

255.1 92FI



Cinara

Filtración Lenta en Arena Tratamiento de Agua para Comunidades

Planeación, Diseño, Construcción,
Operación y Mantenimiento



24

Serie Documentos Técnicos



Univer
del V



Ministerio de Salud
y Consumo



255.1-92FI-11389

CINARA
CENTRO INTER-REGIONAL DE ABASTECIMIENTO Y REMOCION DE AGUA

CINARA, es una fundación sin ánimo de lucro, orientada a la investigación, el desarrollo y la transferencia organizada e integral de tecnología en el campo del abastecimiento de agua potable y de la remoción de agua. Su trabajo se dirige principalmente hacia el sector rural, el pequeño y mediano municipio y los asentamientos urbano-marginales, tradicionalmente los más desprotegidos en el cubrimiento de los servicios públicos.

En la fundación trabajan ingenieros conjuntamente con personal de las Ciencias Sociales y de las Ciencias Básicas, en un esfuerzo integrado con profesionales y técnicos de las instituciones cooperantes, los líderes del agua y las comunidades mismas preocupadas por el mejoramiento de sus condiciones sanitarias y la preservación de su medio ambiente.

CINARA mantiene un Convenio de Cooperación Académica e Investigativa con la Universidad del Valle y adelanta proyectos mediante convenios o contratos con organizaciones locales, nacionales e internacionales del sector de agua, considerado como un componente vital en un desarrollo fundamentado en el mejoramiento de la calidad de vida.

Para información adicional, dirigirse a:

CINARA
A.A. 25360
CALI, COLOMBIA, SUR AMERICA

IRC. International Water and Sanitation Center

El IRC es una fundación independiente y sin ánimo de lucro que actúa como Centro Colaborante en Abastecimiento de Agua y Saneamiento Ambiental, en interrelación con el Gobierno de los Países Bajos, el PNUD, el Banco Mundial, la UNICEF y la OMS.

El IRC está al servicio de las miles de personas que dedican sus esfuerzos al mejoramiento de las condiciones sanitarias y apoya el desarrollo de organizaciones orientadas al cumplimiento de este objetivo.

Su radio de acción se extiende a entidades adscritas a la Organización de las Naciones Unidas por medio de convenios bilaterales, a instituciones del sector de agua y saneamiento y a organizaciones no gubernamentales en los países menos desarrollados.

El trabajo del IRC, está orientado a la generación, transferencia y aplicación de información y experiencia para el mejoramiento de los suministros de agua y el saneamiento. En su metodología, enfatiza la integración de aspectos técnicos y socioeconómicos y concentra esfuerzos en la participación de la comunidad, el papel de la mujer, el uso apropiado de la tecnología, la educación en salud y el desarrollo de estrategias para facilitar el intercambio de información.

Las solicitudes para mayor información sobre el IRC, deben dirigirse a:

IRC
P.O. BOX 93190, 2509 AD
LA HAYA, PAISES BAJOS

*Filtración Lenta en Arena
Tratamiento de Agua
para Comunidades*

*Planeación, diseño, construcción
operación y mantenimiento*

LIBRO	11389
LO:	255.192F1

Esta publicación fue posible gracias al apoyo financiero del Departamento de Ingeniería y Desarrollo del Ministerio de Relaciones Exteriores de los Países Bajos.

Foto de la portada: Planta de tratamiento con filtración lenta en arena y pretratamiento en medios gruesos, Zaragoza, Colombia.

FILTRACION LENTA EN ARENA TRATAMIENTO DE AGUA PARA COMUNIDADES

**Planeación, diseño, construcción
operación y mantenimiento**

J.T. Visscher, R. Paramasivam, A. Raman,
H.A. Heijnen

Traducido y actualizado
por un grupo de profesionales
adscritos a la sección técnica de CINARA
bajo la coordinación del ingeniero
Jorge Latorre

Documento Técnico 24

**IRC International Water and Sanitation Centre
La Haya, países Bajos**

CINARA Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua
Cali, Colombia

Filtración Lenta en Arena. Tratamiento de Agua para Comunidades: Visscher, J.T.; Paramasivan, R.; Raman, A.; Heijnen, H.A. (Traducido, actualizado y ampliado por un grupo de profesionales de CINARA bajo la dirección de J. Latorre).

Cali, Colombia, IRC, 1992 *XII*; 163 páginas; 67 figuras; 33 tablas. (Serie DT No. 24). Incluye bibliografía seleccionada.

ISBN 90-6687-022-2

Resumen

Presenta información establecida sobre filtración lenta en arena, así como normas resultantes de proyectos de demostración en países en desarrollo.

En el Capítulo 2 se presentan los principios básicos del suministro de agua a comunidades y la participación comunitaria, antes de abordar una discusión detallada de la filtración lenta en arena en el Capítulo 3. El diseño global del sistema es tratado en el Capítulo 4, y los costos de construcción, operación y mantenimiento en el Capítulo 5. La información presentada en estos primeros capítulos es ilustrada en el Capítulo 6 con un ejemplo de la planeación y diseño de un sistema de filtración lenta para una comunidad hipotética. El Capítulo 7 presenta información detallada sobre el diseño estructural, el cual es adicionalmente ilustrado con ejemplos de diseños en el Capítulo 8. Se debe entender que estos ejemplos están basados en condiciones locales específicas, y no necesariamente son aplicables bajo otras circunstancias. En el Capítulo 9 se presentan normas para la construcción, porque la calidad de la construcción puede ser mejorada sustancialmente en muchos casos. Finalmente, el Capítulo 10 esboza los procedimientos detallados para operación y mantenimiento y resalta la importancia de un entrenamiento detallado. Esta publicación se concluye con una serie de apéndices.

Palabras clave: filtración lenta en arena / plantas de tratamiento de agua / normas / participación comunitaria / diseño / costos de construcción / costos de operación / costos de mantenimiento / construcción / operación / mantenimiento / planeación.

© Derechos reservados por el IRC, International Water and Sanitation Centre

El IRC tiene derechos reservados según el Protocolo 2 de la Convención Universal de Derechos de Autor. Sin embargo, por medio de la presente se da permiso para la reproducción de este material, parcial o totalmente, para propósitos educativos, científicos o relacionados con el desarrollo, excepto aquellos que incluyan venta comercial, siempre y cuando (a) se cite completamente la fuente, y (b) se notifique por escrito al IRC, P.O. Box 93190, 2509 AD, The Hague, Países Bajos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Prefacio	XII
1. INTRODUCCION	1
2. SUMINISTRO DE AGUA Y SANEAMIENTO CON PARTICIPACION COMUNITARIA	4
2.1 Importancia de un suministro seguro de agua	4
2.2 Fuentes de agua	4
2.3 Requerimientos de tratamiento	6
2.4 Tratamiento de agua mediante filtración lenta	8
2.5 Selección del sistema de tratamiento	11
2.6 Participación de la comunidad	13
2.7 Educación en higiene	19
3. PRINCIPIOS DE LA FILTRACION LENTA EN ARENA	21
3.1 Componentes del filtro	21
3.2 Proceso de tratamiento	25
3.3 Resultados de la filtración lenta en arena	29
3.4 Operación y control	30
4. PROCESO DE DISEÑO	35
4.1 Capacidad del sistema	35
4.2 Componentes principales y dimensiones del sistema de abastecimiento de agua	38
4.3 Estimación de costos	41
5. COSTO DE LOS FILTROS LENTOS DE ARENA	43
5.1 Costo de construcción	43
5.2 Costos de operación y mantenimiento	52
5.3 Comparación de costos entre la filtración lenta en arena y la filtración rápida	53

