmente en el suelo un tubo guía o tubería conductora. Este tubo es esencial para estabilizar el suelo alrededor del área de trabajo y se le tiene que colocar en un alineamiento verdaderamente vertical con el fin de empezar o mantener una perforación vertical.

En grada o arenisca firme con poca sobrecarga, puede que sólo sea necesario perforar y colocar, unos 15 m de tubos permanentes como un sello contra la contaminación por el agua superficial. El resto del pozo sería perforado en forma abierta y no presentaría problemas.

Lo opuesto es el caso con material no consolidado, especialmente si tiene estratos duros intermedios. Bajo estas circunstancias, algunas veces es necesario empezar en un diámetro de 450 mm e insertar varios tramos de tubos temporales intermedios para producir un hoyo perforado alineado y terminado de 150 mm de diámetro. En todo caso, si el ingeniero de perforación se anticipa a los problemas, tales como pedrejones, puede optar por iniciar un diámetro extra grande, aunque sólo sea para poder ganar cierta libertad con vistas a la verticalidad cuando se inserta los tubos permanentes. Esto, por supuesto, puede introducir un elemento no deseado en cuanto a que un espacio anular más grande requeriría más lechada de cemento, pero esto a menudo está compensado por el hecho de que el mayor diámetro provee más alcance para "trazar" pedrejones y colocar tubería de emergencia.

Hace dos o tres décadas, era práctica común llevar tubos hasta la profundidad requerida, si se ajustaban, y en realidad el plan estándar de tuberías de perforación por percusión incluye esta factibilidad. Los tubos estaban provistos de "cabezas y zapatas guidoras". Las gatas pesadas fueron herramientas estándar pero como la mayoría de tubos eran encajados, hubo muchos casos en donde la recuperación era imposible y se completaron los pozos incorporando varias columnas de tubos no necesarios.

El uso de tubos temporales de juntas machiembradas y el darse cuenta de la necesidad de mantener los tubos en movimiento mediante el "ondeaje" resultaron en la aplicación de persuasión, en lugar de fuerza, a los tubos y su recuperación ahora es la regla en lugar de la excepción. De hecho, se debería evitar la práctica de forzar los tubos en donde sea posible y sólo se le debe usar como último recurso.

## PERFORACION HIDRAULICA ROTATORIA

### Circulación directa - perforación rotatoria

En este sistema se realiza la perforación mediante una barrena o trépano giratorio llamado comúnmente tricono; desgastadora y trituradora que muele o rompe la formación mientras que el material cortado y el suelo aflojado son retirados de la perforación mediante una circulación continua de fluido de

lavado. La perforación rotatoria es particularmente adecuada en formaciones de terreno suelto y roca suave. Se puede hacer perforaciones de gran diámetro a profundidades considerables. La más grande desventaja es el requerimiento de cantidades sustanciales de agua, lo que puede ser un serio problema especialmente en áreas donde escasea.

El fluido, usualmente basado en arcilla, es mezclado en una poza de lodo o tanque y es bombeado a presión elevada a través de una manguera flexible hasta la parte superior de una columna giratoria de herramientas llamada columna de perforación. Entonces fluye a través de las herramientas hasta el fondo del pozo y regresa a la superficie y nuevamente hacia dentro del pozo de lodo (Figura 3).

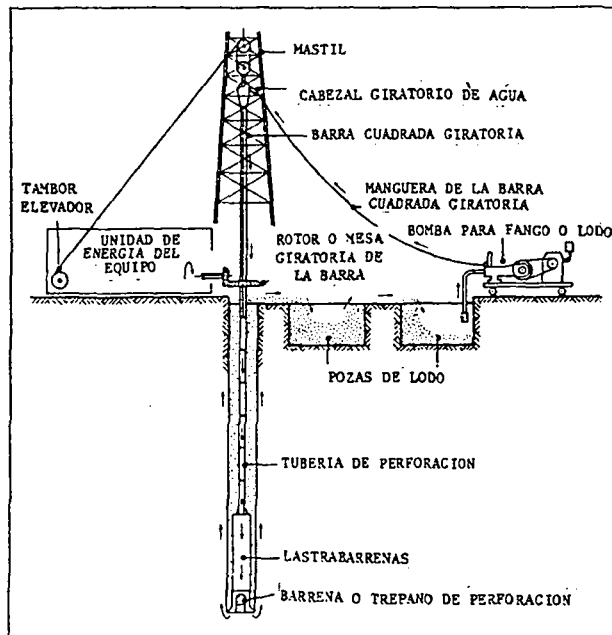


Figura 3  
Perforador rotatorio de circulación directa normal

En la base de la columna de perforación se encuentra la barrena o trépano que es del tipo rodillo cortador (triconos) o, menos comúnmente, el tipo de barrena de aleta plana. Una barrena o trépano de rodillo para roca lleva tres o cuatro cortadores (conos) dentados de acero duro que tienen vías de paso para conducir el fluido que enfría y lubrica a los rodillos; limpia los dientes y evita el material cortado.

Se aplica la barrena o trépano al fondo de la perforación y gira a velocidades de 3-30 rpm - dependiendo del diámetro y del estrato - y se aplica un peso dentro de una escala de 250-2.750 kg por 25 mm de diámetro.



En roca dura la línea de contacto de los dientes provoca que la formación se derrumbe debido a la sobrecarga; en roca más suave se sesgan los rodillos ligeramente para añadir una acción de torsión y para roca suave se da forma a los dientes para que desgarran.

Los barrenos de aletas no llevan rodillos. Tienen tres o cuatro cuchillas de superficie dura y cortan el estrato blando en forma similar a un taladro de madera. Perforan rápidamente en condiciones muy suaves pero tienden a desgastar la tubería de perforación y ajustar demasiado la unión de herramientas si se les usa a través de capas duras donde puede ocurrir el traqueteo.

Las restricciones de verticalidad y rectitud mencionadas para perforaciones hechas con percusión, se aplican igualmente a los pozos rotatorios, pero la perforación rotatoria sufre una desventaja en cuanto a que se debe colocar un peso continuo en la barrena y consecuentemente la gravedad tiene menos efecto en la columna de herramientas. Sin embargo, generalmente se puede lograr una perforación libre de ensortijados debido a la influencia estabilizadora de los lastrarbarrenas de perforación. Los lastrarbarrenas de perforación (Figura 3) son tuberías extra pesadas que se colocan sobre el barreno para proveer el peso necesario y para ayudar a una perforación recta. Además, como son de gran diámetro en relación al pozo, resultan en un anillo más pequeño provocando una velocidad aumentada de fluido que aparta rápidamente el material cortado de la vecindad del barreno. Lo ideal es que la mayor parte de la longitud de la columna de herramientas esté tensa desde el trépano de ruedas de corona (triconos) del equipo de perforación, pero esto no siempre es posible y algunas veces se añade peso por medio de un mecanismo hidráulico o de cadenas conocido como un "tira-abajo", (mecanismo para ejercer presión, empuje en forma descendiente de la columna).

La longitud principal de la columna de perforación consiste en tuberías de perforación (Figura 3) que se agregan conforme aumenta la profundidad; se extienden desde la parte superior de los lastrarbarrenas de perforación hasta la superficie. Por lo general tienen longitudes de 3-10 m y se selecciona el diámetro para que esté de acuerdo a las condiciones de perforación, por ejemplo, el diámetro libre a través de la tubería y uniones debe ser tal que resulte en la pérdida mínima de carga en el fluido descendente y la tubería de perforación debe ser lo suficientemente grande para promover una velocidad de fluido razonablemente elevada para un tamaño dado de bomba de lodo.

La longitud última de la tubería es de construcción especial y se le llama barra cuadrada rotatoria. Su propósito es transmitir conducción rotatoria desde el rotor o mesa rotatoria y, por lo tanto, es una sección cuadrada, hexagonal o redonda con ranuras o estrías para caber en una abertura correspondiente en la mesa rotatoria. Esto facilita el movimiento vertical libre y así permite que la barra cuadrada rotatoria alimente la perforación, conforme se procede a la perforación, o que se la retire.

Se ubica el cabezal o unión giratoria en la parte superior de la barra cuadrada. Contiene un conjunto de rodamiento que resiste el peso completo del juego de herramientas. También tiene una entrada para que el fluido de

perforación pase desde la bomba de lodo a través de la manguera de la barra cuadrada rotatoria y de un cuello adecuado para controlar el paso del fluido desde el cabezal giratorio estático hasta la barra cuadrada rotatoria.

Conforme avanza la perforación y se lleva a la superficie el material cortado, la barra cuadrada rotatoria pasará a través del rotor hasta que la unidad del cabezal giratorio llegue a éste. Entonces se detiene la alimentación, se puede disminuir la rotación y se permite al fluido circulante continuar llevando, por corto tiempo, el material cortado más reciente fuera de la barrena y de los lastrabarrenas de fisura. Entonces se detiene la bomba, se retira la barra cuadrada rotatoria y se le desanrosca de la tubería de perforación, mientras la segunda es suspendida en los sostenes de la mesa rotatoria. Se añade otra tubería de perforación y se le hace descender con la columna de la tubería hasta que esté al nivel de la mesa, cuando se adhiere nuevamente la barra cuadrada rotatoria y se reinicia la circulación. Se engancha la rotación y finalmente se aplica la barrena una vez más al fondo de la perforación. Se repite el procedimiento anterior hasta que se alcance la profundidad final o se retire las herramientas para cambiar las barrenas.

### Circulación invertida - perforación rotatoria

Este método difiere del sistema más común de "circulación directa" en que se hace circular el fluido de perforación en dirección invertida. Básicamente, el equipo es similar en arreglo general pero considerablemente más grande; por ejemplo, el camino del agua a través de las herramientas, tubería de perforación, cabezal giratorio y barra cuadrada rotatoria, rara vez es menor a 150 mm de diámetro (Figura 4). El diámetro de perforación mínimo práctico está en el orden de 400 mm pero se conoce tamaños que exceden los 1.8 m.

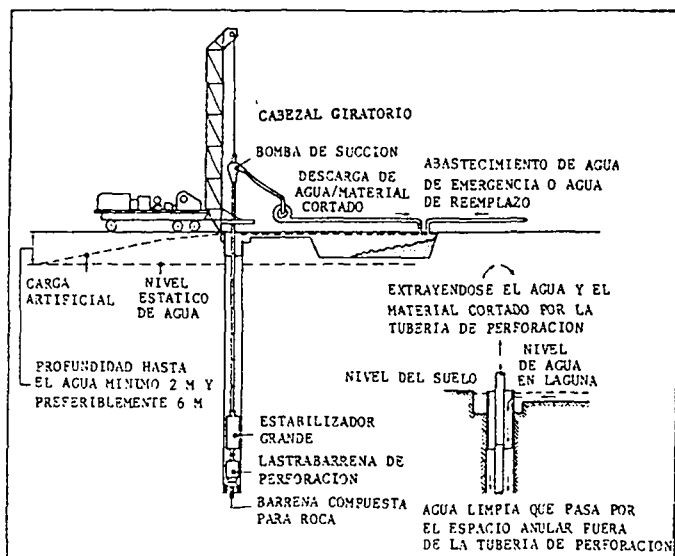


Figura 4  
Perforador rotatorio de circulación invertida

Las barrenas o trépanos tricónicos convencionales dentro de la escala de diámetro anterior no serían prácticas y, por lo tanto, es usual colocar una barrena compuesta de rodillo para roca. Esta consiste en una firme placa de base, en cuya parte inferior se coloca un número de rodillos dentados arreglados de tal forma que se amolden a toda la cara del pozo. La placa de base incorpora pasajes cortos que se elevan hacia una perforación común en la brida de acoplamiento. El material liberado por la acción de excavación es extraído a través del centro de la barrena y llevado rápidamente a la superficie.

Sobre la barrena se atornilla un tubo de bridas de diámetro máximo. Este contiene un tubo central del mismo diámetro interior de la tubería de perforación. Las aberturas al extremo del tubo exterior permiten que el agua limpia de flujo descendente pase sin obstáculos. A este conjunto se le llama estabilizador y evita que las herramientas deriven lateralmente.

Una barrena compuesta requiere peso para proveer penetración y esto se logra, al igual que en otros métodos, incorporando lastrabarrenas de perforación en la columna. Estos pueden ser de un diámetro considerablemente más pequeño que el del pozo. Bajo ciertas condiciones se puede volver a arreglar la secuencia de estabilizadores y lastrabarrenas de perforación. Las barrenas descritas anteriormente son adecuadas para estratos no consolidados, arcilla suave y roca blanda. La arcilla dura requerirá el uso de una barrena de aletas.

La tubería de perforación para el trabajo de circulación invertida debe tener acoplamientos que presenten un diámetro interno sin obstáculos y, por lo tanto, normalmente son del tipo de bridas. También son relativamente cortos con el fin de emplear una correspondiente barra cuadrada rotatoria corta para evitar elevaciones de succión sobre el suelo.

Se descarga el agua y el material cortado en una gran laguna temporal cuyo tamaño es determinado por el "método práctico" de que el volumen no debe ser inferior a tres veces el volumen de la perforación excavada. Un pozo de 750 mm excavado a 60 m requeriría una laguna de 12 m de largo, 8 m de ancho y 1 m de profundidad; sus desechos requerirían un área adicional. Este no es sino uno de los varios factores que se tiene que considerar cuando se selecciona el sistema de perforación y sobre esto se discutirá en la próxima sección.

A menudo se divide la laguna o se le "desvía" para favorecer el asentamiento del material cortado o ditritus en un área bastante distante del canal que hace regresar el agua limpia a la perforación.

Rara vez se usa el lodo debido a que una de las ventajas de la perforación con circulación invertida es que se impone agua relativamente limpia sobre el acuífero y, por lo tanto, no hay invasión de la formación. En Europa, para pozos de abastecimiento de agua de gran capacidad, la perforación rotatoria con circulación invertida virtualmente ha reemplazado a todos los otros métodos.

En el caso que se perfore arcilla en la sección superior del hoyo, se debe limpiar y volver a llenar la laguna con agua fresca antes de ingresar en el acuífero.

La principal ventaja de este método es el ritmo muy rápido de perforación en diámetros grandes, especialmente en arenas y gravas no consolidadas. Algunas veces se perfora y se reviste los pozos en 24 horas ya que no se necesita la limpieza (el desarrollo es una fase diferente). En realidad, la velocidad es esencial en estratos no consolidados ya que el operario sólo puede depender de una sobrecarga de 1 ó 2 m en la perforación. La perforación debe ser rápida con el fin de prevenir el derrumbe y la posible pérdida de las herramientas.

Es obvio que una carga de agua limpia impuesta sobre un estrato no consolidado incluye ciertas pérdidas de agua. En vista de esto, uno de los requisitos de la perforación de circulación invertida es la fácil y cercana disponibilidad de un abastecimiento sustancial de agua para propósitos de limpieza. A menudo se cita esto como de 45 m<sup>3</sup>/hora y en la práctica puede llegar a entre 9 y 70 m<sup>3</sup>/hora.

Mientras el sistema promedio de circulación invertida utiliza la succión como la energía de remoción tras el circuito, hay circunstancias, tales como fricción de la tubería en grandes profundidades, o una baja napa freática, en que la succión es insuficiente. Por esta razón, la mayoría de equipos de perforación tienen provisión para introducir un elevador de agua por aire en el sistema. Esto se logra incorporando tuberías de aire a lo largo de la tubería de perforación, ya sea concéntricamente o por pares en el exterior como un chorro mezclador arreglado para que descargue dentro de la tubería de perforación en un nivel adecuado.

Bajo condiciones ideales se ha registrado ritmos de penetración de 0.6 m/mín y ritmos promedio de 12 m/hora son bastante comunes. Se debe remarcar que las conexiones de la tubería de perforación con bridas y atornillado usadas más comúnmente requieren un manipuleo que ocupa tiempo y parece haber aquí cabida para las mejoras técnicas.

Las velocidades de rotación se encuentran dentro de la escala de 8-50 rpm y las profundidades promedio de perforación en 120 m; ocasionalmente se obtienen 300 m.

## MÉTODOS VARIOS DE PERFORACION

### Excavación con tubos hidráulicos

En lugares donde existe un requerimiento de pozos relativamente poco profundos con diámetros grandes en formaciones sueltas de grava, arena, cantos rodados o formaciones similares de suelo, se puede considerar la aplicación de un dispositivo excavador mediante tubos hidráulicos en conjunción con un equipo o grúa.

En este método se hunde manualmente un tubo-guía corto en el suelo y dentro de él se hace descender la primera de una columna de tubos permanentes. El extremo inferior de la columna es dentado y los tubos son fresados, perforados o ranurados según se requiera.

Se coloca una araña hidráulicamente engrapada en el tubo, apoyada en dos cilindros verticales, a una distancia corta sobre el nivel del suelo. Se adhiere dos arietes hidráulicos horizontales en dos "orejas" diamétricamente opuestas en la araña y se les usa para impartir una torsión oscilante muy suave pero poderosa a la columna del tubo. Al mismo tiempo, los dos cilindros verticales controlan la alimentación descendente y aplican presión si se requiere.

Bajo esta fuerza los tubos se dirigen hacia abajo y el lodo se acumula dentro de ellos; éste es retirado mediante un gancho hasta que la parte superior del primer tubo se encuentre cerca al tablero de la araña. Entonces se coloca el tubo siguiente sobre él y se suelda la unión. El principio esencial subyacente en este sistema es el mantenimiento de una "fluidez" de formación alrededor del área de contacto de los tubos y, por lo tanto, es bastante común soldar la siguiente unión de tubos sin interrumpir la oscilación.