6. EJEMPLO DE PLANEACION Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRACION LENTA EN ARENA	54
6.1 Estudio de factibilidad	54
6.2 Procedimiento de diseño	55
6.3 Resumen del ejemplo de diseño	65
7. CONSIDERACIONES PARA EL CALCULO ESTRUCTURAL Y DE DISEÑO DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES	66
7.1 Diseño de la estructura del filtro	66
7.2 Estructura de entrada	77
7.3 Estructura de salida	78
7.4 Sistema de drenaje inferior	80
7.5 Dispositivos para control del filtro	83
7.6 Tuberías y bombeo	85
7.7 Construcción del tanque de agua tratada	87
8. EJEMPLOS DE PLANTAS DE FILTRACION LENTA EN ARENA (FLA) EN COLOMBIA	89
8.1 Planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico, Cali	89
8.2 Planta de tratamiento de la Parcelación El Retiro	90
8.3 Planta de tratamiento de la Vereda La Sirena	90
8.4 Planta de tratamiento de la Parcelación Cañasgordas	90
9. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCION	100
9.1 Preparación de un filtro nuevo	101
9.2 Materiales para la construcción de filtros lentos de arena	102
9.3 Selección de la arena de filtro	106
10. PROCEDIMIENTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO	109
10.1 El papel del operador	109
10.2 Puesta en servicio de un filtro nuevo	112
10.3 Operación y ajustes diarios	115
10.4 Puesta fuera de servicio	121
10.5 Limpieza del lecho de arena	123
10.6 Lavado de la arena con manguera	125
10.7 Rearenamiento de un filtro	128
10.8 Registros	129
10.9 Control de calidad del agua	130

Referencias	132
APENDICES	137
I Resumen de las guías de la OMS para la calidad del agua potable	137
II Consideraciones de diseño para sistemas simples de pretratamiento	140
III Cloración	147
IV Estudio de los suelos	149
V Medición de flujo en los filtros lentos de arena	152
VI Análisis de la calidad del agua	154
VII Instituciones participantes en el proyecto de filtración lenta en arena y centros de documentación	157
VIII Glosario	159

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1: Importancia de las intervenciones relacionadas con agua y saneamiento en el control de enfermedades infecciosas.
- Tabla 2.2: Resumen de consideraciones para la filtración lenta en arena.
- Tabla 2.3: Guía para la selección de sistemas de tratamiento para agua superficial en áreas rurales.
- Tabla 2.4: Participación de la comunidad en proyectos de abastecimiento de agua.
- Tabla 3.1: Eficiencias típicas de tratamiento para filtros lentos de arena.
- Tabla 4.1: Factores de crecimiento de la población.
- Tabla 4.2: Cantidad de agua promedio usada en diversos sistemas de abastecimiento en zonas rurales.
- Tabla 4.3: Estimación de la demanda per cápita de agua para conexiones domiciliarias en zonas rurales de la India.
- Tabla 4.4: Criterios de diseño para filtros lentos de arena que abastecerán zonas rurales.
- Tabla 5.1: Estimación del costo promedio por m² del área del lecho filtrante, sistema de drenaje, grava, arena de filtro y excavación para zonas rurales de la India, 1983.
- Tabla 5.2: Filtros lentos de arena y longitud de la pared para diversas capacidades de diseño con una velocidad de filtración de 0,1 m/h.
- Tabla 5.3: Costos estimados por m² de filtros lentos de arena rectangulares en áreas rurales de la India, 1983.
- Tabla 5.4: Costo total de construcción de filtros lentos de arena. Valores seleccionados para la formulación del modelo de costos. Valle del Cauca. Septiembre de 1987.
- Tabla 7.1: Aplicabilidad de diversos tipos de construcciones para filtros lentos de arena.
- Tabla 7.2: Criterios para el dimensionamiento de un sistema de drenaje inferior, utilizando tuberías perforadas.
- Tabla 9.1: Resumen de los procedimientos de preparación del filtro lento de arena.
- Tabla 9.2: Contenido recomendado de los materiales finos para agregado normal y grande del hormigón.
- Tabla 10.1: Calendario de actividades del operador de un sistema de tratamiento que incluye bombeo.
- Tabla 10.2: Procedimientos para poner en servicio un filtro nuevo.
- Tabla 10.3: Procedimientos de operación y ajustes diarios. Filtros con control a la entrada.

- Tabla 10.4: Procedimientos de operación y ajustes rutinarios. Filtros con control a la salida.
- Tabla 10.5: Puesta fuera de servicio de un filtro con control a la entrada.
- Tabla 10.6: Procedimiento para limpiar un lecho filtrante.
- Tabla 10.7: Procedimientos para el lavado de la arena con manguera.
- Tabla 10.8: Procedimientos para reponer la arena de un filtro.
- Tabla I.1: Guías para la apariencia, olor y sabor del agua potable.
- Tabla I.2: Guías para la calidad bacteriológica del agua en los sistemas de abastecimiento por tuberías.
- Tabla I.3: Frecuencias de muestreo recomendadas para los parámetros bacteriológicos.
- Tabla I.4: Guías para constituyentes inorgánicos seleccionados de importancia para la salud.
- Tabla I.5: Guías para los elementos constitutivos que afectan a la calidad estética.
- Tabla II.1: Criterios para el diseño de tanques de sedimentación rectangulares.
- Tabla II.2: Guías preliminares para el diseño de filtros gruesos horizontales.
- Tabla IV.1: Clasificación de fracciones de partículas.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1: Planta de filtración lenta en arena, Borujwada, India, 1983.
- Figura 1.2: Planta de filtración lenta en arena, Vereda la Sirena, Cali, Colombia.
- Figura 2.1: Filtración en lecho del río, pozo de recolección, Borujwada, India.
- Figura 2.2: Filtro grueso de flujo horizontal, Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- Figura 2.3: Las mujeres son las principales usuarias del suministro de agua en la comunidad.
- Figura 2.4: Apoyo de la comunidad durante la etapa de construcción de las redes de distribución, Alto de los Idolos, Colombia.
- Figura 3.1: Componentes básicos de un filtro lento de arena con control a la salida.
- Figura 3.2: Componentes básicos de un filtro lento de arena con control a la entrada.
- Figura 3.3: Calidad bacteriológica durante la etapa de maduración de un filtro lento de arena.
- Figura 3.4: Desarrollo de la pérdida de carga en un filtro lento de arena.
- Figura 3.5: Efecto del tamaño de la arena en la remoción de bacterias coliformes totales en la filtración lenta en arena.

- Figura 3.6: Planta piloto de filtración lenta en arena, Cali, Colombia.
- Figura 3.7: Filtro lento de arena con control a la entrada. La Marina, Colombia.
- Figura 3.8: Desarrollo típico de la velocidad de filtración en funcionamiento a tasa declinante.
- Figura 5.1: Disposición de un filtro lento de arena con (n) unidades rectangulares.
- Figura 5.2: Filtro circular en mampostería de ladrillo, Cali, Colombia, 1990.
- Figura 5.3: Filtro lento de arena Santa Rosa, Colombia.
- Figura 5.4: Efecto de la altura en los costos de construcción de filtros lentos de arena, Valle del Cauca, Colombia, 1987.
- Figura 6.1: Curva de demanda diaria en una comunidad vecina.
- Figura 6.2: Componentes de un sistema de abastecimiento de agua.
- Figura 6.3: Volúmenes acumulados de afluente y efluente en un tanque de compensación elevado en un período de 24 horas.
- Figura 6.4: Volúmenes acumulados de producción y de consumo de agua.
- Figura 6.5: Posible disposición de una planta de tratamiento de agua.
- Figura 7.1: Principio de los esfuerzos universales de compresión y tensión.
- Figura 7.2: Sección transversal de la pared de un filtro construida de mampostería y ferrocemento.
- Figura 7.3: Sección transversal de la pared de un tanque de ferrocemento.
- Figura 7.4: Construcción de tanque de ferrocemento empleando tubería plástica como molde interior, Nepal, 1986.
- Figura 7.5: Diagrama de presión para filtros rectangulares.
- Figura 7.6: Diagrama de presión para una pared de la caja de filtro.
- Figura 7.7: Sistema de drenaje debajo de la caja de filtro.
- Figura 7.8: Conexión de la pared y el piso en ferrocemento y hormigón reforzado.
- Figura 7.9: Conexión de la pared y el piso en mampostería y hormigón reforzado.
- Figura 7.10: Ejemplo de diseño de refuerzo para conexión de pared y piso.
- Figura 7.11: Tipos de revestimientos para los filtros de pared inclinada.
- Figura 7.12: Estructura de salida de un filtro con control a la salida.
- Figura 7.13: Sistemas comunes de drenaje utilizados en filtros lentos de arena.
- Figura 7.14: Medio de soporte.
- Figura 7.15: Tubo corrugado de PVC para sistema de desagüe inferior
- Figura 7.16: Diagrama de flujo para la instalación de un filtro lento de arena.
- Figura 7.17: Compuertas para control de flujo, Vereda La Sirena, Cali, Colombia.
- Figura 7.18: Válvula para el control de flujo, Parcelación El Retiro, Cali, Colombia.
- Figura 7.19: Línea de gradiente hidráulico en una planta de filtración lenta en arena (flujo por gravedad).
- Figura 7.20: Pérdida de carga por fricción para tubería de PVC.
- Figura 8.1.A: Esquema de la planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.

- Figura 8.1.B: Detalles de la estructura de salida de los filtros lentos del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.
- Figura 8.2.A: Esquema de la planta de tratamiento de la Parcelación El Retiro, Cali, Colombia.
- Figura 8.2.B: Detalles de la estructura de salida de los filtros lentos de la Parcelación El Retiro, Cali, Colombia.
- Figura 8.3.A: Esquema de la planta de tratamiento de la Vereda La Sirena, Cali, Colombia.
- Figura 8.3.B: Detalles del filtro lento de arena de la Vereda La Sirena, Cali, Colombia.
- Figura 8.4.A: Esquema de la planta de tratamiento de la Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.
- Figura 8.4.B: Detalle del filtro lento de arena de la Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.
- Figura 9.1: Relación del contenido de agua, contenido de cemento y los esfuerzos de compresión del concreto.
- Figura 9.2: Ejemplo de la distribución de los tamaños de granos de arena.
- Figura 10.1: Válvulas y otros accesorios básicos en un filtro regulado a la entrada.
- Figura 10.2: Válvulas y otros accesorios básicos en un filtro regulado a la salida.
- Figura 10.3: Herramientas usadas para la operación y mantenimiento.
- Figura 10.4: Sistema de medición y regulación del caudal de la planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.
- Figura 10.5: Accesorio móvil para rebose de agua sobrenadante en unidades de filtración lenta en arena. Triana, Colombia.
- Figura 10.6: Procedimiento de raspado de un filtro lento, La Marina, Colombia.
- Figura 10.7: Cámara para el lavado de arena, Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.
- Figura 10.8: Rearenamiento de un filtro lento.
- Figura II.1: Ejemplo de curva de sedimentación de agua de río empleando una profundidad de columna de sedimentación de 0,5 m.
- Figura II.2: Tanque de sedimentación simple.
- Figura II.3: Filtro grueso de flujo ascendente, en dos fases, Salónica, Colombia.
- Figura III.1: Pérdida de cloro disponible en la solución de cloro en función de la temperatura y el tiempo.
- Figura V.1: Vertederos y ecuaciones de descarga.
- Figura V.2: Curvas de descarga para tres tipos de vertederos.

Prefacio

Esta publicación presenta información que ha sido establecida por experiencias en campo sobre Filtración Lenta en Arena (FLA), así como guías que han resultado de dos proyectos internacionales de investigación y demostración, ambos patrocinados por el Departamento de Investigación y Desarrollo del Ministerio de Relaciones Exteriores de los Países Bajos. El primer proyecto, que versaba sobre filtración lenta en arena, fue iniciado por instituciones en Colombia, India, Jamaica, Kenya, Sudán y Tailandia, en colaboración con el IRC. El segundo proyecto, que concierne la investigación sobre tecnologías de pretratamiento, fue desarrollado en Colombia por CINARA, la Universidad del Valle y el IRC.

Este documento cubre el diseño y la construcción, así como procedimientos de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua que utilicen la filtración lenta en arena. Comoquiera que una planta correctamente diseñada sólo producirá agua segura si el operario sabe cómo mantenerla en operación correcta, el entrenamiento de los operarios debe recibir atención completa desde la fase de planeación, y el diseño de la planta debe facilitar la operación y mantenimiento.

Esta publicación, que es una versión adaptada y actualizada de la versión en inglés, es el resultado de la dirección del Ing. J. Latorre, docente vinculado al CINARA, centro adscrito a la Universidad del Valle. Para la primera traducción del original se utilizó un programa de computador con el apoyo del Dr. F. Reiff, de la Organización Panamericana de la Salud. En la revisión y actualización participaron los siguientes profesionales de CINARA y de la Universidad del Valle: M. García, I. Restrepo, L. A. Hurtado, M. E. Zuluaga, E. Quiroga, H. Pérez, A. Galvis, L. C. Ríos, O. Altamirano, R. Duque, M. Romero, R. Galvis y C. F. Dierolf. Personal de CINARA también participó en la elaboración de dibujos y fotografías para la presente versión.

La publicación original fue el resultado de la colaboración de R. Paramasivan y A. Raman del National Environmental Engineering Research Institute de Nagpur, India, H. Heijnen y J. T. Visscher del IRC de La Haya, Países Bajos. El anterior Documento Técnico No. 11 del IRC: "Slow Sand Filtration for Community Water Supply in Developing Countries, a Design and Construction Manual", preparado por J. C. van Dijk y J. H. C. M. Oomen, constituyó una valiosa fuente de información.

Especiales agradecimientos para la publicación original en inglés, merece C. van Wijk, por sus consejos sobre participación comunitaria y de la mujer, y las siguientes personas: Dr. R. C. Ballance, L. Chainarong, G. Galvis, Prof. L. Huisman, Prof. K. J. Ives, G. E. Nepomuceno, Prof. M. B. Pescod, C. L. P. M. Pompe, I. P. Toms, J. Arboleda Valencia, y M. Wegelin por su contribución a la revisión.