Se puede hacer descender tubos de 450 mm - 1.2 m hasta 30 m o más bajo las condiciones correctas; la ventaja de este sistema es que no hay necesidad de tubos temporales (como en la perforación por percusión) ni de grandes lagunas (como en la perforación rotatoria). Tampoco hay contaminación del acuífero por fluidos de perforación.

### Perforación por taladro

La perforación por taladro de diámetro grande apareció hace unos 75 años. Se usaba los caballos para dar fuerzas a los perforadores de taladro. Los pozos más profundos registrados estuvieron entre 100-110 m. Se hacía descender los taladros hasta que se llegaba a una formación de socavado, después de lo cual se usaba una "zapata" de hierro o acero con mampostería en la parte superior, para hacer un espacio libre para añadir más mampostería a nivel del suelo.

Vale la pena considerar la perforación con taladro en casos en que se tiene que hacer un número de perforaciones a través de una sobrecarga de arcilla firme sobre un estrato más aceptable a las técnicas usuales. En tal caso, un taladro puede producir una perforación en 15 minutos, lo que le tomaría a un equipo normal de perforación hasta un día y medio.

Esencialmente, se hace rotar una cubeta de taladro en el suelo en el extremo de una larga barra cuadrada rotatoria y se le retira frecuentemente para vaciarla. Aparte de los casos excepcionales mencionados anteriormente, en el pasado se restringió las profundidades por la necesidad de tener una barra cuadrada rotatoria de longitud transportable, pero cuando se introdujo

las barras cuadradas rotatorias telescópicas, esto hizo posible perforaciones de 25-30 m. Otro refinamiento es el uso de varillas sólidas de perforación con un plano inclinado a lo largo de ellas. Estos taladros de "vuelo continuo" llevan los desechos a la superficie durante la rotación y no es necesario retirar la cubeta del taladro.

Se dispone de equipo que cubre diámetros desde 200 mm - 3 m. En sectores de los Estados Unidos se prefiere los tamaños más grandes en donde una combinación de suelo blando cohesivo y acuíferos débiles hace posible construir un pozo barato de tamaño considerable.

Aunque la perforación por taladro discutida en esta sección es mayormente del tipo impulsada por energía mecánica, se debe recordar que la perforación por taladro a poca profundidad y de diámetros inferiores a los 20 mm se ha realizado exitosamente usando únicamente la energía humana. Esto supone un suelo adecuado y un nivel freático elevado. Se ha construido cientos de pozos de este tipo.

### Perforación con balandra

Una balandra es una herramienta usada en la perforación con cable que combina el filo de corte de la cortadora con la capacidad de manipulación de un achicador. Consiste en un tubo pesado, de paredes gruesas en cuyo borde del fondo se encuentra un bisel endurecido; también puede llevar una barra transversal biselada.

Dentro del tubo, a unos centímetros del fondo, hay un par de puertas a bisagra que se abren en dirección hacia arriba. En la parte superior del tubo, la cual está abierta, hay una conexión giratoria para adherirse a la línea de perforación.

Cuando está en operación se hace ingresar la balandra en la perforación y se aplica la acción recíproca normal. Se agrega agua para la perforación si ésta no está presente. Los bordes cortantes desprenden el material y lo barren hacia el cuerpo de la balandra mediante la "acción de bombeo" establecida por la característica de no retorno de las puertas. Se selecciona un tamaño de herramienta que casi llene el diámetro de los tubos temporales en uso, ayudando así a "tragar" los pedrejones y aumentar el efecto de bombeo. Periódicamente se retira la balandra para vaciarla.

Se utiliza la balandra o gánguil en estratos sueltos y difíciles especialmente en donde hay grava gruesa y pedrejones y tienen la ventaja de extraer y elevar el material en vez de gastar el tiempo y energía triturando, como sucede con una barrena o trépano normal.

Un factor secundario es el efecto de choque del ariete hidráulico causado por las puertas de golpe rápido. Esto resulta en una vibración pulsante a través de la columna del tubo y hace que ésta descienda positivamente hacia el suelo no consolidado. Una desventaja es que el equipo de perforación y el cable deben estar en buena condición para resistir la fuerte carga creada por la perforación de la balandra.

### Circulación directa de aire

Las industrias minera y extractiva aplicaron el aire a la perforación para resolver los problemas de conducción del agua y condiciones derivadas de la congelación del suelo. Fue exitoso y, bajo condiciones favorables, mostró ventajas adicionales tales como vida más prolongada de la barrena, penetración más rápida, presentación rápida del material cortado en la superficie, etc. En la sección sobre fluidos de perforación se discutirá otras características.

El equipo de ingeniería es básicamente similar al equipo usado para la perforación con lodo pero en detalle se encuentra algunas diferencias, por ejemplo, en el diseño de la barrena de perforación; se modifica los pasajes para proveer aire a los soportes. El empaquetamiento rotatorio de agua debe ser capaz de rotar en condición seca. Obviamente también se debe disponer de una capacidad considerable de compresión. Algunos equipos de perforación de pozos petroleros usan gas en vez de aire comprimido como medio para cortar.

### Circulación invertida de aire

Uno de los problemas que se tiene que enfrentar cuando se perfora con aire, especialmente conforme aumenta el diámetro, es la necesidad de producir una velocidad creciente de aire no inferior a los 925 m/min (Figura 5).

Para obtener esta cifra, es decir, una perforación de 375 mm usando una tubería estándar de perforación de 112 mm, se requeriría aire en una escala de unos 100 m<sup>3</sup>/min, lo cual es irrealizable.

En un intento por superar el problema, se ha realizado ciertas perforaciones usando tuberías gemelas concéntricas de perforación. Se alimenta el aire a través del espacio anular entre las tuberías externas e internas y se le libera alrededor de la barrena especial. Un aro de refuerzo o faldón evita el escape indebido de aire hacia el anillo alrededor de las herramientas rotatorias de perforación y así obliga al aire a pasar a través de la barrena o trépano y arriba a través de sus pasajes, de donde viaja a velocidad elevada a través de la tubería interna de perforación hasta la superficie, llevando consigo el material cortado.

Una variación interesante ha sido la aplicación de esta disposición de tubos dobles al trabajo de extracción de núcleos de diámetro pequeño. Se bombea el agua por el anillo de la tubería de perforación, se le lleva a través de la corona del núcleo y se conduce hacia la tubería interna de perforación.

No hay ningún saca-núcleos como tal; en vez de éste, un dispositivo especial rompe-núcleos permite que el agua saliente impulse varillas cortas de núcleo hacia la superficie junto con las finas partículas de material cortado.

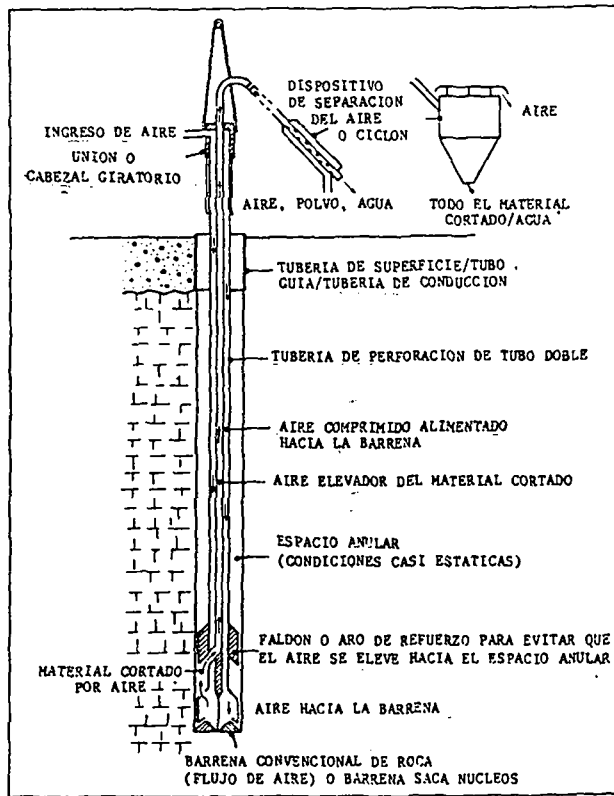


Figura 5  
Perforación por circulación invertida de aire

Este arreglo deja de lado la necesidad de retirar un saca-núcleo convencional para vaciarlo y permite que se realice la perforación en forma ininterrumpida. Aquí nuevamente, sólo se puede aplicar este método bajo condiciones favorables de perforación.

#### Perforación de martillo percutor (martillo neumático)

La introducción de la perforación por martillo marcó un paso significativo en el desarrollo de herramientas de perforación adecuadas para suelo duro. El método de perforación por martillo percutor (martillo neumático) es muy valioso para la perforación en rocas duras. La principal ventaja de este método es su velocidad. Generalmente le toma 1-2 días perforar hasta 100 m en granito o gneis. Más aún, el equipo de perforación es muy ligero, comparado con los equipos de herramienta de cable y de perforación rotatoria. No se requiere agua para el lavado con chorro, lo que hace que este método sea especialmente adecuado para áreas con escasez de agua.



Un martillo que actúa con aire y con un solo pistón, que funciona con el mismo principio del martillo perforador para carreteras, se coloca debajo de un juego de tuberías de perforación. Se anexa al martillo un juego de barrena de tungsteno-carburo (Figura 6).

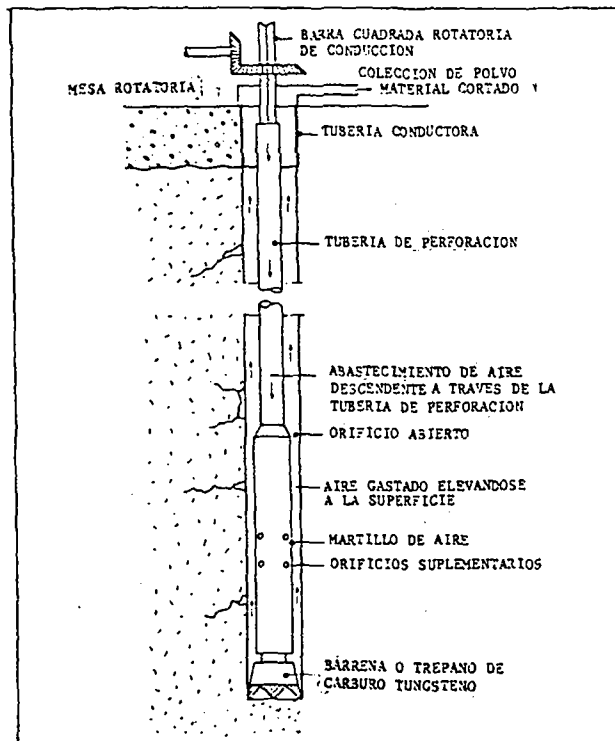


Figura 6  
Perforador de martillo percutor (martillo neumático)

Se hace girar todo el conjunto de 20-50 rpm y se le hace descender hacia la roca dura. La rotación sirve primeramente para cambiar la posición de la barrena en el fondo de la perforación y cualquier beneficio "de perforación" es de importancia secundaria.

El pistón, antes de que la herramienta toque el fondo de la perforación, está "regulado" en su cilindro y casi todo el aire es agotado a través de la barrena y, cuando corresponde, a través de otras partes adicionales del cuerpo de la herramienta. Esto es debido a que el yunque que lleva la barrena está en suspensión y libre de colgar extendido fuera del fondo de la herramienta en donde no puede ser golpeado por el pistón. Se incorpora esta característica para proveer facilidades extras de limpieza cuando se le acciona en la perforación o para expulsar las acumulaciones excesivas de material cortado.

Cuando la herramienta llega al fondo de la perforación, el conjunto suspendido barrena/yunque es empujado hacia arriba, hacia el cuerpo de la herramienta donde encuentra el pistón oscilante que ahora puede golpear con una frecuencia de entre 500 y 1,000 golpes por minuto. Al mismo tiempo, el aire, antes agotado, es dirigido para conducir el pistón y sólo se le libera a través de orificios en la barrena cuando se ha gastado la mayor parte de su energía. Ahora el aire gastado refresca la barrena, la vacía del material cortado y lo impulsa por el espacio anular hacia una caja de recolección en la superficie del suelo.

Los perforadores de martillo de 50-375 mm de diámetro ya son usados ampliamente y recientemente se ha desarrollado herramientas hasta de 750 mm. Elevar el polvo y el material cortado a la superficie es un problema técnico con grandes espacios anulares, pero se le puede superar en parte colocando un tubo colector abierto en la parte superior inmediatamente sobre la herramienta. Periódicamente se eleva y vacía el tubo colector. Alternativamente, se puede considerar un método de circulación invertida de aire y de anillo de "refuerzo".

El sistema de martillo percutor (martillo neumático) de penetración ha mejorado enormemente el ritmo de penetración en roca dura. En 1960, un modelo disponible en esa época era capaz de perforar 3 m en una hora en basalto muy duro, comparado con 1 m en 10 horas del método de herramienta de cable para un diámetro nominal de 150 mm.

Al igual que con todas las técnicas especializadas de perforación, existen desventajas y problemas. El martillo no operará en suelo no consolidado o arcillas y puede que el agua imposibilite el trabajo del martillo. Una filtración de agua causará que el material cortado se congele y se pegue a las paredes, aunque esto puede aliviarse inyectando detergente en el abastecimiento de aire. Sin embargo, un flujo pesado de agua, será expulsado como en el "bombeo elevador de agua por aire" hasta que se alcance una profundidad por debajo del agua en donde se gasta toda la energía del aire en el bombeo. Entonces se elevará el martillo.

Se introdujo herramientas que trabajan a presión elevada para superar, en parte, este último problema. La tubería de perforación de dos tubos y la circulación invertida de aire también pueden ayudar, pero muy pocas compañías de perforación de pozos de agua poseen este tipo de tubería.

### Fluidos de perforación

El primer fluido de perforación registrado fue el agua, que era dirigida a través de varillas huecas en equipos de perforación por percusión, en un intento por sacar el material cortado sin tener que retirar las herramientas - operación que lleva mucho tiempo.

Algunas veces se añadía arcilla para aumentar la viscosidad con el fin de ayudar a la elevación de los cascajos de roca y de grava.

Uno de los principios básicos de la perforación rotatoria es el uso de un fluido circulante y por unos 50 años, éste ha sido lodo basado en arcilla o bentonita.

### Arcilla o bentonita

El lodo de arcilla natural o bentonita es el fluido de perforación más común en uso actualmente para pozos de petróleo y de agua. Se enumera sus funciones de la siguiente manera:

1. Retira el material cortado de la cara de la barrena y lo transporta a la superficie.
2. Lubrica y refresca la barrena y la columna de herramientas.
3. Promueve la suspensión de material cortado en el pozo mientras se añaden más tuberías de perforación.
4. Permite el asentamiento de material cortado fino en el fondo de las pozas de lodo.
5. La formación de una "pared o costra de lodo" para consolidar la formación y para reducir la pérdida de fluido en la formación.
6. Controla las presiones subterráneas (flujo artesiano).
7. Provee cierta flotación a juegos largos de herramientas o entubados de retención en perforaciones profundas.

Observando la lista anterior con mayor detalle, la limpieza de la cara de la perforación es esencial para asegurar la máxima vida de la barrena y una óptima eficiencia de perforación. Habiendo hecho esto, el lodo debe elevarse a la superficie a una velocidad suficiente dependiendo de la capacidad y velocidad de bombeo, el tamaño del pozo y el tamaño de la tubería de perforación. Sin embargo, el material cortado no se elevará a esta velocidad debido a que tiende a hundirse bajo gravedad. La "velocidad de desprendimiento" no debe ser nunca mayor que la velocidad anular del lodo con el fin de asegurar el transporte del material cortado a la superficie. Si el pozo se ha derrumbado parcialmente en cualquier sección, tendrá mayor diámetro en ese punto y, así, la velocidad del lodo será correspondientemente menor, lo que ilustra uno de los muchos requerimientos de control cuidadoso del sistema.

Además de la velocidad, otros factores que influyen en la remoción del material cortado son la densidad de éste, su tamaño, la viscosidad del fluido y su densidad. La viscosidad determina el poder de elevación del lodo y depende de las propiedades y dispersión de los sólidos suspendidos en él, mientras la densidad afecta la capacidad de transporte del lodo a través de la flotación y esto se expresa en peso por volumen unitario de lodo.

Hay una estrecha relación entre los factores que determinan el comportamiento del lodo y se tiene que hacer consideraciones cuidadosas cuando se realiza cualquier cambio. Para superar el desprendimiento de material cortado, se puede aumentar la viscosidad, pero al hacerlo se puede elevar las presiones de bombeo a un nivel inaceptable. Un aumento en la densidad puede tener efectos benéficos en la parte inferior del pozo, pero cuando el lodo llega al pozo puede que no logre desprender los sólidos finos y la recirculación de estos causaría el desgaste excesivo de la planta de bombeo especialmente si es un material abrasivo.

El levantamiento de una pared tipo costra de barro es una función esencial del lodo de perforación. Cuando se perfora en una formación con un tamaño de poro que evita el ingreso de partículas de lodo, la porción de agua del fluido se filtra en la formación y deja detrás una "pared o costra filtrante" de sólidos de lodo. Esta "costra filtrante" permanece en la pared del pozo y controla la pérdida de más agua en la formación.

La carga hidrostática ejercida por la columna de lodo actúa sobre la pared de "costra de barro" y permite que la perforación continúe a través de arenas sueltas y gravas sin la necesidad de un revestimiento temporal. Si la pared de "costra de barro" es demasiado delgada, las herramientas rotatorias pueden romperla y entonces pueden ocurrir fuertes pérdidas de agua. Una "costra de barro" muy espesa haría difícil el retiro de la columna de perforación e incluso puede provocar el derrumbe de la perforación debido al efecto de escobilleo de la barrena.

Otra propiedad importante encontrada en arcillas naturales y comerciales es la de poder cuajarse. El material coagulado está dominado por el carácter tixotrópico del lodo. Cuando se encuentra activamente en circulación, el lodo tiene una fluidez dada que se reduce sustancialmente cuando no está en movimiento. Se utiliza esta característica con ventaja total cuando se interrumpe el flujo para añadir más tuberías de perforación y es vital para mantener los desechos en suspensión; si los sólidos caen en los "hombros" de los lastrabarreras y de la barrena de perforación. Se requerirá una considerable presión adicional de bombeo para alterar la tixotropía cuando se reinicie la circulación. Un lodo muy pesado puede incluso sobrecargar el sistema y evitar el asentamiento de partículas finas de lodo en el pozo.

Hay muchos aditivos comercialmente disponibles para el tratamiento y control del lodo de perforación. Varían desde cáscaras de nueces y cuero desmenuzados hasta compuestos químicos complejos. El manejo del lodo de perforación es una ciencia en sí mismo y las presiones elevadas, temperaturas y grandes profundidades asociadas con la perforación de pozos petroleros, han generado la tecnología para enfrentar esos aspectos. Por otro lado, se puede efectuar - y a menudo se realiza - la perforación de pozos de agua sin usar más control de lodo que el de la experiencia del operario sobre el equipo, usando como únicos instrumentos la vista y el "instinto".

## Polímeros orgánicos

En la sección anterior hemos visto que una propiedad esencial del lodo es la de formar una pared de "costra de barro" y estará claro que bajo ciertas circunstancias no sólo la fase de agua del lodo invadirá la formación, sino también el contenido de arcilla.

Puede ser extremadamente difícil, si no imposible, remover todo el lodo de la formación; de hecho, ese lodo frecuentemente permanece en el sitio entre la criba y la formación por muchos años, aún en un pozo bombeado regularmente y muchos pozos han sido considerados secos sólo porque su acuífero se ha "enlodado". Esto ocurre particularmente en lugares donde hay varios acuíferos débiles, en donde la suma de la producción total puede haber arrojado una cantidad útil. Las sustancias químicas especiales dispersantes no siempre son capaces de sacar las partículas de arcilla, aún cuando forman parte del programa de desarrollo del pozo.

Para superar este problema, se introduce los polímeros orgánicos. Usando el agua como un fluido base, se mezcla el polvo polimérico para formar un lodo de perforación que realiza las funciones básicas esenciales de la bentonita convencional, pero con una diferencia sustancial. Tiene una vida de aproximadamente tres días, después de los cuales se descompone en una consistencia parecida a la del agua y es extraído fácilmente de la formación. Además, sólo tiene una débil propiedad tixotrópica y libera a los sólidos con mayor prontitud.

Obviamente, se necesitará mucho más de tres días para perforar varios pozos y se usa compuestos tales como la formalina para prolongar la vida del lodo. Algunos lodos poliméricos pueden ser estabilizados indefinidamente. Para descomponer el lodo en un tiempo específico se puede usar un aditivo, tal como el cloro (en fuerte dosaje). No se debe confundir este tratamiento con el débil dosaje que se administra para combatir las bacterias del suelo.

Un problema antiguo experimentado era la deficiencia del lodo bajo condiciones de pH variables. Actualmente se reconoce que el mantenimiento de un pH elevado dentro de un límite bastante estrecho asegurará la estabilidad del lodo. La mayoría de los fabricantes proveen aditivos con sus propios nombres de fábrica para controlar el fluido de lodo de acuerdo a requerimientos específicos de perforación.

En este punto se debe remarcar que, aunque los ingenieros de agua en todo el mundo aceptan cada vez más el uso de lodos poliméricos orgánicos, se ha registrado casos de problemas bacteriológicos que pueden o no estar asociados con su uso. Teniendo esto en mente es que los fabricantes químicos están experimentando con polímeros inorgánicos, sintetizados por lodos de perforación de pozos de agua. Pronto se dispondrá de estos.

## Aire

Ya se ha discutido sobre el uso del aire como fluido de perforación en la sección anterior cuando se remarcó que en circunstancias adecuadas se obtuvo beneficios considerables. La roca dura firme es un estrato de perforación

ideal en el cual se aplica este método y se puede penetrar en zonas fisuradas sin el miedo de perder la circulación asociada con los lodos. Tampoco hay riesgo de sellar un acuífero y normalmente no se requiere agua de perforación.

Una desventaja es que el aire no puede soportar una formación ahuecada. También surgen problemas cuando se encuentra pequeños influjos de agua que tienden a aumentar el material cortado y algunas veces es necesario inyectar agua adicional en el abastecimiento de aire para producir una lechada manejable.

El rápido retorno del material cortado asegura el muestreo representativo e incluso algunas veces es posible evaluar el potencial de rendimiento de un acuífero mientras se está perforando, si se pone en operación el principal poder elevador del aire. Sin embargo, la eficiencia de la perforación disminuye con el aumento en la profundidad bajo el agua.

### Espuma

Se ha desarrollado un agente espumante para hacer frente a una situación en donde (a) no se puede hacer circular el lodo debido a pérdidas o a problemas en el abastecimiento de agua y (b) se dispone de insuficiente velocidad anular de aire para limpiar la perforación en forma adecuada. Bajo ciertas condiciones se puede perforar un pozo completo usando espuma. Otras circunstancias pueden requerir sólo una aplicación parcial.

La introducción de aditivos en la corriente de aire no es nueva y hace unos 20 años los operadores usaron el detergente para superar la adición de material cortado en una perforación "lilrosa".

Una década después se desarrolló la técnica de inyección de una lechada de espuma de bentonita, lo cual proporcionó una medida de apoyo a la formación pero aún dependía de una velocidad algo elevada y de la capacidad del compresor. Se descubrió que se podría elevar mayores cantidades de agua de formación, probablemente debido a que la lechada enlucía la pared y proveía un pozo más alisado.

Un reciente trabajo de desarrollo ha resultado en una espuma estable que requiere cantidades bastante moderadas de aire, siendo una "guía de inicio"  $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$  por 25 mm de diámetro de barrena. No se requiere ningún pozo de laguna de lodo, ya que el fluido es mezclado en un tanque e inyectado mediante una bomba en el sistema de abastecimiento de aire. Viaja por la tubería de perforación lubricándola y enfriándola. Entonces se produce la actividad de expansión y espumación y se desarrolla el apoyo suficiente para llevar el material cortado al espacio anular a una velocidad baja, es decir, 12-15 m/min, sólo para el aire. La espuma es similar, en consistencia, a la crema de afeitarse aerosol y a menudo aparece en la superficie con un impulso de surgimiento, característica que algunas personas creen ayuda en la limpieza del pozo.

La espuma se descompone en 30-45 minutos, liberando su material cortado en el proceso. Se le conduce lejos del brocal del pozo mediante un aro colector y una tubería horizontal.

Un fluido típico consiste en 100 l de agua por litro de espuma y 0.2-0.35 kg de estabilizador; se le inyecta a una velocidad de 5-7 l/min. Se puede hacer perforaciones de 150-650 mm de diámetro usando espuma y se dispone de un fluido especial para usarlo con martillos percutor (martillo neumático) cuando se tiene que hacer provisiones para una mejor lubricación.

Finalmente, aunque existen pautas para el uso de la espuma, éste es un sistema que aún se está mejorando a través de la experiencia. Por lo tanto, es tarea del ingeniero de perforación adaptar los arreglos para proporcionar resultados óptimos bajo condiciones prevalecientes.

## 3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Sedimentación

Para propósitos de diseño se puede subdividir un tanque de sedimentación en cuatro secciones, es decir, ingreso, zona de sedimentación, salida y zona de depósito de lodo.

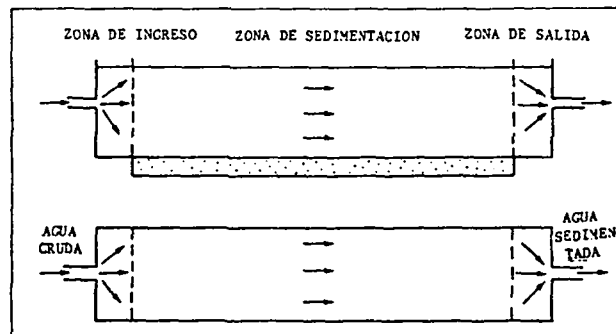


Figura 1

Subdivisión gráfica del tanque de sedimentación

El verdadero trabajo del tanque se realiza en la zona de sedimentación. La zona de ingreso sirve para distribuir el agua cruda en forma pareja sobre toda el área transversal del tanque. La zona de salida colecta el agua clarificada en forma uniforme sobre toda la profundidad y el ancho del tanque. La zona de lodo acomoda las partículas suspendidas retiradas del agua sedimentada.

El proceso de sedimentación puede ser discreto o floculante. Con el asentamiento discreto no se produce ningún agregado de materia suspendida finamente dividida en flóculos grandes. Esto quiere decir que durante todo el proceso de sedimentación, el tamaño, forma y densidad de las partículas permanecen invariables, proporcionando una velocidad constante de sedimentación. Con la sedimentación floculante, por otra parte, las partículas que se alcanzan unas a otras se juntan y en adelante descenderán al ritmo más elevado del agregado. Este proceso se repetirá varias veces, aumentando las velocidades de sedimentación conforme crecen las partículas.

Para el proceso discreto de asentamiento, se hace el siguiente análisis.

El recorrido seguido por una partícula discreta en la zona de sedimentación depende de dos velocidades: la velocidad de desplazamiento horizontal del agua y la velocidad de sedimentación de la partícula. Bajo condiciones ideales, la velocidad horizontal del agua y todas las partículas contenidas en ella, serán constantes:  $v = v_0$ . A través de un experimento se puede determinar la distribución de las velocidades de sedimentación.



Para este experimento, se usa un cilindro, preferiblemente hecho de plástico transparente. Por lo general, el diámetro del cilindro es aproximadamente 20 cm y la altura es de 2 metros\* (Figura 2). Usualmente la prueba de sedimentación toma aproximadamente un día y sólo requiere equipo simple.

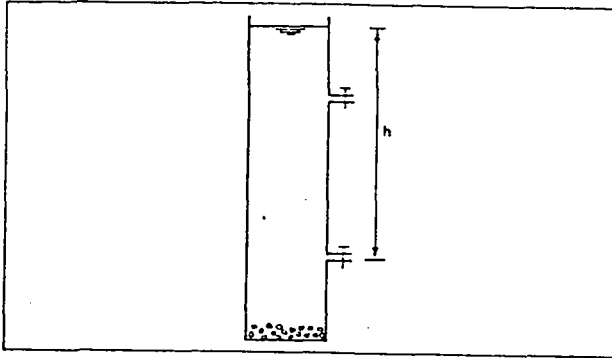


Figura 2  
Cilindro experimental para el análisis de la velocidad de sedimentación

Se llena el contenedor con una muestra de agua. Después de agitarlo suavemente para una distribución uniforme de las partículas en toda la profundidad, se inicia la prueba cuando el agua se ha estabilizado. En intervalos de tiempo regulares, se extrae muestras de agua de los grifos de muestreo. Se les analiza en cuanto a turbiedad, contenido de sólidos suspendidos o cualquier otro factor característico del proceso de sedimentación. Si las partículas se sedimentan discretamente y en una velocidad constante, entonces una muestra tomada en un tiempo  $t$  en una profundidad  $h$  bajo la superficie del agua no puede contener partículas con una velocidad de sedimentación superior a  $h/t$  (Figura 3).

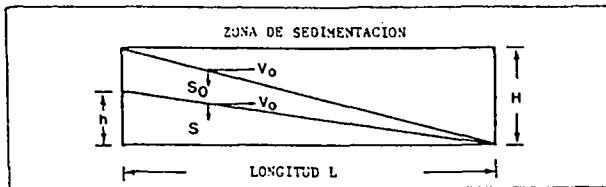


Figura 3  
Recorrido de las partículas en la zona de sedimentación

\* Se debe disponer de dos o más grifos para el muestreo del agua.

Por ejemplo, en este experimento de sedimentación, las medidas tomadas en muestras extraídas a una profundidad  $h = 1.25$  m, son:

tiempo	$t = 0$	$1/4$	$1/2$	$3/4$	$1$	$1.1/2$	$2$ horas
Contenido de sólidos suspendidos	$c = 86$	$83$	$63$	$49$	$37$	$16$	$6$ mg/l

De esto, se puede calcular la distribución de frecuencia acumulativa de las velocidades de sedimentación:

$100 c/c =$	$100$	$96$	$73$	$57$	$42$	$19$	$7$	$\%$
$s = h/t =$	$\infty$	$5$	$2.5$	$1.67$	$1.25$	$0.83$	$0.63$	m/hora

Cuando se grafican en un diagrama, estos datos producen una curva de distribución de frecuencia acumulativa de velocidades de sedimentación (Figura 4).

Para asegurar que se realizará el asentamiento discreto, también se debe tomar muestras a otra profundidad, por decir  $0.5$  m, y se les debe analizar en la misma forma. Cuando se grafican en el diagrama, los datos deben caer en la misma curva.

La velocidad de sedimentación  $s$  varía de una partícula a otra. Todas las partículas con una velocidad de sedimentación mayor que  $s$  son retiradas completamente, mientras que las partículas con una velocidad de sedimentación menor son retiradas parcialmente en la proporción de  $s/s_0$  que es la misma de  $h/H$ .

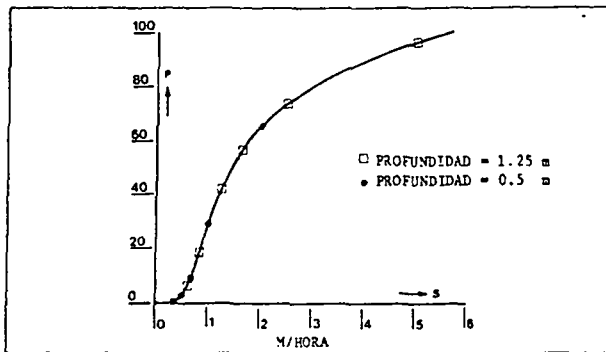


Figura 4  
Distribución de frecuencia acumulativa de velocidades de sedimentación

En la Figura 5 se ilustra un método gráfico para determinar la relación general de remoción usando la curva de la Figura 4.

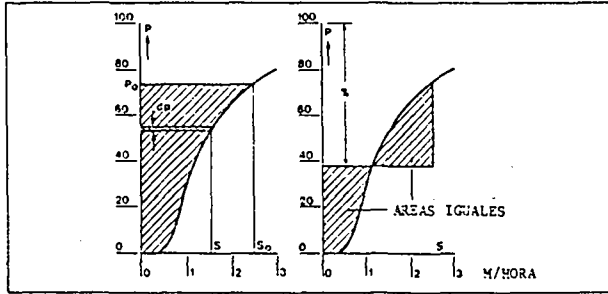


Figura 5  
Distribución de frecuencia acumulativa de velocidades de sedimentación

Para un valor de  $s_0$  la relación de remoción  $r$  es igual a

$$r = (1 - p_0) + \int_0^{s_0} \frac{s}{s_0} dp = (1 - p_0) + \frac{1}{s_0} \int_0^{s_0} s dp$$

En la fórmula de la mano derecha, el integral representa el área sombreada de la Figura 5 a la derecha, ahora se puede encontrar fácilmente la escala total de remoción en forma gráfica dibujando una línea horizontal en forma tal que los dos triángulos sombreados tengan áreas iguales. Al repetir este procedimiento para varios valores de  $s_0$ , se obtiene el gráfico de la Figura 6, en el cual para cualquier relación  $r$  de remoción deseada se puede leer el valor de  $s_0$ .

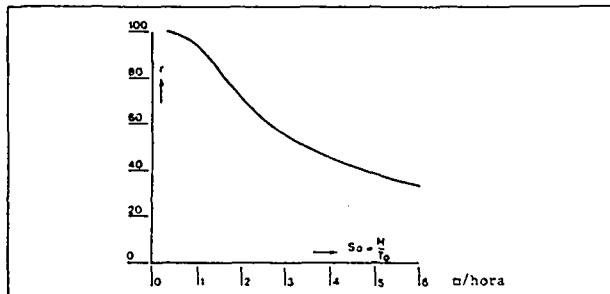


Figura 6  
Relación de remoción ( $r$ ) como función de la carga de superficie ( $s$ ) para partículas que tienen la distribución de frecuencia acumulativa de velocidades de sedimentación mostrada en la Figura 4

Anteriormente se mostró (Figura 3) que:

$$\frac{s_o}{v_o} = \frac{H}{L} \text{ o con } v_o = \frac{Q}{BH}, s_o = \frac{Q}{BL}$$

diciendo que la relación de remoción depende de la llamada carga de superficie, que es la relación entre la cantidad de agua a ser tratada y el área de superficie del tanque, mientras que la profundidad del tanque no tendría influencia.

Por lo tanto, el método de análisis presentado aquí, supone que el proceso de sedimentación no es estorbado por turbulencias en el flujo del agua a través del tanque de sedimentación, ni por remolinos o contracorrientes causados por el viento. Por lo general, la eficiencia de sedimentación es elevada en un tanque algo largo y estrecho que tenga la proporción de anchura a longitud de aproximadamente 4 a 6.

### Filtración lenta en arena

Los resultados de la filtración en términos de calidad de efluente y longitud de la jornada de filtro, están influenciados principalmente por cuatro factores de diseño: el grosor del lecho de filtro; la distribución de tamaños de grano del material de filtro; la tasa de filtración y la profundidad del agua sobrenadante.

En la filtración lenta en arena, esta interacción es bastante simple - por ejemplo, con un grosor del lecho de filtro mayor que 0.6 m - la mejora en la calidad del agua depende únicamente de la distribución del tamaño de grano del material de filtro.