1. Introducción

En muchos países en desarrollo, el tratamiento del agua para hacerla apta para el consumo humano sigue siendo un problema serio. Se han construido plantas de tratamiento costosas y complejas, pero muchas de ellas no funcionan satisfactoriamente debido a un diseño inapropiado, a una fuente de energía eléctrica irregular, escasez de combustible, productos químicos, partes de repuesto y falta de personal calificado. Existe una necesidad obvia de sistemas de tratamiento de agua más fiables y sencillos que puedan ser mantenidos por técnicos locales sin mayor ayuda de fuentes externas. La filtración lenta en arena, en combinación con pretratamiento ha sido identificada como un método que puede satisfacer estos requisitos.

Instituciones en Colombia, India, Jamaica, Kenya, Sudán y Tailandia han cooperado con el IRC en un proyecto integrado de investigación y demostración para probar en terreno el proceso de filtración lenta en arena, y formular guías prácticas para su aplicación en los países en desarrollo. Este proyecto comenzó en 1976 con un programa de investigación para determinar la fiabilidad del proceso en condiciones tropicales. Posteriormente, las instituciones colaboradoras establecieron varios proyectos de demostración para probar la efectividad de este proceso a nivel de comunidad. Las agencias encargadas del abastecimiento de agua en los países participantes construyeron en determinados poblados, sistemas de abastecimiento de agua con filtros lentos de arena (Figuras 1.1 y 1.2). Estos proyectos de demostración también proporcionaron un medio eficaz para transferir el conocimiento de las instituciones de investigación a las agencias encargadas del abastecimiento de agua.

Para asegurar que las comunidades se beneficiaran plenamente del suministro de agua potable no contaminada, el proyecto incluyó un componente de participación y educación sanitaria de la comunidad. La mayoría de las comunidades participantes asistieron a las discusiones y toma de decisiones y contribuyeron a los planes aportando materiales y mano de obra. En muchos de los planes, miembros de las comunidades fueron seleccionados para la operación y el mantenimiento.

El programa de demostración ha probado que la filtración lenta en arena es un método de tratamiento simple, económico y fiable. Investigaciones adicionales realizadas en Colombia, confirmaron que frecuentemente un proceso de tratamiento multietapas con pretratamiento y filtración lenta en arena será el único método factible y eficiente para proporcionar agua potable de bajo riesgo sanitario a partir de fuentes superficiales en los países en desarrollo. También se encontró que es esencial involucrar a la comunidad íntimamente desde el inicio de la introducción de un sistema de abastecimiento de agua, pues ayuda a asegurar que se atiendan satisfactoriamente las necesidades del pueblo, que se movilicen los recursos locales y se usen y mantengan las instalaciones como es debido. Además, los resultados del proyecto revelaron que la

educación en prácticas de higiene, es un elemento clave al iniciar la discusión y el cambio de prácticas en la comunidad, perjudiciales para la higiene y el saneamiento, sin lo cual, el impacto de un abastecimiento de agua limpia es limitado.

Esta publicación se basa en los resultados y la experiencia práctica adquirida en el Proyecto de filtración lenta en arena, el Proyecto de pretratamiento y en las publicaciones más recientes sobre el tema. En particular, se concentra en las plantas de filtración lenta en arena para el abastecimiento público de agua en comunidades de tamaño mediano y pequeño. Cada vez que ha sido posible se han dado “reglas empíricas”, tablas y gráficos simplificados a fin de no efectuar cálculos complicados.

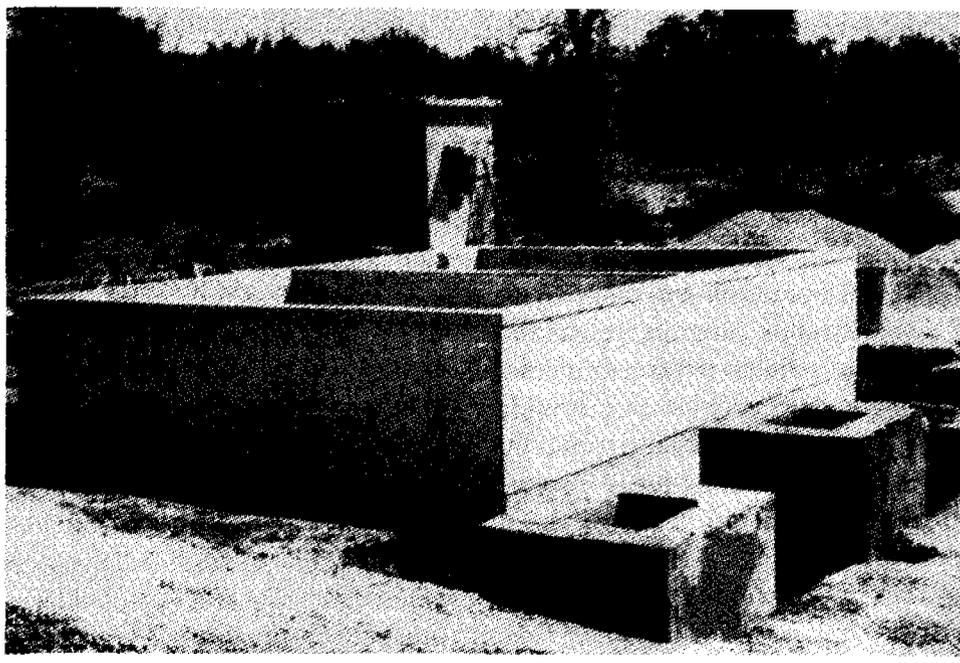


Figura 1.1: Planta de filtración lenta en arena, Borujwada, India, 1983.

En el Capítulo 2 se presentan los principios básicos del abastecimiento público de agua y la participación de la comunidad, antes de pasar a la discusión detallada del proceso de filtración lenta en arena en el Capítulo 3. El diseño general del sistema es examinado en el Capítulo 4, y el costo de construcción, operación y mantenimiento en el Capítulo 5. La información presentada en estos primeros capítulos se ilustra en el No. 6 con un ejemplo de planeación y diseño de un sistema de filtración lenta en arena para una comunidad hipotética.

El Capítulo 7 proporciona información detallada sobre el diseño estructural, lo cual se amplía con ejemplos de diseño en el Capítulo 8. Sin embargo se debe entender que

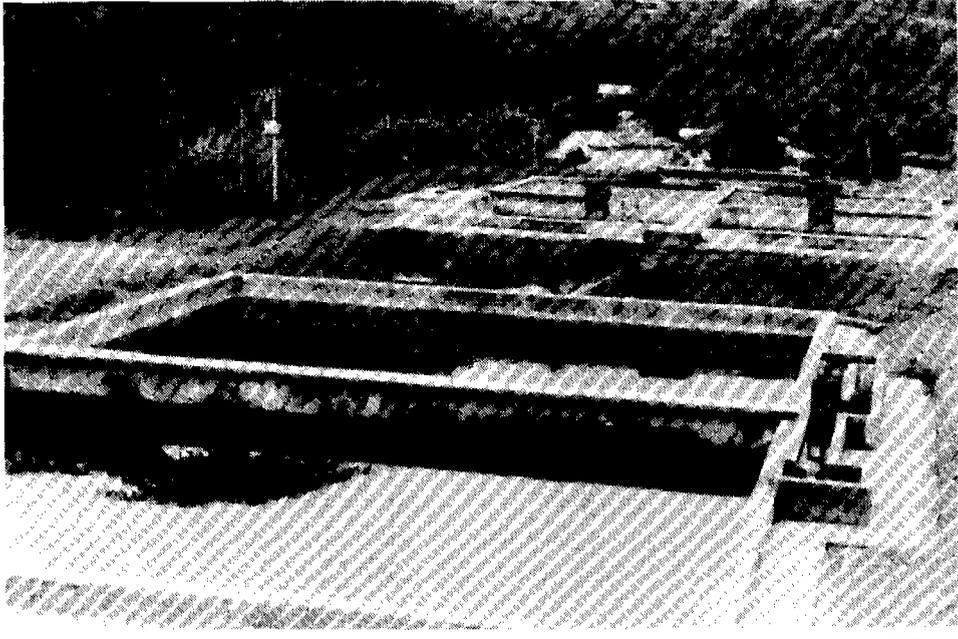


Figura 1.2: Planta de filtración lenta en arena, Vereda La Sirena, Cali, Colombia.

estos ejemplos se basan en condiciones locales específicas y quizás no se puedan aplicar directamente a otras circunstancias.