El efecto de la distribución del tamaño de grano en la calidad del efluente, en particular sobre la presencia de coliformes y E. coli, puede determinarse con un plan piloto, operando filtros experimentales llenos con varios tipos de arena disponibles localmente, que tengan tamaños efectivos entre 0.15 y 0.35 mm. Estos filtros son fáciles de construir, por ejemplo, de una sección de tubería de concreto o de asbesto-cemento de 3 m de largo y que tenga un diámetro de 0.5-1 m. Esto se muestra en la Figura 7.

En base a la primera serie de experimentos, la arena a utilizarse será tan fina que se obtendrá un efluente de calidad aceptable. La segunda serie de experimentos usará pues este tamaño de arena. Se determina la longitud de la carrera de filtro para diferentes tasas de filtración. Para condiciones promedio, una barrera de filtro de 2 meses resulta apropiada, mientras que los valores mínimos en períodos de turbiedad elevada del agua cruda no deben ser menores a 2 semanas.

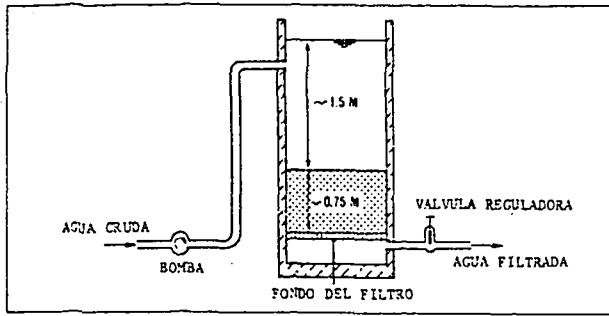


Figura 7  
Filtro experimental lento de arena

La longitud de la carrera de filtro también depende de la pérdida de carga máxima permisible, la que a su vez aumenta conforme sube la profundidad del agua sobrenadante. En particular, con la filtración lenta en arena se debe evitar las cargas negativas (presiones de agua por debajo de la presión atmosférica) bajo todas las circunstancias, ya que esto puede causar la liberación de gases disueltos.

Entonces las burbujas de aire se acumularán en el lecho de filtro aumentando la resistencia contra el movimiento descendente del agua, mientras que las burbujas de aire ascendentes de mayor tamaño harían huecos en el lecho de filtro a través de los cuales el agua pasará con un tratamiento insuficiente. De acuerdo a la Figura 8, esto limita la pérdida de carga máxima permisible a una profundidad de agua sobrenadante aumentada con la resistencia del lecho limpio de filtro.

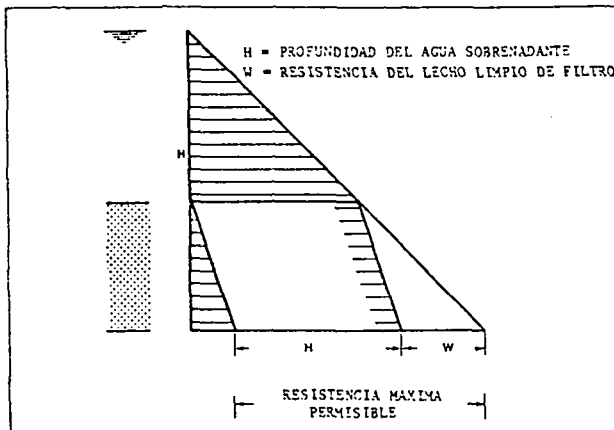


Figura 8  
Distribución de presión en un lecho de filtro lento de arena

## Filtración rápida

Para el diseño de una planta de filtración rápida, se tiene que seleccionar cuatro factores de diseño: el grosor del lecho de filtro, la distribución de tamaño del grano del material de filtro, la profundidad del agua sobrenadante y la tasa de filtración. Todos estos factores están interrelacionados, de tal forma que se influye tanto en el mejoramiento de la calidad del agua como en la longitud de la carrera de filtro. Sin embargo, la influencia en el costo de construcción es algo diferente. La distribución del tamaño de grano prácticamente no tiene influencia en los costos de construcción. Un menor tamaño de grano mejorará la calidad del efluente, pero también resultará en una colmatación más rápida del lecho de filtro, con una reducción de la longitud de la carrera del filtro. Para tamaños de granos menores a 0.8 mm, puede que se requiera un arrastre adicional de aire para mantener limpio el lecho de filtro. Un mayor grosor del lecho de filtro mejorará la calidad del efluente, pero la influencia en la resistencia del filtro y en el costo de construcción es pequeña. La profundidad del agua sobrenadante debe ser lo suficientemente grande para evitar cargas negativas. Una mayor profundidad del lecho permite una mayor pérdida de carga y una mayor carrera de filtro. La influencia en el costo de construcción es limitada. El factor más importante es la tasa de filtración. Una mayor tasa de filtración puede resultar en una menor calidad de efluente y en una reducción de la longitud de la carrera del filtro. Siempre reducirá grandemente el costo de construcción ya que el área requerida del lecho de filtro es menor para una tasa mayor de filtración.

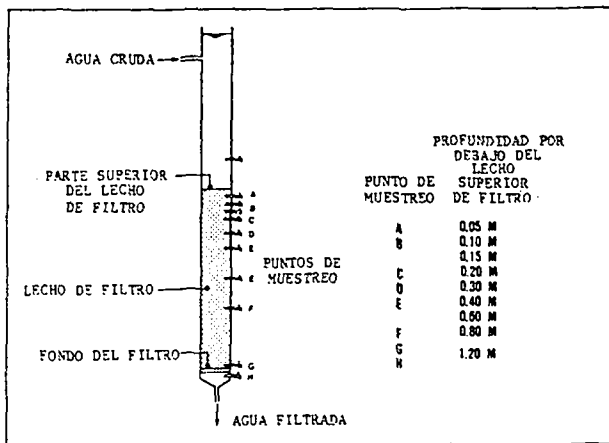


Figura 9  
Filtro experimental

El diseño de una planta de filtración rápida puede basarse en los resultados obtenidos en una planta piloto, usando un filtro experimental (Figura 9).

Primero se selecciona el tamaño de grano del material de filtro, después de lo cual se puede investigar la influencia de todos los otros factores - tasa de filtración, grosor del lecho de filtro y profundidad del agua sobrenadante. En el caso en que no se pueda encontrar ninguna combinación aceptable, se deben repetir los experimentos con otro tamaño de grano, más fino o más grueso, tal como se indica en los resultados obtenidos. Sin embargo, la confiabilidad de estos resultados disminuye por la absorción del agua en varios puntos de muestreo perturbando el flujo principal a través de la columna de filtro. Para las plantas pequeñas se puede compensar esto mediante una tasa de filtración menor o, tomando en cuenta la parte económica, mediante un ligero aumento en el grosor del lecho de filtro.

Sobre la base de los resultados preliminares, por ejemplo, se llenan tres filtros con arena de 0.8 mm de tamaño de grano a profundidades de 1.0, 1.2 y 1.5 m y operados a una tasa de 10 m/hora, dando los resultados presentados en la Figura 10.

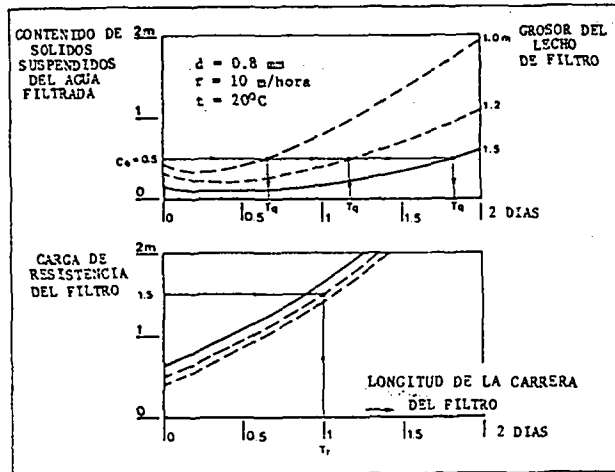


Figura 10  
Gráfico que representa resultados experimentales

Ahora, cuando se escoje la calidad deseada de efluente, por ejemplo, un contenido de materia suspendida del filtro que no exceda los 0.5 mg/l, se puede leer la longitud de la carrera de filtro  $T_s$  del gráfico superior dibujado en la Figura 10 como una función del grosor del lecho de filtro.

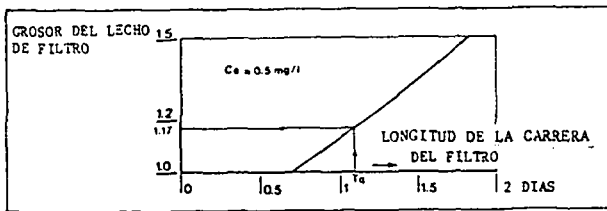


Figura 11

Gráfico que muestra la relación del grosor del lecho de filtro y la longitud de la carrera del filtro (basado en resultados experimentales presentados en la Figura 12)

Como segunda alternativa se debe fijar la longitud deseada de la carrera del filtro, por ejemplo, en 1.1/día, de lo cual en la Figura 11 se puede tomar el grosor requerido del lecho de filtro en 1.17 m, o redondeando, en 1.20.

Se escoge un factor adicional de seguridad, la longitud de la carrera del filtro  $T_r$  en relación a la resistencia del lecho de filtro, 10% menor a 1.0 día, para el cual ver el gráfico de abajo de la Figura 10, se encuentra la resistencia en 1.5 m. Como resistencia del lecho limpio, en que  $t = 0$ , este gráfico da un valor de 0.50 m, requiriendo una profundidad de agua sobrenadante de 1.0 m para prevenir con certeza las cargas negativas. Con los filtros rápidos, las impurezas sí ingresan a cierta distancia, en el lecho de filtro, dando una distribución de presión última permisible como nos indica la línea cortada de la Figura 12.

Esto permitirá un descenso en la profundidad del agua sobrenadante de aproximadamente 0.85 m. Sin embargo, el ahorro resultante en el costo de construcción es pequeño y se considerará como un factor adicional de seguridad, el valor original de 1.0. En realidad, muchos diseños usan una profundidad menor, por ejemplo de 0.4 m, para ahorrar en el costo de construcción.

Es posible pues que ocurran cargas negativas, y como la solubilidad de los gases es proporcional a la presión, ellos tienden a salirse de la solución, formando burbujas de gases que se acumulan en el lecho de filtro, aumentando la resistencia contra el movimiento descendente del agua y terminando prematuramente las carreras del filtro. Sin embargo, esto no ocurrirá cuando el agua cruda contenga grandes cantidades de materia orgánica o amoníaco. Durante la filtración, el contenido de oxígeno del agua descenderá grandemente, reduciendo la presión de gas a valores de 0.8 a 0.9 en la atmósfera.



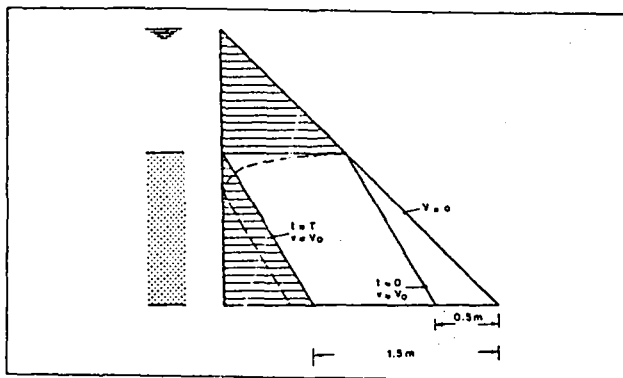


Figura 12  
Distribución de presión en el lecho o filtro rápido

Quando se han obtenido los resultados experimentales de la Figura 10, con una calidad promedio del agua cruda, la longitud de la carrera del filtro será mayor que cuando era menor la turbiedad del agua cruda. Esto no dificultará la operación, pero a fin de evitar una mayor penetración de impurezas en el lecho de filtro, se deberán limpiar los filtros por retrolavado por lo menos cada 3 días. Si el agua cruda tiene una carga suspendida mayor que la promedio, las carreras del filtro serán menores.

Nombre químico y fórmula	Nombre común	Uso	Formas disponibles	Fuerza Comercial	Contenedores de embarque	Apariencia y propiedades	Materiales adecuados de manipuleo	Solución usual o fuerza de suspensión	Dosaje	Observaciones
Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ 14420	Aluminio Filtro de aluminio, Sulfato de Alumina	Coagulante	Bloques, varillas, terrones, gránulos, polvo	15-17% $Al_2O_3$	Bolsas, barriles, bultos	Gris claro a marrón claro, Cristalino ácido, corrosivo ligeramente higroscópico	Seco: hierro, acero Solución: tanques de ladrillo a prueba de ácido. Tanques de concreto revestidos de caucho o de plomo	8-10%	Húmedo o seco	pH de 1% solución: 3.4
Sulfato de Aluminio Aluminio líquido $Al_2(SO_4)_3$	Aluminio líquido	Coagulante	Gravedad específica de solución 1.1	8% $Al_2O_3$	Tanques de acero o hierro revestidos con caucho	Solución pastosa, ácida, corrosiva	Tanques de ladrillo a prueba de ácido, tanques de concreto revestidos con caucho o plomo	Directa o en solución de 1%	Caja de origen, bombas de rotámetro y proporcionales	Costo inferior al del aluminio seco si se encuentra lo suficientemente cerca de la fuente de fabricación
Bentonita (Compuestos de aluminio, hierro, arcilla de silicato de magnesio)	Arcilla coloidal	Ayuda del coagulante, Agente espesador de flóculos	Polvo, tamaños variados	-	Bolsas	Arcilla amarillomarrón	Hierro o acero	Solución coloidal	Húmedo (suspensión)	-
Polvo blanqueador					VEASE CAL CLORADA					
Hidróxido de Calcio $Ca(OH)_2$	Cal hidratada, cal apagada o muerta	Regulación y ablandamiento según pH	Polvo	80-95% $Ca(OH)_2$ 60-70% CaO	Bolsas, barriles o bultos	Polvo blanco caústico	Hierro, acero o concreto	Saturado o suspensión al 1-5%	Seco (necesaria una agitación en embudo) o húmedo se puede alimentar en suspensión	No muy soluble No se debe usar tanques de plomo
Hipoclorito de Calcio $Ca(OCl)_2$ .41120	HTH, Percloro, Pitchloro Hipoclorito de alto	Control de sabor y olor de desinfectante	Gránulos, polvo, tabletas	60-70% cloro disponible $Cl_2$	Latas, bidones	Gránulos blancos. Olor a cloro	Vidrio, caucho, plástico, cerámica pétreo, madera	1-3% solución disponible de cloro	Húmedo	Sustancia química peligrosa, almacenar en seco en área bien ventilada

CaO	Cal cocida, cal química, cal viva	Regulación y ablandamiento de pH	Terrones, cantos redondos,	75-99%	Bolsas, barriles, bultos	Blanco a gris claro, caústico	Hierro, acero o concreto	Solución al 1-5%	Seco: permite que la cal se apague antes de su aplicación Húmedo: se puede alimentar en suspensión	No se debe usar pH de solución saturada: 12.4
Carbón, Activado C	Carbón activado Agua Nuchar Hidroarco Norito	Control de sabor y olor Declaración	Gránulos o polvo	No menos del 80% C	Bolsas o bultos	Gránulos negros o polvo insoluble	Hierro, acero o plástico	Seco: en lechos húmedo: como suspensión lechosa	Seco: a goteo	-
Cal Clorada CaO.2CaOCl <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	Polvo blanqueador Cloro de cal	Desinfección	Polvo	25-37% cloro disponible Cl <sub>2</sub> (cuando está fresco)	Bidones	Blanco, irregular higroscópico, inestable, picante	Plástico, cerámica pétrea, tanques de caucho	1-2%	Húmedo	Se deteriora en almacenamiento, perdiendo fuerza. Almacenar en seco en área bien ventilada
Cloro Cl <sub>2</sub>	Gas de cloro Cloro líquido	Desinfección Control de olor y sabor oxidante general	Gas líquido bajo presión	99-99,8% Cl <sub>2</sub>	Cilindros y tanques (bajo presión)	Gas picante, verde-amarillo, corrosivo, más pesado que el aire, peligro de manipular y almacenar	Seco: hierro negro, cobre, acero, Gas húmedo: vidrio, caucho duro, plata	-	Húmedo: usando dispositivos cloradores	Sustancias químicas peligrosas, se requiere manipuleo muy cuidadoso. Se requiere máscaras de gas y otras medidas de seguridad.
Sulfato de Cobre CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	Vitriolo azul, Sulfato de Cobre	Algicida Moluscida	Cristales, terrones, polvo	90-99% CuSO <sub>4</sub> 5aq	Bolsas, barriles, bidones	Cristales y polvo azul claro	Acero inoxidable, plásticos	1-2% solución	Seco: poner en bolsas de lino y transportar en barco	-
Cloro férrico										
a) FeCl <sub>3</sub> solución	Ferricloro, cloro o hierro	Coagulante	Solución	35-45% FeCl <sub>3</sub> 12-17% Fe	Carrafoles, tanques	Solución tipo melaza, marrón oscura, muy corrosiva	Vidrio, cerámica pétrea, caucho y resinas sintéticas	3-5% solución	Húmedo, dosaje proporcional o en gotero	pH óptimo 4-11
b) FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	Cloro férrico cristalino	Coagulante	Terrones, varillas, cristal	59-60% FeCl <sub>3</sub> 20-21% Fe	Barriles	Marrón-amarillo. Terrones muy higroscópicos, muy corrosivo	Tanque revestido con caucho, contenedores de cerámica pétrea o dura, plástico	3-5% solución	Húmedo dosaje proporcional o por goteo	pH óptimo 4-11 Almacenar en contenedores herméticos
c) FeCl <sub>3</sub>	Cloro férrico anhidrico	Coagulante	Cristales de polvo	98% FeCl <sub>3</sub> 34% Fe	Toneles, barrilitos	Polvo, verde-negro	Igual que el anterior	3-5% solución	Igual que el anterior	Almacenar en contenedores herméticos

Sulfato Férrico $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	Sulfato de hierro, Ferrifloc, Ferrisul	Coagulante	Gránulos, cristales, terrones	90-94% $Fe_2(SO_4)_3$ 26% Fe	Bolsas, bidones	Polvo rojo-marrón, cristales o gránulos. Higroscópico Solución muy corrosiva	Seco: hierro, acero y concreto. Húmedo: plomo, acero inoxidable o plástico	3-6% solución	Húmedo: igual que el anterior	Manchas
Sulfato Ferroso $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Vitriolo verde, vitriolo, azúcar,	Coagulante	Terrones, gránulos	45-55% $FeSO_4$	Bolsas, barriles, bultos, (plástico)	Cristales verde-amarillo-marrón; tortas y terrones higroscópicos en almacenamiento sobre 20°C	Ceniza, asfalto, concreto, lata y madera	4-8% solución	Húmedo: igual que el anterior	pH óptimo 8.5-10 Se puede requerir la adición de cal.
(Cuando está clorado, se le conoce como vitriolo verde clorado)										
Cal					VEASE HIDROXIDO DE CALCIO					
Silicón, activado $SiO_2$	Silica sol Silica activada	Ayuda como coagulante	Producida en el sitio, según la necesidad del silicato de sodio	25-30% $SiO_2$ 8-15% $Na_2O$	Barriles, o bultos	Cloro a menudo líquido tipo melaza opalescente fuertemente alcalino	Acero dulce o acero inoxidable o caucho	Sólo húmedo Se produce pastones mediante dilución y acidificación y luego se le añeja antes de la adición	0.6%	Artefactos expuestos al atoro, a menos que se regule adecuadamente el pH
Ceniza de Soda					VEASE CARBONATO DE SODIO					
Aluminato de Sodio $Na_2Al_2O_4$	Aluminio de sodio	Coagulante	Escamas (o solución) cristalina	43-55% $Al_2O_3$	Bolsas barriles o solución	Cristales blancos o grises Líquido cáustico y corrosivo Higroscópico	Hierro, plástico, caucho, acero o concreto	5% solución	Seco, con agitación de embudo. Húmedo	-
Carbonato de Sodio $Na_2CO_3$	Ceniza de soda	Regulación de pH. Ablandamiento	Polvo o cristales	98-99% $Na_2CO_3$	Bolsas, barriles o bultos	Polvo blanco cáustico	Hierro, acero o caucho	1-10% solución	Seco: con agitación de embudo Húmedo	Genera calor pH de 1% solución 11.2
Hexametáfosfato de Sodio $(NaPO_3)_6$	Hexametáfosfato de sodio vidrioso	Escala de ablandamiento y prevención de corrosión	Polvo o escamas	60-63% $P_2O_3$	Bolsas	Escamas opacas como vidrio roto	Acero inoxidable plástico, caucho duro, fibra de vidrio	0.25% solución	Húmedo, sólo usando gotero o dispositivos de proporción	Detiene la precipitación Proteje el acero suave

Hidróxido de Sodio NaOH	Soda cáustica lejía	Regulación del pH ablandamiento y limpieza del filtro	Bolitas, escamas, terrones (o solución)	96-99% NaOH	Bidones, bultos	Blanco, alcalino muy corrosivo, higroscópico y peligroso al tacto	Hierro fundido, acero suave, revestido con caucho	1-10% solución	Húmedo: proporcionando bombas caja de orificios	Se necesita ropa de protección cuando se hace las soluciones. Se genera mucho calor. pH de 1% solución 12.9
Hipocloro de Sodio NaOCl	Solución hipoclorito Solución blanqueadora Eau de Javalle	Desinfección	Solución	10-15% disponible Cl <sub>2</sub> (cuando está fresco)	Carrañones, buques, cisterna	Líquido amarillo pálido. Expele gas de cloro. Corrosivo & alcalino	Cerámica, vidrio, caucho de plástico	1-3% disponible Cl <sub>2</sub>	Húmedo: alimentación por goteo o directa	Manipular con cuidado
Sulfito de Sodio Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	-	Desoxigenación Decloración	Polvo, terrones	90-99% Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Bolsas, bidones	Polvo blanco	Acero inoxidable, plásticos	1% solución	Húmedo: bombas proporcionales	8 mg/l Se usa el Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> para remover 1 mg/l O <sub>2</sub>
Trisulfato de Sodio Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	Hipo	Decloración	Polvo, cristales	95-99% Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bolsas	Cristales blancos, o gránulos. Muy soluble	Hierro fundido, acero bajo en carbón, cerámica pétreo	1% solución	Húmedo: alimentación por goteo	-
Dióxido de Sulfuro SO <sub>2</sub>	-	Decloración o limpieza del filtro	Gas	100% SO <sub>2</sub>	Cilindros de acero para gas	Gas ácido, incoloro, picante, chocante	Acero	Seco	Seco	-
Acido Sulfúrico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Vitriolo	Regulación del pH Reducción de la alcalinidad	Líquido	77% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ó 98% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Vidrio, garrañones	Líquido tipo melaza, incoloro. Extremadamente riesgoso, corrosivo, ácido higroscópico	Plomo, vidrio Tanques revestidos con acero	1-2% solución Siempre se agrega ácido a un gran volumen de agua agitada	Húmedo Solución diluida, goteo en caja de orificios o rotámetro	Peligro: cuando se mezcla, añadir ácido al agua. Puede desarrollarse una gran cantidad de calor y puede ocurrir salpicaduras

## 5. FACTORES DE CONVERSION DE MEDIDAS

LONGITUD

1 PULGADA (in)	= 25.4 MILIMETROS (mm)
1 MILIMETRO (mm)	= 0.0394 PULGADA (in)
1 PIE (ft)	= 0.3048 METRO (m)
1 METRO (m)	= 3.2808 PIES (ft)
1 YARDA (yd)	= 0.9144 METROS (m)
1 MILLA (ml)	= 1.6093 KILOMETRO (km)
1 KILOMETRO (km)	= 0.6214 MILLAS (ml)

AREA

1 PULGADA CUADRADA (in <sup>2</sup> )	= 6.4516 CENTIMETRO CUADRADO (cm <sup>2</sup> )
1 CENTIMETRO CUADRADO (cm <sup>2</sup> )	= 0.1550 PULGADA CUADRADA (in <sup>2</sup> )
1 PIE CUADRADO (ft <sup>2</sup> )	= 0.0929 METRO CUADRADO (m <sup>2</sup> )
1 METRO CUADRADO (m <sup>2</sup> )	= 10.7639 PIE CUADRADO (ft <sup>2</sup> )
1 YARDA CUADRADA (yd <sup>2</sup> )	= 0.8361 METRO CUADRADO (m <sup>2</sup> )
1 MILLA CUADRADA (ml <sup>2</sup> )	= 2.59 KILOMETRO CUADRADO (km <sup>2</sup> )
1 KILOMETRO CUADRADO (km <sup>2</sup> )	= 0.3861 MILLA CUADRADA (ml <sup>2</sup> )
1 ACRE	= 0.4047 HECTAREAS (ha)
1 HECTAREA (ha)	= 2.4710 ACRES

VOLUMEN

1 PULGADA CUBICA (in <sup>3</sup> )	= 16.8871 CENTIMETROS CUBICOS (cm <sup>3</sup> )
1 CENTIMETRO CUBICO (cm <sup>3</sup> )	= 0.06102 PULGADAS CUBICA (in <sup>3</sup> )
1 PIE CUBICO (ft <sup>3</sup> )	= 28.317 LITROS (l)
1 YARDA CUBICA (yd <sup>3</sup> )	= 0.7646 METROS CUBICOS (m <sup>3</sup> )
1 PIE ACRE (acre ft)	= 1233.48 METROS CUBICOS (m <sup>3</sup> )
1 GALON INGLES* (UK gal)	= 4.5461 LITROS (l)
1 LITRO (l)	= 0.2200 GALONES INGLESSES (Imp gal)
1 GALON AMERICANO (US gal)	= 3.78533 LITROS (l)
1 LITRO (l)	= 0.264 GALONES AMERICANOS (US gal)

FLUJO

1 GALON INGLES POR MINUTO (Imp gal/min)	= 272.77 LITROS POR HORA (l/h)
1 LITRO POR SEGUNDO (l/s)	= 13.12 GALONES INGLESSES POR MINUTO (Imp gal/min)
1 GALON AMERICANO POR MINUTO (US gal/min)	= 227.12 LITROS POR HORA (l/h)
1 LITRO POR SEGUNDO (l/s)	= 15.85 GALONES AMERICANOS POR MINUTO (US gal/min)

MASA (PESO)

1 LIBRA (lb) = 0.4536 KILOGRAMOS (kg)  
1 KILOGRAMO (kg) = 2.2046 LIBRAS (lb)

FUERZA

1 LIBRA FUERZA (lbf) = 0.4536 KILOGRAMOS FUERZA (kgf)  
= 4.4482 NEWTON (N)  
1 KILOGRAMO FUERZA (kgf) = 2.2046 LIBRAS (lbf)

PRESION Y ESFUERZO

1 LIBRA POR PULGADA AL CUADRADO (psi)\*\* = 0.0703 KILOGRAMO (FUERZA) POR CENTIMETRO CUADRADO (kgf/cm<sup>2</sup>)  
1 KILOGRAMO (FUERZA) POR CENTIMETRO CUADRADO (kgf/cm<sup>2</sup>) = 14.233 LIBRAS POR PULGADA CUADRADA (lb/in<sup>2</sup>)  
1 LIBRA POR PIE CUADRADO (lb/ft<sup>2</sup>) = 4.8824 KILOGRAMOS (FUERZA) POR METRO CUADRADO (kgf/m<sup>2</sup>)  
1 ATMOSFERA (atm) = 1.03322 KILOGRAMO (FUERZA) POR CENTIMETRO CUADRADO (kgf/cm<sup>2</sup>)  
= 0.2048 LIBRA POR PIE CUADRADO (lb/ft<sup>2</sup>)

FUERZA

1 CABALLO DE FUERZA (HP) = 0.7457 KILOWATT (KW)  
1 KILOWATT (KW) = 1.3410 CABALLOS DE FUERZA (HP)  
1 PIE LIBRA POR SEGUNDO (ft lb/s) = 1.3558 WATTS (W)

TASAS DE TRATAMIENTO DE CARGA

1 GALON INGLES POR PIE CUADRADO POR HORA (Imp gal/ft<sup>2</sup>/h) = 1.1744 METROS CUBICOS POR METRO CUADRADO POR DIA (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d)  
1 METRO CUBICO POR METRO CUADRADO POR DIA (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d) = 0.8515 GALON INGLES POR PIE CUADRADO POR HORA (Imp gal/ft<sup>2</sup>/h)

\* TAMBIEN CONOCIDO COMO GALON IMPERIAL: (Imp gal)

\*\* TAMBIEN: lb/in<sup>2</sup>

## **ACTUALIZACION DE LA VERSION**





### 3. CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA

#### PRUEBA DE CALIDAD DEL AGUA

Las pruebas de detección rápida mediante cintas se han desarrollado recientemente y se pueden utilizar para realizar una determinación semicuantitativa de la calidad del agua, por ejemplo, de los sólidos disueltos.

La zona de reacción de la cinta, la cual es impregnada con reactivos sensibles, agentes amortiguadores y complejantes, y otras sustancias, se sella sobre una pequeña cinta de plástico. Las sustancias especiales de combinación utilizadas hacen que cada cinta sea altamente selectiva para un ión en particular.

La prueba se realiza sumergiendo la zona de prueba de una cinta en la muestra de agua y comparando los resultados con una escala de colores. Los colores individuales en la escala se gradúan claramente como para dar un buen indicio de la concentración. Con algo de experiencia, también es posible detectar y evaluar otras concentraciones, además de aquellas que se dan en la escala de colores, por interpolación.

En la mayoría de los casos, no es necesario tampoco el pretratamiento de la muestra de agua, ni posteriormente el tratamiento de la cinta de prueba.

Las instrucciones exactas sobre el uso de las cintas se dan en cada paquete por los fabricantes. Cuando se almacenan en condiciones frías y secas, las cintas de prueba permanecerán estables por lo menos dos años.

Las cintas son útiles especialmente para las pruebas de nitratos, nitritos, sulfato, hierro, amoníaco, cobre e hidrógeno.

También se encuentran en el mercado juegos de discos de prueba de colores, los cuales contienen discos pregraduados en unidades de concentración, los que se comparan con las muestras tratadas con cantidades fijas de sustancias químicas. Los juegos de comparación de colores más usados son aquellos que sirven para hacer pruebas de cloro, nitrato, amoníaco, pH, hierro, cromo, cianuro y fosfato.

Los juegos de discos de colores se pueden utilizar fácilmente en el campo y darán resultados más precisos que las cintas de prueba, pero resulta más costoso comprarlos y operarlos.

## 6. EXTRACCION DEL AGUA SUBTERRANEA

### EXPLORACION DEL AGUA SUBTERRANEA

Hay mucho más que decir sobre la exploración del agua subterránea que la simple ubicación de la misma. Para que la exploración del agua subterránea sea confiable, ésta debe combinar conocimiento con experiencia y sentido común. Esto no se puede conseguir con el mero movimiento de un palo ahorquillado, como pueden reclamar aquellos que practican la hechicería en el agua, rabdomancia en el agua o adivinación en el agua. Se utilizan herramientas hidrogeológicas simples basadas en la aplicación del sentido común, inteligencia y buen juicio, así como también técnicas sofisticadas.

El enfoque que debe utilizarse en la exploración del agua subterránea puede inducir cualquiera o todos los pasos siguientes:

- estudio de cualquier mapa geológico disponible y reportes
- estudio de mapas topográficos (por ejemplo, escala 1 : 25,000)
- estudio de cualquier pozo existente
- reconocimiento hidrogeológico
- investigaciones geofísicas
- perforación de pozos de prueba.

La exploración exitosa de agua subterránea requiere de un conocimiento básico de la manera en que se presenta el agua en los acuíferos (formaciones acuíferas). Sin este conocimiento, es imposible la exploración efectiva y eficiente y la perforación de pozos se convierte en un juego de ruleta.

Antes que todo, es necesario definir el área de estudio y recolectar información sobre la misma. Una razón frecuente de fallas en la investigación de agua subterránea es que el área de estudio que se escoge es muy pequeña y puede excluir la mejor o tal vez la única fuente de agua subterránea disponible. Posteriormente, si luego de una investigación preliminar el área de estudio parece ser demasiado grande, el estudio se puede reducir a una sección más pequeña.

Algunas veces una investigación minuciosa para obtener información constituirá un estudio previo que puede formar una base apropiada para la nueva investigación. Asumiendo que no exista ningún estudio anterior, uno de los métodos menos costosos para localizar acuíferos apropiados es desarrollar cortes geológicos transversales del área. Todos los registros de perforación y cualquier otra información geológica disponible se marcan en el mapa para este propósito. Los cortes transversales se pueden dibujar sobre esta base. La curva de nivel del suelo se lee a partir de un mapa topográfico para cada línea de los cortes transversales.

Un reconocimiento hidrogeológico del área de estudio también se debería realizar, preferentemente al final de la estación seca cuando los niveles de agua subterránea quizás sean los mínimos.

En algunos casos esto puede ser todo lo que necesita un hidrogeólogo con experiencia para evaluar los recursos del agua subterránea y no se necesitaría investigación posterior. Si faltan datos esenciales, se requerirá de algún trabajo de campo para conseguirlos.

Las mediciones geofísicas (por ejemplo, resistividad eléctrica, refracción sísmica, perfil y registro de pozo) son herramientas importantes en la exploración del agua subterránea. Con estos métodos es posible obtener información subterránea acerca del lugar propuesto para un pozo, de modo más efectivo y a menor costo que a través de la perforación de pozos de prueba. Sin embargo, las investigaciones hidrogeológicas convencionales continúan siendo importantes para una exploración del agua subterránea que sea efectiva en el costo. Estas investigaciones se deberían complementar, no reemplazar, por técnicas de exploración geofísica. Los métodos modernos de exploración pueden complementar eficazmente los datos de agua subterránea obtenidos por investigaciones convencionales. Por ejemplo, el control de descarga de un riachuelo puede identificar áreas donde los riachuelos reciben flujo afluente de acuíferos que podrían ser interceptados por pozos o donde los riachuelos pierden agua hacia las formaciones acuíferas de las cuales se puede extraer agua con el uso de pozos.

#### TECNICAS DE EXPLORACION GEOFISICA DE LA SUPERFICIE

La exploración geofísica abarca la medición de las propiedades físicas de la corteza terrestre. La experiencia y la investigación hoy en día han hecho posible la interpretación de informaciones geofísicas en términos de estructura geológica, tipo de formación, porosidad, contenido del agua y conductividad del agua. Las mediciones geofísicas rara vez confirman directamente la presencia de agua fresca en cantidades adecuadas para el suministro de agua potable. Lo que éstas producen son sólo datos parciales, los cuales guiarán a ubicaciones más apropiadas para la excavación o perforación de pozos cuando se interpretan correctamente junto con la información geológica.

De todas las técnicas geofísicas de superficie existentes, sólo unas cuantas tienen más de una aplicación limitada en la exploración de agua subterránea. Estas son: método de resistividad eléctrica, refracción sísmica, fotografía aérea e imágenes de satélites (el examen de imágenes tomadas de satélites); además en áreas específicas, métodos especiales geofísicos transmitidos por el aire.