En el Capítulo 9 se presentan guías de construcción, pues la calidad de la misma puede mejorarse enormemente en muchos casos. Finalmente en el Capítulo 10 se esbozan los procedimientos detallados de operación y mantenimiento y se recalca la importancia de un mantenimiento adecuado.

La publicación concluye con una serie de apéndices que proporcionan información sobre pretratamiento, calidad del agua, investigación de suelos, medición de flujos, cloración y una lista de las instituciones que participan en el Proyecto de investigación y demostración de la filtración lenta en arena y de los centros de documentación.

2. Suministro de agua y saneamiento con participación comunitaria

2.1 IMPORTANCIA DE UN SUMINISTRO SEGURO DE AGUA

El agua para consumo humano debe estar libre de organismos patógenos, sustancias tóxicas, minerales y materiales orgánicos excesivos. Para ser aceptada por los consumidores debe estar exenta de color, turbiedad y olor y contener el oxígeno suficiente para darle un sabor agradable y preferiblemente estar “fresca”.

A partir de 1985, la Organización Panamericana de la Salud, publicó la traducción (en tres volúmenes) de las “Guías para la calidad del agua potable”, producidas por la OMS, las cuales recomiendan unos niveles tolerables para constituyentes bacteriológicos, físicos y químicos en el agua de consumo humano (ver Apéndice I). Con la ayuda de estas guías, se espera que cada país formule sus propios estándares nacionales de calidad de agua potable, basados en sus condiciones locales.

La provisión de un suministro de agua cercano y suficiente para atender las necesidades diarias de los consumidores, contribuirá significativamente a disminuir la incidencia de las infecciones de la piel y los ojos; y puede también reducir las enfermedades diarreicas y la mayoría de infecciones parasitarias, particularmente si el agua es de una calidad bacteriológica razonable. Sin embargo, el suministro de agua segura en cantidad suficiente no garantiza un mejoramiento en las condiciones de salud a menos que sea continuo y se emplee correctamente y se mejoren las prácticas higiénicas domésticas y los métodos de disposición de los desechos humanos. Las maneras de prevenir la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento son presentadas en la Tabla 2.1.

2.2 FUENTES DE AGUA

Las aguas subterráneas, las superficiales y algunas veces el agua lluvia se utilizan como fuentes de abastecimiento para consumo humano. Las aguas subterráneas pueden ser tomadas de manantiales o pozos excavados o perforados; el agua superficial puede proceder de arroyos, ríos, canales, estanques o lagos; y el agua lluvia se puede recolectar de los techos de las casas o áreas de escurrimiento superficial. Puesto que el valor de la fuente depende de la cantidad y calidad del agua a ser extraída, es esencial

hacer una selección cuidadosa, la cual debe estar basada en un estudio suficientemente detallado que asegure su confiabilidad y proporcione agua de calidad satisfactoria.

Tabla 2.1: Importancia de las intervenciones relacionadas con agua y saneamiento en el control de las enfermedades infecciosas.

Enfermedad	Intervención*					
	Calidad de agua	Cantidad de agua	Higiene personal y doméstica	Disposición de aguas grises	Disposición de excretas	Saneamiento de alimentos
Diarrea						
Viral	++	+++	+++	0	++	++
Bacteriana	+++	+++	+++	0	++	+++
Por protozoos	+	+++	+++	0	++	++
Poliomielitis y Hepatitis B						
	+	+++	+++	0	++	++
Infecciones Parasitarias						
Ascaris, Tricocefalus	+	+	+	+	+++	++
Uncinarias	+	+	+	0	+++	++
Oxiuros,						
Hymenolepsis nana	0	+++	+++	0	+++	+++
Otros cestodos	0	+	+	0	+++	+++
Esquistosomas	+	+	0	+	+++	0
Gusano de Guinea	+++	0	0	0	0	0
Otros gusanos con huéspedes acuáticos	0	0	0	0	++	+++
Infecciones en la piel	0	+++	+++	0	0	0
Infecciones en los ojos	+	+++	+++	+	+	0
Enfermedades transmitidas por insectos						
Malaria	0	0	0	+	0	0
Fiebre amarilla y dengue	0	0	+(1)	++	0	0
Filariasis de Bancroft	0	0	0	+++	+++	0
Oncocerciasis	0	0	0	0	0	0

* Grado de importancia en la intervención: +++ alta ++ media + baja 0 innecesaria

1) El vector cumple una parte de su ciclo vital en el agua estancada (Fuente: Ballance, 1984)

Agua subterránea

El agua subterránea es a menudo la mejor fuente de agua para consumo, si el contenido mineral es bajo. Un alto contenido mineral la hace desagradable al paladar e incluso nociva para consumo y requiere tratamiento. Las aguas subterráneas profundas generalmente son seguras bacteriológicamente, pero las aguas subterráneas relativamente cercanas a la superficie, pueden contener contaminación por virus y bacterias provenientes de pozos de letrinas cercanas, tanques sépticos o abrevaderos para ganado.

Agua superficial

El agua superficial generalmente requiere tratamiento previo a su consumo, a menos que provenga de cuencas baldías, deshabitadas y bien protegidas. La variación estacional y aun diaria en la calidad del agua superficial es común y por esto la turbiedad puede llegar a ser muy elevada en arroyos y ríos durante los períodos lluviosos.

Agua lluvia

Generalmente, un sistema de agua colectivo no puede depender de la recolección de las aguas de lluvia como fuente principal, pues los períodos lluviosos son a menudo erráticos. La fiabilidad puede ser mejorada construyendo tanques de almacenamiento, aunque regularmente sólo puede ser almacenada el agua de beber y cocinar debido al alto costo que representa el almacenamiento en estos sistemas. Por consiguiente, el agua de lluvia es apropiada como fuente para sistemas de suministro colectivo en lugares donde el agua superficial o subterránea es escasa o de baja calidad; por ejemplo, en zonas de las Islas Occidentales de Java y en Indonesia, donde las aguas subterráneas son salobres.

El agua lluvia contiene generalmente pocas impurezas, pero cuando la superficie en la cual se recoge no está limpia, debe ser tratada antes de su consumo.