#### Método de Resistividad Eléctrica

Las mediciones de resistividad se efectúan pasando corriente eléctrica a través del suelo entre dos electrodos y midiendo la caída del voltaje entre dos otros electrodos. Los electrodos se colocan en una línea recta, en puntos simétricos al punto central. La profundidad de penetración de la corriente se determina por el espaciamiento de los electrodos. Al aumentar el espaciamiento de los electrodos, se puede hacer que la corriente penetre más a fondo y de esta manera se puede llevar a cabo una investigación completa y profunda de la resistividad.

Dependiendo del propósito específico del estudio de resistividad se utilizan diferentes disposiciones de electrodos. En todas estas disposiciones, los electrodos se colocan en una línea recta. En la práctica, la disposición de espaciamiento de electrodos de Schlumberger es la más común.

La resistividad eléctrica de formaciones geológicas varía en un amplio rango, dependiendo del tipo de material, su densidad y la cantidad, distribución y conductividad del agua que contiene. La unidad de medida es ohm-metro.

La interpretación precisa de los resultados de un estudio de resistividad eléctrica requiere una gran experiencia y el trabajo de un especialista, pero no es difícil aprender cómo hacer las mediciones en el campo.

Las diferencias en la resistividad pueden indicar la ubicación de los estratos permeables porque los materiales con una permeabilidad baja tal como la arcilla, tienen resistividades bajas y las capas altamente permeables tales como arenas y gravas tienden a tener resistividades mucho más altas. Las mediciones de resistividad de la superficie no siempre eliminan completamente la necesidad de perforaciones de prueba, pero pueden ofrecer una gran reducción del número requerido de perforaciones por taladro. El método de resistividad eléctrica se utiliza particularmente en casos donde existen diferencias marcadas en la resistividad de formaciones en el suelo, por ejemplo, sedimentos aluviales que alternan con capas de arcilla o de arena.

Los registradores de resistividad pueden penetrar 300 m o más, en condiciones apropiadas. Sin embargo, cuando se deben investigar formaciones profundas, se requiere una gran fuente de energía para producir potenciales suficientes que se puedan medir con precisión.

La mayoría de pozos que se perforan o se excavan para fines de abastecimiento de agua no son profundos, es decir, tienen menos de 40-50 m. Los estudios de resistividad para este tipo de pozos se pueden llevar a cabo fácilmente con el equipo, utilizando sólo una pequeña cantidad de energía. La medición de la caída del voltaje será en milivoltios. De esta manera, el equipo de resistividad utilizado en las investigaciones de agua subterránea frecuentemente puede ser simple, compacto y portátil.

Una resistividad muy baja (menor de 10 ohm-metro) rara vez indica buenos acuíferos; el agua puede ser salina o la formación puede ser impermeable debido al alto contenido de arcilla. Una resistividad muy alta (mayor de 500 ohm-metro) indica formaciones secas o formaciones con baja porosidad. Los buenos acuíferos generalmente tienen valores de resistividad mayores de 150-200 ohm-metro, si el material de la formación es grueso y el agua fresca. Los sedimentos aluviales que forman un buen acuífero generalmente tienen una resistividad entre 30 y 100 ohm-metro.

El realizar las mediciones de resistividad, en una determinada área, utilizando una malla cuadrículada de puntos, hace posible la marcación de lecturas sobre un mapa cuadrículado. De esta manera, se pueden identificar patrones indicadores de alta y baja resistividad.

## Método de Refracción Sísmica

Las ondas sísmicas se inician en esta técnica golpeando la superficie de la tierra con un martillo o prendiendo una carga explosiva (por ejemplo, dinamita). Se mide el período que se requiere para que la onda resultante de la sacudida recorra las distancias conocidas. Un sismógrafo registra el tiempo transcurrido entre la carga y la llegada de la onda resultante en cada geófono (detector). Estas ondas pueden desplazarse directamente desde el punto de disparo, o recorren el sendero refractado en dirección al geófono. Mientras mayor sea el contraste en el tiempo de recorrido de las diferentes ondas de sacudida, se podrán identificar más claramente las formaciones y sus límites.

En la exploración sísmica se utiliza con mayor frecuencia la técnica de refracción para fines de abastecimiento de agua, donde generalmente sólo interesan las profundidades moderadas. El tiempo que se toma para que las ondas recorran hacia abajo en dirección a una superficie de contacto refractada, a lo largo de la superficie de contacto y nuevamente hacia arriba en dirección al geófono, es la base para computar la profundidad de la superficie de contacto y la composición de las formaciones geológicas que han pasado. El nivel de profundidad de estudios de refracción sísmica generalmente es de 100 m.

El tiempo de recorrido de una onda sísmica depende de las formaciones geológicas a través de las cuales pasa. Las velocidades de la onda son mínimas en sedimentos no saturados, no consolidados; en zonas saturadas, éstas aumentan marcadamente. Mientras más consolidado sea el material, mayor será la velocidad. Los valores más altos se registran en rocas ígneas sólidas.

Los explosivos sólo se pueden utilizar con restricciones y regulaciones legales. Se pueden emplear sismógrafos de bajo costo para la exploración sísmica en profundidades moderadas. En los alrededores tranquilos, se pueden iniciar las ondas de sacudida utilizando un martillo.

Dos formaciones adyacentes pueden tener la misma resistividad eléctrica, pero se pueden distinguir con el sismógrafo si tienen diferentes velocidades de refracción sísmica. Por otro lado, el sismógrafo no puede notar una capa de velocidad de refracción baja, por debajo de una capa de velocidad alta, pero en este caso se puede encontrar una diferencia en la resistividad eléctrica.

La mayoría de equipos sísmicos son equipos relativamente costosos de muchos canales. Últimamente, se ha puesto a disposición un equipo menos costoso, de un solo canal, que puede usarse en la exploración del agua subterránea en profundidades moderadas.

## Fotografía Aérea e Imágenes Transmitidas por Satélite

Las imágenes tomadas de aviones o satélites pueden proporcionar información útil acerca de los recursos del agua subterránea y sus condiciones.

Además de las fotografías convencionales en blanco y negro, y a color, durante los últimos años se ha extendido rápidamente la tecnología y aplicación de técnicas sensoras remotas tales como la fotografía infrarroja, la exploración multiespectral y la exploración infrarroja térmica.

Un hidrogeólogo entrenado en el análisis de imágenes de satélite puede interpretar las condiciones del agua subterránea a partir de las características y estructuras geológicas, tipos de vegetación, característica de la corriente de riachuelos y manantiales.

Las imágenes transmitidas por satélite tienen diversas ventajas sobre las de fotografía aérea, como una fuente de información hidrogeológica:

- La próxima proyección ortográfica debido a la altura del satélite permite una fácil conversión de la imagen en el formato del mapa.
- La vista sinóptica obtenida a través de las imágenes de satélite hace posible el estudio de cuencas hidrogeológicas enteras.
- Las imágenes del satélite son más uniformes que las de la fotografía aérea en el aspecto de características de la misma naturaleza, en diferentes partes del área de estudio. Esto agiliza la interpretación.
- La escala de los mapas de interpretación preparados a partir de datos por satélite (por ejemplo, 1 : 250,000 o más pequeños) han sido muy apropiados para planificación del recurso agua sobre una base regional.
- Las imágenes de satélites son particularmente útiles en el estudio de descargas de manantiales e infiltraciones en regiones áridas o semiáridas, donde el aspecto de abundante vegetación inusual en áreas con escasa vegetación indica la presencia de agua subterránea.

#### Métodos Geofísicos Transmitidos por el Aire

Los métodos que se transmiten por el aire, tales como las mediciones magnéticas, radiométricas y electromagnéticas, se utilizan para el levantamiento de planos e inventarios de áreas relativamente grandes. Estos métodos son rápidos, relativamente de bajo costo (por unidad de área cubierta), y particularmente útiles para la localización de yacimientos minerales, siendo de menos uso en la exploración de agua subterránea.

Los resultados de investigaciones geofísicas aéreas se registran cada vez más en cintas magnéticas y se procesan por computadora. Se presentan generalmente en forma de mapas.

## INVESTIGACIONES DE SUBSUPERFICIE

La perforación de pozos de prueba proporciona información sobre el espesor y composición de las formaciones geológicas. Las técnicas geofísicas de subsuperficie proveen información cuantitativa de la presencia y condiciones del agua subterránea. En la exploración del registro del perfil de los pozos se utilizan como trazadores, técnicas de registros de perfiles de radiación e isótopos radioactivos.

### Perforación de Pozos de Prueba

Ningún hidrogeólogo sensato prometerá agua en una cantidad y de una calidad dadas en el subsuelo de un dado lugar, basado solamente en la información geológica y en mediciones geofísicas hechas en la superficie. Una confirmación final de las interpretaciones del hidrogeólogo sólo se puede obtener por medio de una investigación en el suelo.

Los pozos de prueba generalmente son pozos excavados de diámetro pequeño y el tipo más común de perforaciones de reconocimiento de exploración. Estos pozos se pueden utilizar para pruebas con bombeo, acuíferos que han sido localizados por anteriores investigaciones en la superficie. Estos también sirven para obtener muestras de agua.

Sin embargo, a la perforación de prueba frecuentemente se le considera como un tipo de inversión "improductiva", y las agencias de gobierno con frecuencia se muestran reacias en la autorización de fondos para este propósito. Por consiguiente, es necesario que el equipo de perforación de prueba y sus accesorios sean en lo posible poco costosos, tanto en inversión de capital como en costos de operación. Sin embargo, al mismo tiempo, a fin de cumplir los otros requisitos de este tipo de perforación, un equipo de prueba deberá ser capaz de perforar a una gran velocidad, tener la habilidad de perforar pozos de diferente diámetro en toda clase de formación geológica, y en terrenos de buenas propiedades. También deberá estar equipado con los accesorios necesarios para llevar a cabo investigaciones subterráneas que abarquen mediciones geofísicas y otras técnicas. No es fácil cumplir con todos estos requisitos simultáneamente.

### Prueba de Bombeo

La prueba de bombeo es la investigación subterránea más importante y al mismo tiempo la menos complicada de realizar. La prueba de bombeo se deberá llevar a cabo durante un período suficientemente largo con una bomba suficientemente fuerte.

Si la capacidad de la bomba de prueba es pequeña y el reservorio de agua subterránea es grande, puede tomar largo tiempo antes de que el nivel del agua subterránea baje lo suficiente para permitir elaborar conclusiones correctas concernientes a la capacidad del acuífero. La prueba de bombeo



es difícil si el acuífero que debe ser examinado es muy permeable o tiene una fuente cercana de recarga. Aún con un índice de bombeo de 4,000-7,500 m<sup>3</sup>/día, posiblemente de un pozo de 6 pulgadas de diámetro, la bajada puede no ser adecuada para determinar el potencial del acuífero con precisión suficiente.

En vista de los altos costos en la perforación de pozos de prueba, con frecuencia es menos costoso realizar una prueba de bombeo en un pozo existente, si alguno se encuentra disponible. Esto generalmente requiere la remoción de la bomba existente y la instalación de una bomba temporal con una capacidad mayor. Sin embargo, el bombeo de un pozo viejo a una velocidad más alta de la normal puede ocasionar problemas como el colapso de su entubado y el desalojo de tierra alrededor de la rejilla del pozo, lo que puede conducir a que la arena entre al pozo.

### Registros de Perfiles Geofísicos

Los registros de los perfiles geofísicos proporcionan información sobre las propiedades y características físicas de las formaciones y la composición del agua en ésta. Se llama registro del perfil geofísico de un pozo cuando se hacen las mediciones geofísicas dentro de un pozo excavado.

El registro del perfil geofísico de un pozo y la interpretación de las medidas obtenidas, se han desarrollado principalmente en la prospección del petróleo. El registro del perfil de pozos se emplea en general en relación a métodos rápidos de perforación cuando las muestras son difíciles de extraer, por ejemplo, con una perforación rotativa. El registro del perfil de pozos utilizado en investigaciones de agua subterránea puede proporcionar información sobre la litología, estratigrafía y porosidad de las formaciones, así como la resistividad y la salinidad del agua que se encuentre. Esta información se utiliza para localizar los acuíferos, para la colocación de rejillas de pozos y para los niveles impermeables donde se deberán colocar las tuberías.

Existe una gran variedad de técnicas de registro del perfil de pozos, pero las más importantes en la exploración del agua subterránea son: la resistividad eléctrica, el potencial espontáneo y la radiación natural gama.

En un registro de perfil de resistividad eléctrica, la resistividad aparente de las formaciones subterráneas se señala en una gráfica al lado de la profundidad debajo de la superficie de la tierra. De manera similar, en un registro de perfil de potencial espontáneo, el potencial se señala al lado de la profundidad debajo de la superficie del suelo. Estas dos propiedades geofísicas proporcionan un indicio sobre el carácter de las formaciones subterráneas y la calidad de agua contenida en ellas.

Los registros de perfil de potencial espontáneo y con resistividad se producen con un solo instrumento, conocido comúnmente como registrador

de perfil eléctrico. El instrumento que mide la resistividad dentro del pozo esencialmente es el mismo que el que se utiliza para mediciones de resistividad de la superficie, excepto que sus registradores se encuentran colgados en el pozo.

Las lecturas se toman entre los registradores colocados a determinada distancia. Un aumento en la distancia entre los registradores aumenta la distancia vertical total para lo cual el instrumento lee la resistividad (promedio). Los valores de resistividad obtenidos dentro del pozo, tienden a ser más precisos que las resistividades medidas en la superficie. Como regla, las formaciones que contienen material eléctricamente activo, tales como arcilla y lutita, tendrán una resistividad baja. Arenas y gravas generalmente tienen una resistividad moderada. La resistividad es alta en el agua fresca y en las rocas densas.

Las diferencias en la conductividad eléctrica del agua en un pozo indican la superficie de contacto entre el agua estancada (vieja) y el agua de flujo constante (nueva). Si el contenido de sal del agua en el pozo difiere de aquél del agua subterránea de los alrededores, se creará un potencial eléctrico. Este potencial, llamado potencial espontáneo, variará a lo largo de las paredes del pozo excavado con puntos máximos en los lugares donde el agua fluye dentro de éste a través de las grietas.

Los registros de perfil de radioactividad natural (rayos gama) miden los cambios en la intensidad de radiación de ciertos elementos radioactivos que se encuentran naturalmente en las formaciones subterráneas. Los cambios en la intensidad de radiación comúnmente se asocian con las diferencias entre los tipos de materiales. Por ejemplo, en sedimentos no consolidados, el registro de perfil indica principalmente yacimientos de arcilla donde la intensidad de rayos gama es alta, y capas de arena donde la intensidad es baja. Los resultados obtenidos pueden proporcionar información adicional que se puede combinar con otros datos subterráneos disponibles.

#### Isótopos radioactivos como trazadores

Los isótopos radioactivos como trazadores de agua subterránea dan una idea directa del movimiento y distribución del agua subterránea dentro del acuífero. El agua subterránea en su estado natural contiene numerosos isótopos y las conclusiones se pueden sacar de los niveles variables en los que éstos se presentan.

Los isótopos comúnmente utilizados en investigaciones subterráneas son isótopos pesados estables de la molécula de agua, Deuterio y Oxígeno-18, y los isótopos radioactivos, Tritio y Carbono-14. Los isótopos pesados estables son indicadores excelentes del movimiento del agua subterránea, mientras que los isótopos radioactivos tienen un valor especial en la detección del tiempo de residencia.

Por naturaleza, la mayor parte del agua subterránea se recarga por infiltración directa de la precipitación pluvial, o por infiltración del agua

superficial. Las causas de los procesos de evaporación y de intercambio, el contenido de isótopos y su distribución en el tiempo y el espacio pueden cambiar durante la transición de la precipitación hasta el agua subterránea, y algunas veces en el agua subterránea misma.

Existe una red mundial establecida conjuntamente por la OMS y la Agencia Internacional de Energía Atómica, la cual muestra la precipitación sobre una base mensual. Las muestras se analizan para el Deuterio, Oxígeno-18 y Tritio.

Los datos de precipitación promedio que muestran la distribución de los isótopos estables puestos en correlación con la composición de los isótopos del agua subterránea, definen el origen y el movimiento de las aguas subterráneas. La corta vida-media del Tritio proporciona información valiosa en recargas recientes mientras que la larga media-vida del Carbono-14 da a conocer sobre el agua subterránea que fluye lentamente.

#### Muestreo de las Aguas

Las mediciones del potencial espontáneo y la conductividad eléctrica estrictamente hablando son mediciones de propiedades químicas. Los análisis de laboratorio llevados a cabo en muestras de agua recogidas proporcionarán información adicional sobre la naturaleza del agua y su flujo.

## 7. EXTRACCION DE AGUA SUBTERRANEA

### SELECCION DEL METODO DE CONSTRUCCION DE POZOS

Existen varias y diferentes técnicas de construcción de pozos y se deberá seleccionar cuidadosamente el método más apropiado para la construcción de pozos en un área en particular. Un factor importante es el tipo de formación geológica que se tendrá que penetrar. El Cuadro 1 proporciona una orientación general.

La perforación a chorro y la perforación a percusión son útiles particularmente para la perforación de pozos de prueba con fines de exploración. Apartar el entubado de retención del pozo a medida que progresa la perforación permite la toma de muestras de cada formación penetrada.

### COMPARACION DE LA PERFORACION A PERCUSION Y LA PERFORACION ROTATORIA

El costo capital de un equipo de perforación a percusión (herramienta de cable) es mucho menor que el de un equipo rotatorio para pozos excavados del mismo diámetro y de la misma profundidad. La ingeniería mecánica de un equipo de percusión es sencilla y firme, y resistente a la suciedad, corrosión y desgaste. Cuando hay necesidad de hacer reparaciones, normalmente los mecánicos con cierto entrenamiento pueden realizarlas, si es necesario en el campo. En contraste, la ingeniería y la transmisión de energía de un equipo rotatorio es por necesidad mucho más complicada. Cuando se necesita hacer una reparación - aún si esto incluye sólo la sustitución de un pequeño detalle, tal como un sello - se requieren las facilidades de un taller, así como también los repuestos determinados.

La principal desventaja de una perforación a percusión es que la velocidad del progreso es muy lento comparado con la perforación rotatoria, particularmente en rocas duras. Por otro lado, existen también tipos de formación, tales como arena y gravas gruesas, o roca fisurada, en donde la perforación rotatoria se encuentra con serios problemas debido a la pérdida de fluido de perforación circulante. Otro problema con la perforación rotatoria es que algunas veces los acuíferos se encuentran completamente sellados por el fluido de perforación.

Un pozo excavado verdaderamente vertical se obtiene más fácilmente con la perforación a percusión que con una perforación rotatoria. A menos que se utilicen técnicas especiales con la perforación rotatoria, el pozo excavado puede desviarse de la dirección vertical y vagar en varias direcciones. Un pozo excavado recto y vertical es esencial para la instalación correcta del equipo de bombeo abajo en el pozo excavado.

A medida que continúa la perforación, es necesario examinar por intervalos si los acuíferos están siendo suficientemente penetrados a fin de determinar si la perforación debe seguir adelante. En un equipo de percusión, un simple examen de achicamiento ayudará a dar respuesta a esta pregunta; con un equipo de perforación rotatorio, esta facilidad generalmente no se puede conseguir.

Cuadro 1  
Métodos de Construcción de Pozos

Tipo de pozo	Profund. Máx.	Diámetro (cm)	Formación Geológica	
			Apropiada	Ina apropiada
EXCAVADO MANUALMENTE	60	90-500	arcilla; limo; arena grava; arenisca blanda; piedra caliza blanda, fracturada	roca ígnea
PERFORADO A MANO	25	5-40	arcilla; limo; arena; creta; grava; arenisca blanda; caliza blanda, fracturada; formaciones aluviales	roca ígnea
CLAVADO	15-20	3-5	arcilla; limo; arena; grava fina, arenisca (en capas delgadas)	cualquier formación con cantos, grava cementada, caliza roca ígnea
PERFORADO A CHORRO	80-100	10-30	arcilla; limo; arena; gravilla	cualquier formación con cantos, grava cementada, arenisca, caliza, roca ígnea
PERFORADO A PERCUSION (herramienta de cable)	300	10-60	arcilla; limo; arena; grava; grava cementada; cantos (en yacimiento firme) arenisca; caliza; y roca ígnea	
PERFORADO ROTATORIO (con circulación de fluido de perforación)	250	10-60	arcilla; limo; arena (estable); grava; grava cementada; arenisca; caliza y roca ígnea	problema con cantos
PERFORADO ROTATORIO (con martillo roto-neumáticamente)	250	10-50	particularmente apropiado para: dolomita; basaltos;	arena suelta, grava, arcilla limo, arenisca

Resulta sencillo comprender los controles en un equipo de percusión. El entrenamiento del personal para aprender a operar el equipo no necesita ser largo, aún cuando éste incluya personal sin ninguna experiencia previa en la perforación de pozos.

En una perforación a percusión, sólo se utiliza una pequeña cantidad de agua durante las operaciones actuales de perforación. La perforación rotatoria, en comparación, requiere un gran abastecimiento de agua, lodo y aire comprimido. La circulación del fluido de perforación necesita una bomba grande o un compresor de aire con los problemas asociados al mantenimiento de éstos en régimen operativo.

Un equipo de percusión sólo necesita los tamaños exactos de una barrena de perforación para hacer hoyos de perforación hasta 600 mm de diámetro. Para perforaciones rotatorias, el diámetro del pozo excavado tiene un efecto considerable en los volúmenes de circulación requeridos, el fluido de perforación y la necesaria carga de la barrena.

Un equipo de percusión puede proporcionar un "bombeo de oleaje" para el desarrollo del pozo. Además, se puede utilizar para achicar el agua llena de barro que contiene materiales finos en la terminación del pozo antes de la instalación de la bomba.

Con un equipo de percusión, se puede colocar un émbolo de oleaje de acción simple a la profundidad deseada y operar con el mecanismo de perforación reciprocante (biela balancín) en el equipo. Este equipo posee la gran ventaja que no se necesita traer ningún equipo de bombeo por separado, como en el caso de perforadoras rotatorias.

El alto costo de operación y capital de equipos de perforación rotatoria obligan a moverlos a un nuevo lugar de perforación tan pronto como un pozo se haya concluido. Además, no hay facilidades para el levantamiento en el lugar después de que finaliza la perforación, y para operaciones finales tales como el manejo y la instalación de la unidad de bombeo, a menudo se necesita que se suministre una pequeña unidad suplementaria. Con un equipo de percusión, por lo general, es posible conservar el equipo en el lugar, de manera que las facilidades del levantamiento del equipo se pueden utilizar para operaciones finales.

#### ELECCION DEL DIAMETRO DEL POZO

Al aumentar el diámetro de un pozo, su producción no aumenta considerablemente. La fórmula básica para el rendimiento de un pozo, bajo condiciones libres (abiertas) de la napa de agua subterránea es:

$$Q = \frac{N \cdot p \cdot (H_2 - h^2)}{\log R/r}$$

en donde:

- Q = rendimiento del pozo
- p = permeabilidad del acuífero
- H = nivel estático del agua en el pozo
- h = nivel de bombeo o nivel dinámico del agua  
(nivel del agua en el pozo durante el bombeo)
- R = radio del cono de depresión
- r = diámetro del pozo
- N = constante numérica  
(depende de las unidades de medidas utilizadas)

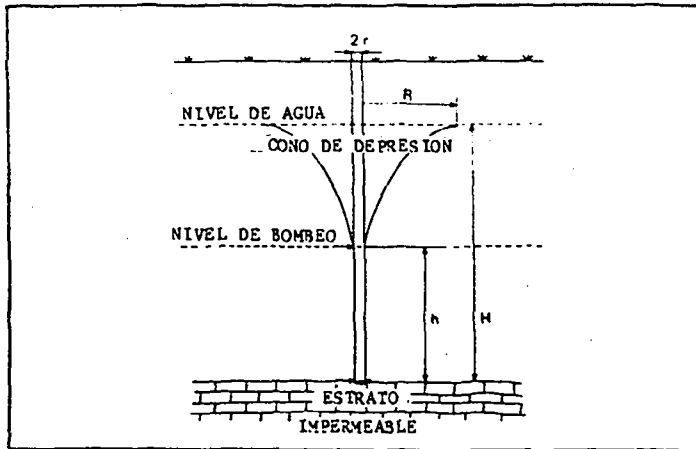


Figura 1  
Bombeo de agua de pozo

Con todos los factores, a excepción del diámetro del pozo, manteniéndose constantes, la fórmula se convierte en:

$$Q = \frac{K}{\log R/r}$$

Para su supuesto cono de depresión con un radio de 100 m ( $R = 100$  m), el rendimiento de un pozo de 20 cm de diámetro (8 pulgadas) se calcula que será sólo 10% más grande que el de un pozo con diámetro de 10 cm (4 pulgadas). Para ilustrar un extremo, el rendimiento de un pozo con un diámetro de 150 cm (60 pulgadas), con un cono de depresión que se extiende de 25 m alrededor de éste, sería sólo 60% más grande que el de un pozo con un diámetro de 15 cm (6 pulgadas), para la misma profundidad de penetración. Además, el pozo más grande con un diámetro 10 veces mayor, daría sólo 60% más de agua, pero requeriría hacer una excavación de un volumen de material 100 veces mayor que el de un pozo pequeño.

Por contraste, aumentar la penetración del acuífero (H) de 2 m a 3 m con un descenso constante del nivel de 0.5 m daría un rendimiento 2.3 veces mayor. Estos ejemplos simplificados, deberán ayudar a hacer notar que el aumentar la profundidad de un pozo es la manera más eficiente de aumentar el rendimiento del mismo.

Las consideraciones y ejemplos que se dan aquí se aplican a pozos en formaciones aluviales (con condiciones de nivel freático abierto), en las cuales hay una corriente homogénea de agua, de manera que la permeabilidad del acuífero se pueda representar por un solo valor. En rocas duras, en donde el agua fluye a través de hendiduras y fisuras, es imposible establecer un valor único y significativo para la permeabilidad. Sin embargo, también para estos tipos de formación, la experiencia muestra que aumentar el diámetro de un pozo generalmente no dará un aumento sustancial de su rendimiento.

Evidentemente, es importante ahorrar en costo y tiempo al seleccionar el diámetro más apropiado de un pozo. Además, como regla general, el diámetro de un pozo deberá ser el mínimo.

#### REJILLAS DE POZOS

Se encuentran disponibles rejillas de pozos de muchos diseños y materiales diferentes. Una rejilla de pozo posee aberturas o ranuras a través de las cuales fluye el agua del acuífero al pozo. El diseño apropiado de una rejilla de pozo y la manera que se deberá colocarla en el pozo excavado rigen en gran parte para la eficiencia hidráulica y la vida útil del pozo. El área total de las aberturas o ranuras se denomina el "área abierta". Se expresa como el porcentaje de la superficie de la rejilla del pozo. Las aberturas o ranuras de las rejillas de pozo se deberán clasificar debidamente según el tamaño, en relación con la distribución del tamaño de las partículas del acuífero.

Se deberán tener en cuenta los siguientes factores básicos en la selección de una rejilla de pozo:

- 1) fuerza estructural suficiente para resistir la presión de la formación del suelo alrededor de ésta;
- 2) área abierta adecuada para permitir que pase el flujo no impedido de agua del acuífero al pozo;
- 3) aberturas o ranuras medidas de tal manera que el pozo puede operar sin arena;
- 4) resistencia a la corrosión;
- 5) costo.

La mayoría de rejillas de pozos están colocadas en formaciones no consolidadas, pobremente cementadas o quebradas. En general, los acuíferos en mención constarán de arena, grava o mezclas de arena y grava.

Los materiales comúnmente más utilizados para las rejillas de pozos son: acero inoxidable, acero galvanizado, latón, bronce, cobre y plásticos duros.



## Diseño Hidráulico

Tanto el área total abierta de las aberturas o ranuras como su forma y configuración son importantes para la eficiencia hidráulica de una rejilla de pozo. El diseño hidráulico de la rejilla de pozo deberá ser aquél que tenga una mínima pérdida de carga a lo largo de la misma. Pero en vez de diseñar para un área máxima abierta, el tamaño de las aberturas se deberá determinar en relación a la permeabilidad de la formación y su distribución del tamaño de las partículas.

La permeabilidad hidráulica de una formación es más dependiente del tamaño y forma de los intersticios entre las partículas del suelo y el grado en el cual están interconectados que de la porosidad total de la formación. Esto se muestra muy bien particularmente en formaciones de limo, las cuales tienen una permeabilidad baja a pesar de tener una porosidad de 30% o más. En formaciones de arena fina, la permeabilidad es limitada ya que una capa de agua se adhiere alrededor de las partículas del suelo por adsorción y de esta manera limita los canales disponibles en los intersticios para el flujo libre del agua subterránea. Las velocidades excesivas del flujo en el acuífero, causadas por el fuerte bombeo de un pozo, pueden causar un atoramiento consecuente en el transporte de partículas más finas dentro de la zona de filtro y la malla de pozo. El flujo turbulento en la zona de filtro que rodea la malla del pozo producirá una pérdida de carga adicional, reduciendo la eficiencia hidráulica del pozo. De mayor importancia es que si es demasiado grande una caída de presión sobre la zona de filtro y la rejilla de pozo, esto causaría cambios sutiles en el equilibrio químico del agua, lo que generalmente aumenta el potencial para la incrustación y la corrosión.

Existen varios y diferentes tipos de rejillas:

- rejilla de tubería con ranuras
- rejilla de tubería de base cubierta por alambre
- rejilla cubierta por alambre con varillas
- rejilla de tela metálica
- rejilla troquelada
- rejilla tipo persiana
- rejilla con ranuras "V" continuas
- rejilla revestida con grava

La proporción de área abierta de las rejillas de pozo varía considerablemente, por ejemplo:

- |  |        |
|--|--------|
| - tipo de tubería con ranuras            | 1-5%   |
| - tipo persiana y troquelada             | 3-15%  |
| - tipo cubierta por alambre con varillas | 12-30% |

La variación que se indica para cada tipo de malla de filtro se relaciona con el tamaño de la abertura o ranura. Las mallas con ranuras muy finas (es decir, 0.2 mm) tendrán el más bajo porcentaje de área abierta, las rejillas con tamaños de ranuras más grandes (es decir, 3 mm) tendrán una

proporción de área abierta mucho mayor. El Cuadro 2 presenta las áreas abiertas típicas para rejillas de pozo de PVC con un ancho diferente de ranuras.

Cuadro 2

Area Abierta Típica para Rejillas de Pozos de PVC con un Ancho Diferente de las Ranuras

Ancho de la ranura		Area Abierta
mm	ancho	%
0.2	0.008	3.0
0.3	0.012	4.3
0.5	0.02	5.3
0.75	0.03	7.7
1.0	0.04	10.0
1.5	0.06	11.2
2.0	0.08	12.0
3.2	0.12	13.1

Las rejillas con una área abierta grande se deberán seleccionar generalmente para acuíferos que tienen una permeabilidad alta, tales como las formaciones de grava gruesa, mientras que para los acuíferos de arena fina será más apropiado el uso de rejillas con una pequeña área abierta.

De acuerdo al método práctico, las aberturas de las rejillas se seleccionan de manera que pasen 60-80% de las partículas del acuífero. Las partículas más gruesas que restan forman un relleno natural de grava cuando el material más fino se retira de la rejilla durante el desarrollo del pozo.

#### Resistencia a la Corrosión

Una rejilla de pozo se deberá hacer con material que sea resistente a la corrosión, electrólisis y otros tipos de ataque químico y bacteriológico. La naturaleza del agua que debe de extraerse de la formación constituye un factor importante.

Los tipos de corrosión más importantes para las rejillas de pozo son la corrosión en el lugar y la corrosión por contacto. La corrosión en el lugar ocurre en metales impuros, en donde los materiales constituyentes tienen potenciales electroquímicos diferentes en contacto con un electrolito tal como el agua. La corrosión por contacto ocurre en el lugar en que se conectan eléctricamente dos metales diferentes y juntos se sumergen en un electrolito, tal como el agua.

La resistencia a la corrosión también se puede obtener para rejillas de acero cubriéndolas con una capa protectora de betún, caucho duro, pintura

para caucho tratada con cloro, plástico o, menos común, esmaltes de arcilla vitrificada o porcelana.

### Filtro de Grava

Puede resultar no económico o técnicamente imposible hacer una rejilla de pozo con las aberturas o ranuras requeridas muy finas en lugares donde la formación acuífera conste de arena fina. En estos casos, será aconsejable un filtro de grava colocado alrededor de la rejilla de pozo. El filtro de grava bordea la formación y retiene la arena fina, de manera que las aberturas de la rejilla se puedan hacer mucho más grandes. En pozos de poca capacidad, un solo filtro de grava será adecuado; filtros dobles o triples de grava se deberán evitar por razones de costo y complejidad de instalación.

Un filtro de grava no sólo permite el uso de aberturas grandes de la rejilla sino que también proporciona una alta permeabilidad en la zona de filtro alrededor de la rejilla de pozo.

Con el método práctico, un filtro de grava se necesita en formaciones con un tamaño efectivo de las partículas, inferior a 0.3 mm, y un coeficiente de uniformidad menor que 3. Los filtros de grava también se pueden aplicar en formaciones más gruesas, si la ventaja de la eficiencia hidráulica mejorada de un pozo y el potencial reducido de atoramiento se consideran que sobrepasan el costo adicional de la perforación de un hoyo de diámetro más grande.

Los filtros de grava tienen poco uso y rara vez se les emplea en formaciones con un coeficiente de uniformidad superior a 5.

La grava para un filtro de grava deberá ser de granos redondos y limpios, clasificados de acuerdo a un tamaño uniforme dentro de una escala de 1 : 1.5 (10% del tamaño de las partículas en relación a 90% de la proporción del tamaño de las partículas). Durante el desarrollo del pozo, las partículas finas y de tamaño mediano deben de extraerse del acuífero a través del filtro de grava y la rejilla del pozo por el pozo. El filtro de grava se deberá seleccionar considerando un tamaño de partículas que no retenga el material fino y de tamaño medio de la formación acuífera que lo rodea. Si sucediera esto, la permeabilidad del filtro de grava se reduciría seriamente con el gran riesgo que se asocia a un atoramiento rápido.

Para la colocación del filtro de grava, el método más comúnmente utilizado implica el hundimiento de un entubado temporal en la parte inferior del pozo. Luego, la rejilla de pozo se hace descender y se centra cuidadosamente. Después de esto, la grava se coloca en el espacio anular entre la rejilla y el entubado. Tras haber finalizado la colocación de la grava, se retira el entubado del hoyo para exponer el filtro de grava a la formación circundante. El filtro de grava deberá extenderse un poco por encima de la parte superior de la rejilla de pozo.

El entubado temporal no es necesario en formaciones consolidadas y estables. La grava se coloca directamente en el espacio anular entre la pared de la perforación y la rejilla de pozo.

La grava también se puede colocar alrededor de la rejilla de pozo a través de un número de pequeños pozos excavados, especialmente perforados para tal propósito en un círculo muy cercano alrededor del pozo.

Un cambio realmente nuevo en el diseño de la rejilla de pozo es el suministro de nervaduras especiales (llamadas "nervaduras de grava") en la parte externa de la rejilla. Estas nervaduras mantienen el filtro de grava libre de aberturas de rejilla y de esta manera proporcionan una mejor permeabilidad y condiciones de flujo que las rejillas de pozo de superficie llana, las cuales se comparan con ellas.