2.3 REQUERIMIENTOS DE TRATAMIENTO

Si el agua de la fuente seleccionada no reúne los requisitos de calidad para el consumo especificado en las normas nacionales de calidad del agua potable o en las guías OMS (Apéndice I), entonces requiere tratamiento. Esto aumentará el costo y complicará la operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua. Por razones

técnicas y económicas, el tratamiento generalmente está orientado a la extracción de turbiedad, impurezas biológicas, hierro, manganeso, color y olor. De los métodos aplicados en los sistemas de suministro colectivo, la filtración lenta en arena ha probado ser en muchos casos el tratamiento más idóneo y a menudo el más económico. Las consideraciones generales para la planificación y diseño de programas de suministro de agua en países en desarrollo son:

- La calidad del agua de suministro no debe deteriorarse en ninguna circunstancia y caer por debajo de los límites aceptables, durante el período de tiempo para el cual el sistema ha sido diseñado.
- Se debe proveer agua suficiente todo el tiempo y en lugares de fácil acceso. Donde las fuentes tradicionales siguen siendo competitivas, su posible uso debe ser discutido y cualquier mejoramiento debe ser acordado con los usuarios.
- La construcción, operación, mantenimiento y preferiblemente las reparaciones, deben ser competencia del personal técnico local o de los usuarios. Antes de la construcción se debe evaluar el personal hábil disponible en la comunidad y en la entidad que administra el abastecimiento de agua.
- Debe emplearse el mínimo de equipo. Este debe ser resistente, confiable y preferiblemente disponible en la localidad.
- Los costos de construcción y operación deben reducirse al mínimo y limitarse el uso o no emplear materiales importados.
- El diseño del sistema debe minimizar la necesidad de productos químicos y bombeo y reducir al mínimo la participación de operadores, pues los salarios tienden a ejercer una fuerte presión sobre los presupuestos, especialmente en pequeñas comunidades.
- El sistema debe planificarse con participación de la comunidad, con el fin de adaptarlo a las necesidades y preferencias locales y aprovechar al máximo las habilidades y conocimientos del lugar.
- Se deben tomar medidas especiales para consultar a las mujeres e involucrarlas en la administración del sistema, pues son los primeros usuarios y tienen un interés directo en mantenerlo funcionando.
- Deben ser incluidos sistemas apropiados de vigilancia y control del funcionamiento del sistema de tratamiento.

- ° Deben tomarse las medidas necesarias para prevenir, o resolver, el posible deterioro de la calidad del agua cruda o roturas en el sistema de tratamiento.

2.4 TRATAMIENTO DE AGUA MEDIANTE FILTRACION LENTA

La filtración lenta en arena es uno de los procesos de tratamiento de agua más efectivos, simples y económicos y es apropiado particularmente para áreas rurales de países en desarrollo. Esencialmente, este proceso difiere de la filtración rápida en arena en su naturaleza biológica, su alta eficiencia y su facilidad de operación y mantenimiento para pequeñas localidades.

El proceso básico de filtración lenta en arena es el siguiente: el agua pasa lentamente a través de un lecho en arena fina a razón de $0,1 - 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, mejorando considerablemente su calidad al eliminarse la turbiedad y reducirse considerablemente el número de microorganismos (bacterias, virus, quistes). Poco después de iniciarse el proceso de filtración, en la superficie del lecho se forma una película filtrante. Esta película, o "Schmutzdecke", consiste en material orgánico e inorgánico retenido y en una amplia variedad de microorganismos activos biológicamente, los cuales descomponen la materia orgánica. Esta actividad biológica y otros mecanismos de tratamiento se extienden a través de la capa superior del lecho de arena, quizás hasta unos $0,4 \text{ m}$ de profundidad. Debido al movimiento lento del agua y al alto tiempo de retención, la filtración lenta en arena se asemeja a la percolección del agua a través del subsuelo y el proceso efectivamente produce agua de calidad comparable al agua subterránea.

Después que el filtro ha estado produciendo agua de buena calidad durante varias semanas, la película filtrante gradualmente se colmata y hace necesario limpiar el filtro. Esto se hace raspando unos pocos centímetros de la parte superior del lecho filtrante y luego se reinicia el proceso de filtración.

De acuerdo con las consideraciones presentadas en la Tabla 2.2 es claro que la aplicación de la filtración lenta en arena debe ser cuidadosamente evaluada cuando se diseña un sistema de suministro de agua. Cuando el agua superficial se obtiene más fácilmente que el agua subterránea, la filtración lenta en arena puede ser el método más simple, económico y confiable para suministrar agua potable.

Pretratamiento del agua superficial turbia

Los filtros lentos de arena sólo funcionan adecuadamente con agua de baja turbiedad, por ejemplo entre $20 - 30 \text{ UNT}$ (Unidades Nefelométricas de Turbiedad). El agua cruda con niveles de turbiedad mayores que 50 UNT durante períodos de algunas semanas, o mayores que 100 UNT por pocos días, causa rápidas colmataciones de los

Tabla 2.2 Resumen de consideraciones para la filtración lenta en arena

Consideración	Comentario
Calidad del agua tratada	Es el mejor proceso para mejorar la calidad física, química y bacteriológica del agua superficial. En muchas áreas rurales la filtración lenta en arena puede ser la única opción de tratamiento.
Facilidad de construcción	El diseño relativamente simple facilita el uso de materiales locales con uso de la mano de obra del lugar. Se requiere poco o ningún equipo o entubado especial.
Costo de construcción	La construcción con materiales y mano de obra local reduce los costos considerablemente. Usualmente, no se requieren materiales o equipos importados.
Facilidad de operación y mantenimiento	Después de un corto período de capacitación a operadores locales con una mínima educación formal pueden operar el sistema.
Costos de operación	Los costos de operación y las necesidades de energía eléctrica son menores que los de otros sistemas. No requieren productos químicos.
Confiabilidad	El proceso es muy seguro, las fallas mecánicas son mínimas. Las fluctuaciones en la calidad del agua cruda pueden ser resueltas sin interrumpir la eficiencia del proceso.
Limpieza	El proceso de limpieza es simple pero laborioso. Aunque el costo puede ser bajo en la mayoría de países en desarrollo, la mano de obra puede no estar siempre disponible cuando se necesita.
Gran área superficial	Se requiere un área bastante grande para los filtros alrededor de 0,02 - 0,08 m ² por consumidor. Debido al bajo costo de la tierra en muchas áreas rurales, esto puede representar solamente el 1 - 2% del costo total de la construcción. Sin embargo, el área puede ser un factor restrictivo en donde la tierra disponible sea escasa.
Colmatación rápida de filtros cuando la turbiedad es alta	La turbiedad alta del agua cruda puede colmatarse rápidamente el lecho filtrante. A menudo esta situación se puede resolver mediante el proceso de pretratamiento.

filtros lentos de arena. Se requiere entonces una frecuente limpieza de los filtros, que no es aceptable por el incremento en la carga de trabajo y la reducción en la producción de agua tratada. Por consiguiente, la necesidad de pretratar el agua cruda para reducir la turbiedad inicial es indispensable. Existen varios métodos sencillos y fácilmente aplicables en pequeña escala, entre ellos la filtración en el lecho del río, la filtración gruesa de flujo horizontal o vertical y la sedimentación tradicional.