## DESARROLLO DE UN POZO

El término desarrollo de un pozo se refiere al proceso de "estabilizar" o "desarrollar" la formación por la rejilla de pozo o el filtro de grava, mediante la remoción de las partículas finas y de tamaño medio que se encuentran alrededor del pozo para aumentar la permeabilidad de la formación en la proximidad del pozo. Así, el desarrollo del pozo incluye aquellas fases necesarias para proporcionar al agua en el acuífero un paso fácil de flujo en dirección al pozo y para evitar que la arena entre al pozo bajo condiciones de uso actual.

En formaciones consolidadas, los pozos se desarrollan asegurando el flujo libre de fisuras y fracturas. En formaciones no consolidadas, esto significa el desarrollo de una zona natural de partículas gruesas alrededor de la rejilla de pozo o del filtro de grava. Existen varios y diferentes métodos de desarrollo de pozos:

- sobrebombeo;
- por pistones, sea con un émbolo buzo o con aire;
- retrolavado (por uno de los muchos métodos);
- chorros de alta velocidad;
- el uso de productos químicos o explosivos.

### Sobrebombeo

En el método de "sobrebombeo", el pozo se bombea con una bomba especial de alta capacidad (una bomba usada, no una nueva) a una velocidad que aumenta constantemente. El bombeo comienza a una velocidad de 20% de la capacidad del diseño de la bomba permanente que se deberá instalar posteriormente y continúa hasta que el agua se aclara y se encuentra libre de arena y limo. La velocidad del bombeo luego se aumenta a 40% y continúa como antes. Al final, el pozo se "sobrebombea" con una velocidad de bombeo de 150% de la capacidad permanente.

Luego de haber completado el proceso de sobrebombeo, se utiliza un achicador para remover las partículas gruesas que se pueden haber asentado en la parte inferior del pozo y en la rejilla del pozo.

### Pistoneo

Tal como se describió líneas arriba, el sobrebombeo no consolidado muchas veces no realizará la remoción deseada de partículas finas y de tamaño mediano de la zona de filtro que rodea la rejilla del pozo, dado que estas partículas formarán "puentes" entre los granos gruesos. Para romper estos puentes se necesitan repetidos cambios en la dirección del curso del agua hacia el pozo y luego, fuera de éste para fines de desarrollo de pozos. La estabilidad de los puentes se destruye en la salida y en la entrada, las partículas más finas se transportan hacia el pozo. A esto se le denomina pistoneo.

El pistoneo con un émbolo es el método más común especialmente en acuíferos de arena y grava. El émbolo de agitación del tipo sólido (Figura 1) consta de dos discos de caucho o cuero entre anillos de madera sobre una boquilla de unión de una tubería pesada. Otro tipo de émbolo de agitación está equipado con una válvula (Figura 2); éste proporciona una acción de pistoneo más liviana que el émbolo sólido.

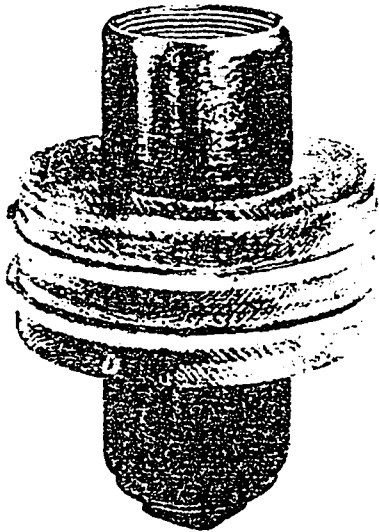


Figura 1  
Embolo de agitación tipo sólido

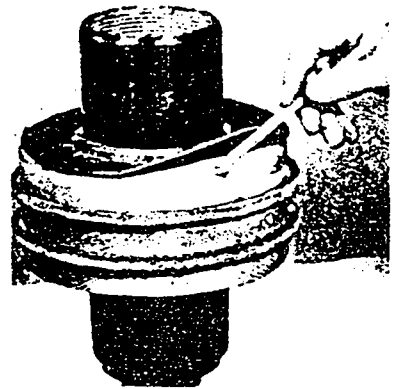


Figura 2  
Embolo de agitación con válvula

Durante la carrera descendente del émbolo, se fuerza al agua a salir del pozo, y a entrar en la formación alrededor de la rejilla de pozo. La carrera ascendente vuelve a poner el agua en el pozo y con esto, el limo desalojado, la arena y cualquier otro material lo suficientemente fino pasa por las aberturas de la rejilla de pozo. El émbolo de agitación está muy bien adaptado para ser operado desde un equipo de percusión. El émbolo se mueve hacia arriba y hacia abajo en el entubado del pozo en una posición de aproximadamente 4 m por debajo del nivel estático del agua en el pozo. El pistoneo deberá comenzar lentamente, y gradualmente ser más rápido y vigoroso.

Durante el proceso de pistoneo en la etapa primaria después de unos pocos minutos, luego de un tiempo mucho más largo, la rejilla de pozo y la parte inferior del pozo se cargarán de arena. Se utiliza un achicador para sacar los depósitos de arena. La cantidad de material fino recolectado en el achicador será gradualmente menor y esto indica qué tanto ha progresado el proceso de desarrollo del pozo.

Un tipo especial de achicador ("la bomba desarenadora") está equipada con un pistón deslizante, el cual se acciona con la línea del achicador. A medida que la línea va de suelta a ajustada, el pistón corre hacia arriba en el interior del achicador y la arena entra enérgicamente.

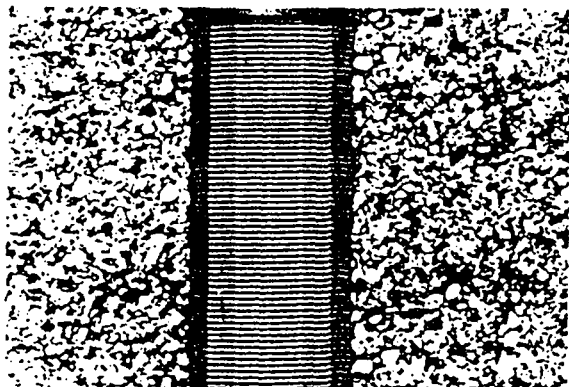


Figura 3  
Rejilla de pozo cuyo desarrollo de formación ha sido natural

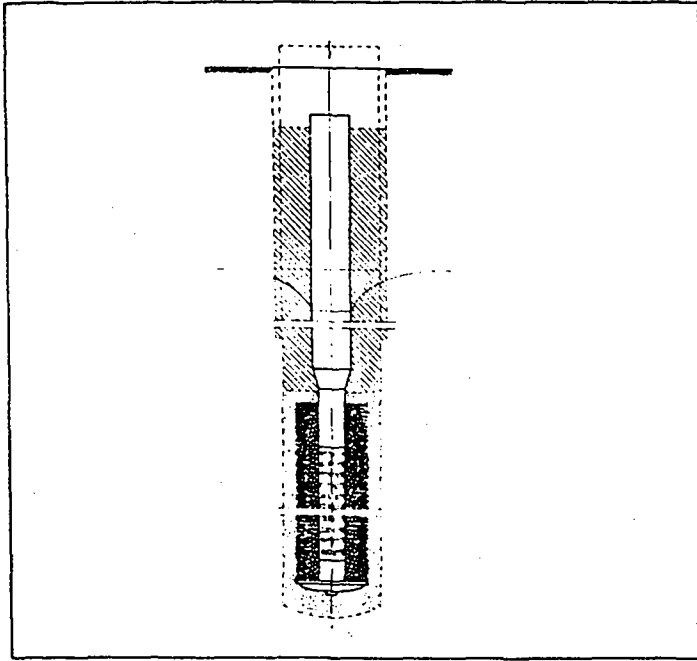


Figura 4  
Pozo con estopa de grava

Otro método de pistoneo es por bombeo del pozo durante cierto tiempo y parar el bombeo repentinamente. Luego, el agua se vierte en el pozo. Este método origina la reversión de la corriente del agua dentro y fuera del pozo. Posteriormente, el agua con barro que contiene el material fino desalojado se achica.

El método más simple de desarrollo de pozos es el achicamiento directo. El achicador se levanta alternadamente y se deja caer, lo que produce un efecto de pistoneo para que el agua fluya dentro y fuera del pozo. El achicador coge la arena y el limo y de esta manera los extrae.

#### Retrolavado con Aire

En el método de retrolavado con aire, la parte superior del entubado del pozo está cerrada herméticamente con una brida. El interior del entubado está conectado con una tubería al compresor y una tubería de bajada con una línea recta interna que se encuentra suspendida en el pozo hasta más abajo del nivel estático del agua. Se bombea el agua fuera del pozo a través de la tubería de descarga. Cuando el agua se aclara, el abastecimiento de aire se suspende y se permite que el agua en el pozo suba

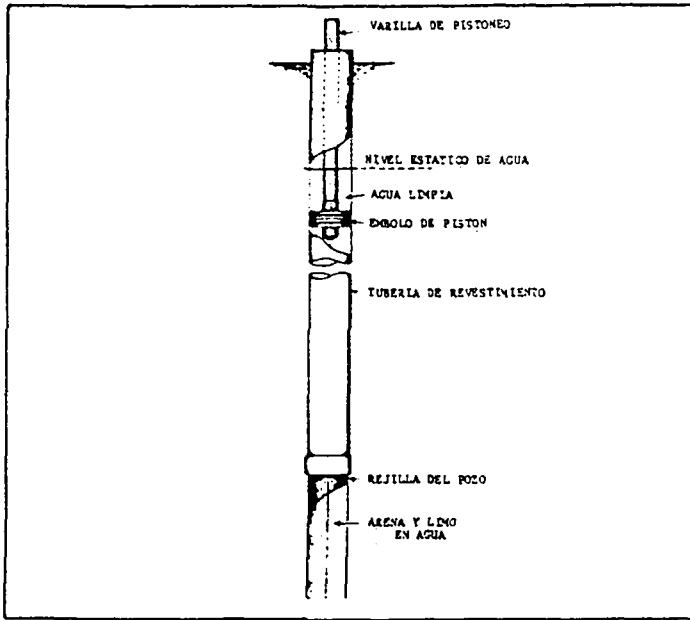


Figura 5  
Pistoneo para desarrollo del pozo

nuevamente al nivel estático. Ahora, el abastecimiento de aire se dirige hacia el entubado cerrado, para que de esta manera se fuerce al agua a entrar a la formación a través de la rejilla. A medida que el nivel del agua desciende por debajo del extremo inferior de la tubería de bajada, el aire comienza a escaparse. El abastecimiento de aire se suprime y el agua en el pozo se levantará nuevamente para alcanzar su nivel estático. El ciclo operativo se repite hasta que el proceso de desarrollo del pozo esté completamente terminado.

En el "método de pistoneo con aire de pozos abiertos" se coloca una tubería de bajada con una línea interna de aire en el entubado del pozo. La tubería de bajada y la línea de aire no están conectadas y se pueden colocar independientemente una de otra. El desarrollo del pozo comienza con el extremo inferior de la tubería de bajada en una posición de aproximadamente 0.5 m sobre la parte inferior del pozo, con la línea de aire fijada en por lo menos 0.25 m más arriba. Cuando se abastece de aire, el pozo es bombeado por la acción elevadora del bombeo por aire. El bombeo continúa hasta que el agua se aclara y está libre de arena y limo.



Luego, la tubería de bajada se eleva a una posición de 0.5 a 1 m más arriba, y el procedimiento se repite. De esta manera, se desarrolla el pozo sobre la longitud total de la rejilla.

Después de terminar con el desarrollo del pozo, se aconseja poner la tubería de bajada una vez más en la parte inferior del pozo, y luego bombear el pozo con el elevador de agua por aire para limpiar a fondo cualquier residuo de arena.

### Chorros de alta velocidad

Un método efectivo para el desarrollo de pozos es mediante chorros de agua, es decir, chorros de agua de alta velocidad que salen de pequeñas boquillas en la parte inferior de una tubería a chorro conectada con una poderosa bomba de agua. Esto hace posible concentrar los chorros de agua en una área pequeña de la rejilla de pozo, uno cada vez, hasta que la longitud total de la rejilla se haya desarrollado paso a paso. Los chorros de agua penetrarán en la formación circundante para un desarrollo completo de un filtro de grava a través de las aberturas de la rejilla de pozo.

Todo lo que se necesita para los chorros de alta velocidad es un instrumento de chorros de agua (con boquillas pequeñas), una manguera de alta presión, tuberías y una bomba poderosa. Si el agua se bombea fuera del pozo simultáneamente con los chorros de agua, pero con una velocidad ligeramente superior, el agua del acuífero fluirá hacia el pozo llevando consigo las partículas finas desalojadas por los chorros de agua.

### Descarga hidráulica o desarrollo por explosivos

La descarga hidráulica o el uso de explosivos se pueden utilizar en formaciones consolidadas para abrir grietas adicionales, hendiduras y fisuras. Sin embargo, el trabajo con explosivos también puede resultar en el adensamiento de la formación que se queda con una permeabilidad más baja.

El trabajo con explosivos deberá ser ejecutado por un especialista y nunca deberá ser realizado sin el consejo de un experto.

## 10. BOMBEO DE AGUA

### ENERGIA SOLAR PARA EL BOMBEO DE AGUA

La energía solar tiene un potencial grande en el empleo de agua bombeada para el abastecimiento de agua de una comunidad pequeña. Se están realizando muchas investigaciones y pruebas prototipo para el desarrollo de sistemas de bombeo de agua con la energía solar que sean confiables y económicos (frecuentemente a estos sistemas se les denomina "bombas solares"). Esto se refuerza cada vez más por medio de experimentos en el campo y demostración de bombas solares promisorias. Ya se encuentra disponible en el mercado una variedad de modelos de bombas solares.

En un sistema de bombeo de agua con ayuda de la energía solar fundamentalmente la radiación solar se convierte en energía eléctrica, sea directamente (células fotovoltaicas) o indirectamente con el uso de una línea de conversión de energía térmica a energía mecánica, y finalmente energía eléctrica. La energía eléctrica se utiliza entonces para poner en movimiento un electromotor que impulsa la bomba de agua. La eficiencia de conversión de la energía total de bombas solares es del orden de 6-12% para un sistema de bombeo de agua tipo panel fotovoltaico/ electromotor/ sistema de bombeo de agua, y 1-15% para un sistema del tipo colector de calor/energía térmica/electrogenerador/electromotor.

Las bombas solares que utilizan células fotovoltaicas para generar energía eléctrica a fin de impulsar una bomba de agua, actualmente son más promisorias que las bombas solares térmicas con colectores de calor de placa llana, debido a la baja eficiencia inherente de conversión de energía en el último tipo de sistema.

Para proporcionar almacenamiento en un sistema de bombeo solar, es posible utilizar baterías que acumulan energía eléctrica. Sin embargo, esto es costoso y se añade a los requisitos de mantenimiento del sistema de bombeo. El modo más recomendable para facilitar el almacenamiento en un sistema solar de bombeo es un tanque de cabecera que reciba y almacene el agua bombeada. De esta manera se puede evitar el uso de baterías.

Un factor de gran importancia para la eficiencia de un sistema solar de bombeo es la elección de una bomba centrífuga de agua que se deberá acoplar a la unidad energía solar/electromotor. El rendimiento de un sistema de bombeo con energía solar con una bomba centrífuga se puede deteriorar excesivamente si las bombas centrífugas que se utilizan son demasiado sensibles a una variación de la caída del bombeo. De esta manera, al elegir una bomba se deben seleccionar tipos y modelos que son razonablemente eficientes aún cuando no operen en su carga óptima.

Los estudios y experimentos han mostrado que para cargas de bombeo mayores y para bombeo de agua en gran volumen, los sistemas solares que utilizan una bomba de émbolo buzo con desplazamiento positivo son mejores que aquellas que utilizan una bomba centrífuga.

## 19. DISTRIBUCION DEL AGUA

En sistemas simples de distribución de agua, los cuales sólo abastecen las demandas de agua potable y de uso doméstico, se pueden emplear tuberías con un diámetro tan pequeño como 60 mm, en áreas rurales hasta 40 mm, dado que estos diámetros de tubería deberán ser adecuados para mantener la velocidad del flujo dentro de límites razonables (es decir, 0.6-2.0 m/seg), con pérdidas de carga aceptables (es decir, 0.01-0.02 m/m').

### TUBERIAS DE PLASTICO

La tubería de PVC es bastante resistente a los productos químicos, electroquímicos, así como también al ataque bacteriológico. También tiene la ventaja de que se pueden unir con facilidad.

La tubería de PVC está disponible en longitudes hasta de 10 m, la cual puede ser manipulada por una persona.

La resistencia a la rotura de una tubería es proporcional al coeficiente de elasticidad y al inverso de la tercera potencia del radio entre el espesor de la pared por el diámetro de la tubería.

De esta manera, la tubería de PVC de paredes gruesas tendrá relativamente una adecuada resistencia a la rotura, a pesar de tener su coeficiente de elasticidad relativamente bajo (por ejemplo, comparado con el acero o fierro galvanizado).

El PVC, tal como todos los polímeros, es sensible a la sobre-exposición de la luz ultra-violeta, la cual puede activar un proceso llamado fotólisis que conduce a la desintegración, quiebra y decoloración de la tubería de PVC. Para los fabricantes de tuberías de PVC es posible proteger su producto contra la fotólisis mediante el uso de estabilizadores especiales. Sin embargo, en realidad no deberá haber ningún problema cuando se almacena la tubería de PVC se protege de la luz directa del sol y si los períodos de almacenamiento son cortos.