La mayor parte de la información sobre pretratamiento se deriva de pruebas de laboratorio y de la operación de plantas a escala real. Alta eficiencia en la remoción de turbiedad ha sido reportada, por ejemplo, en Borujwada, India, donde valores de turbiedad por encima de 400 UNT se redujeron a valores uniformes menores que 5 UNT mediante filtración en el lecho del río (Figura 2.1). En el caso de la filtración gruesa de flujo horizontal (Figura 2.2) se han reportado remociones de turbiedad superiores al 70%. Por ejemplo, en Fau, Sudan, un filtro grueso de flujo horizontal ha reducido valores máximos de turbiedad, alrededor de 1 000 UNT, a valores extremadamente bajos de 5 - 20 UNT (Wegelin, 1986). Se han obtenido también resultados satisfactorios con la filtración gruesa de flujo ascendente, a nivel de laboratorio, en Colombia, donde fueron reportadas eficiencias del 70 - 85% en remoción de turbiedad y del 80 - 99% en remoción de coliformes fecales.

La información sobre el diseño y funcionamiento de los sistemas de pretratamiento es aún limitada y se requieren más estudios para optimizar este proceso. Información adicional sobre pretratamientos se incluye en el Apéndice II, con guías preliminares para diseño y construcción.

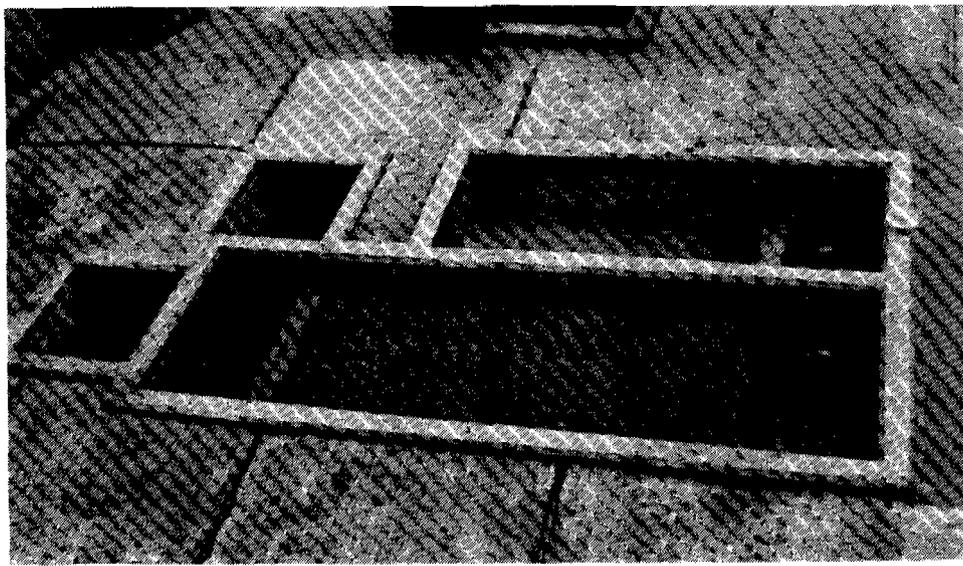


Figura 2.1: Filtración en lecho de río, pozo de recolección, Borujwada, India.

Cloración del efluente

Los filtros lentos de arena son una barrera efectiva en la cadena de transmisión de enfermedades de origen hídrico y en este sentido son mucho más efectivos que los filtros rápidos de arena. Sin embargo, se aconseja adoptar un sistema multibarrera para prevenir la posible transmisión de enfermedades, particularmente si el agua cruda presenta contaminación fecal de cierta magnitud. Los pretratamientos proveen una segunda barrera, hasta cierto punto, pero si la cloración continua del efluente del filtro lento puede ser asegurada, lo cual es posible en algunos países en desarrollo, se establecería un sistema multibarrera muy eficaz.

Información adicional sobre cloración, se presenta en el Apéndice III. Si la cloración no es posible, se puede adoptar una arena de grano más fino y con baja tasa de filtración, que permita asegurar mejor calidad en el proceso de filtración lenta en arena, tal como se explica en el Capítulo 3.

2.5 SELECCION DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Cuando el agua superficial no es segura para el consumo humano y requiere tratamiento, los lineamientos dados en la Tabla 2.3 pueden usarse para seleccionar el sistema de pretratamiento, adoptando la filtración lenta en arena como proceso principal. Para la selección son usados los siguientes parámetros:

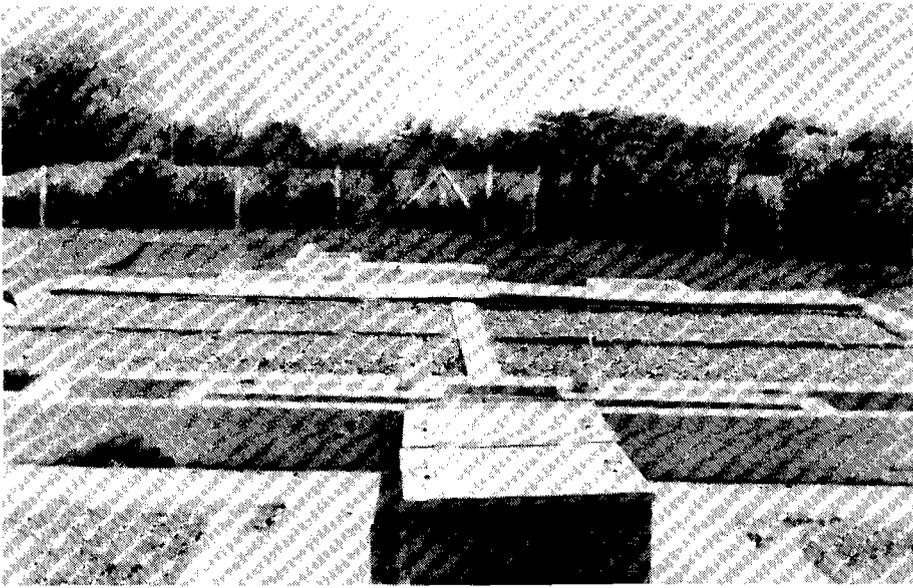


Figura 2.2: Filtro grueso de flujo horizontal, Universidad Javeriana, Cali, Colombia.

- Turbiedad expresada en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT);
- Recuento de coliformes fecales;
- Presencia del gusano de Guinea o esquistosomiasis.

Además, si el contenido de oxígeno del agua cruda es bajo, por ejemplo, por debajo de 4 mg/l se requiere la aeración para prevenir condiciones anaeróbicas en el filtro lento. La esquistosomiasis se ha incluido porque puede transmitirse por el contacto con el agua, aunque generalmente no por su ingestión.

Tabla 2.3 Guía para la selección de sistemas de tratamiento para agua superficial en áreas rurales.

Calidad promedio del agua cruda	Tratamiento requerido
Turbiedad: 0 - 5 UNT NMP* de coliformes fecales: 0 Gusano de Guinea o esquistosomiasis no endémica	No requiere tratamiento
Turbiedad: 0 - 5 UNT NMP* de coliformes fecales: 0 Gusano de Guinea o esquistosomiasis endémica	Filtración lenta en arena
Turbiedad: 0 - 20 UNT NMP* de coliformes fecales: 1 - 500	Filtración lenta en arena Cloración, si es posible
Turbiedad: 20 - 30 UNT (30 UNT por algunos pocos días) NMP* de coliformes fecales: 1 - 500	Conveniente pretratamiento Filtración lenta en arena Cloración, si es posible
Turbiedad: 20 - 30 UNT (30 UNT por algunas semanas) NMP* de coliformes fecales: 1 - 500	Recomendable el pretratamiento Filtración lenta en arena Cloración, si es posible
Turbiedad: 30 - 150 UNT NMP* de coliformes fecales: 500 - 5 000	Pretratamiento Filtración lenta en arena Cloración, si es posible
Turbiedad: 30 - 150 UNT NMP* de coliformes fecales > 5 000	Pretratamiento Filtración lenta en arena Cloración
Turbiedad > 150 UNT	Se requiere una investigación detallada y estudio en planta piloto

*NMP Número probable de coliformes fecales por 100 ml.

2.6 PARTICIPACION DE LA COMUNIDAD

Dotar de agua a una comunidad no está relacionado únicamente con los aspectos de diseño y construcción de los sistemas de abastecimiento sino también con el uso y la administración de los mismos. El uso continuo y el buen manejo de los sistemas pueden ser logrados más fácilmente cuando a la comunidad se le da la oportunidad de expresar sus necesidades y sus puntos de vista y de participar activamente en la planeación y ejecución del proyecto (White, 1982; van Wijk, 1986). Esto implica que los habitantes o en últimas los representantes de todos los sectores del poblado (hombres y mujeres, diferentes etnias y grupos religiosos, ricos y pobres), sean informados y consultados, desde los inicios del proyecto, sobre lo siguiente:

- Los beneficios del suministro de agua tratada;
- Sus preferencias y las consecuencias técnicas y financieras de su elección;
- Las contribuciones que puede hacer la comunidad;
- El método de trabajo para llevar a cabo el proyecto.

En la práctica no siempre es fácil comunicarse con todos los sectores de la comunidad, en particular con las mujeres. Sin embargo, son ellas quienes están relacionadas más directamente con el agua y el saneamiento por ser usuarias, amas de casa, educadoras de los niños y protectoras de la salud de la familia (Figura 2.3), y deberían estar vinculadas de manera activa en todos los aspectos de la planeación, construcción, operación, mantenimiento, administración y evaluación del sistema de abastecimiento comunitario de agua.

Para lograr esta vinculación es necesario coordinar actividades con el personal femenino de las instituciones o programas afines presentes en la zona, realizar en las comunidades reuniones sólo con las mujeres o consultarlas informalmente en sus lugares de trabajo (van Wijk, 1985).

Aunque el grado de participación comunitaria variará considerablemente de un país a otro y de una cultura a otra, a continuación se exponen los principales aspectos sobre abastecimiento de agua en los cuales la comunidad debe participar y tomar decisiones (ver Tabla 2.4).

Participación en la planeación

El reconocimiento de la importancia de una participación activa de la comunidad en la planeación de proyectos rurales de abastecimiento de agua se está incrementando. Para que los sistemas de abastecimiento de agua funcionen continuamente y sean usados por todos los miembros de la población deben seleccionarse tecnologías que sean económicas y aceptadas comunitariamente. Esto puede lograrse conociendo las expectativas de los usuarios y explicándoles las consecuencias financieras, técnicas y

sociales de diferentes opciones tecnológicas, de manera que se puedan tomar decisiones bien fundamentadas sobre el tipo de tecnología y el nivel del servicio, por ejemplo, pilas públicas, conexiones por grupos o domiciliarias y su localización.

También puede llegarse a acuerdos sobre las obligaciones y los derechos, tanto de la comunidad como de la institución responsable del suministro de agua, e igualmente en esta etapa los acuerdos deben extenderse a la posible participación de la comunidad en la construcción, el mantenimiento futuro, el pago y la recolección de tarifas; por ejemplo: puede acordarse en consulta con la comunidad, que los propietarios de ganado paguen por el uso del agua para las reses o puede definirse una tarifa diferencial en la cual los miembros más pobres de la comunidad, quienes a menudo consumen menos agua, paguen una tarifa más baja.

La comunidad y en particular las mujeres, tienen un conocimiento valioso sobre la situación local y las fuentes de agua, lo cual puede ser vital para el éxito de un proyecto



Figura 2.3: Las mujeres son las principales usuarias del suministro de agua en la comunidad.

de abastecimiento. Hay ejemplos de plantas de tratamiento que no pueden ser usadas durante algunos meses del año porque la fuente se seca o el área se inunda. Estos inconvenientes se pueden evitar consultando a la comunidad y estudiando suficientemente el terreno.

Tabla 2.4 Participación de la comunidad en proyectos de abastecimiento de agua.

Fase del proyecto	Decisiones y participación comunitaria
Planeación	<ul style="list-style-type: none"> — Selección del tipo de sistema, ej: pilas públicas o conexión domiciliaria, incluyendo los sitios de conexión de los grifos. — Acuerdos sobre contribuciones futuras en dinero o en especie y tipo de sistema tarifario teniendo en cuenta los usos múltiples y productivos del agua. — Selección y adecuación del sitio. — Selección de operador(es) de confianza, motivado(s) y responsable(s). — Organización de un Comité Local de Agua para la administración del sistema.
Construcción	<ul style="list-style-type: none"> — Acuerdo sobre contribuciones en dinero o en especie. — Coordinación del periodo de construcción. — Aporte de mano de obra.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> — Prevención del desperdicio y contaminación del agua. — Información sobre fugas en la red de distribución.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> — Suministro de personal para ayudar al operador. — Contribuciones en dinero o en especie para las reparaciones mayores.
Administración	<ul style="list-style-type: none"> — Pago oportuno de la tarifa por el consumo de agua. — Determinación del incremento de la tarifa. — Apoyo y supervisión de la gestión del Comité o de la Junta Administradora del Acueducto.
Evaluación	<ul style="list-style-type: none"> — Verificar la satisfacción de los usuarios, a través de discusiones informales.

La consulta con la comunidad también puede prevenir conflictos sobre los usos del agua y ayudar a encontrar soluciones apropiadas a los problemas locales específicos.

Por ejemplo, la fuente de agua del poblado Alto de los Idolos, Colombia, se estaba contaminando con el estiércol del ganado que pastaba libremente en sus alrededores.

La agencia de agua sugirió cercar la bocatoma, pero el Comité Local de Agua no consideró esto factible debido a los costos y al riesgo de que la cerca fuera robada, además exigirle a la gente que encerrara a sus animales no era compatible con las costumbres locales de uso de la tierra y las formas de trabajo. Cuando los miembros de la comunidad entendieron la necesidad de proteger la bocatoma, crearon su propia solución: organizaron a los usuarios en jornadas de trabajo voluntario para sembrar arbustos espinosos a manera de cerca natural. Esta solución resultó muy eficaz para evitar que el ganado pastara cerca a la bocatoma.

Participación en la construcción

La participación directa de la comunidad durante la construcción (Figura 2.4) puede reducir costos y también puede desarrollar sus habilidades. Esta participación puede ser obtenida más fácilmente si la comunidad se beneficia directamente, por ejemplo, estableciéndose una tarifa más baja por el consumo de agua o con la instalación de conexiones domiciliarias en lugar de pilas públicas. Para posibilitar la participación comunitaria en la construcción, esta debe ser planeada en períodos durante los cuales la carga de trabajo de la comunidad sea menor, por ejemplo, fuera de las temporadas de siembra y cosecha. Cuando existe financiación suficiente y por lo tanto la comunidad no tiene que hacer aportes a los costos de inversión, es aconsejable contratar en la localidad la mano de obra, incluyendo el futuro operador u operadores de la planta.

Participación en operación y mantenimiento

Después de un corto período de capacitación, los miembros de la comunidad poseen los conocimientos y habilidades para operar y mantener las plantas de filtración lenta en arena; sin embargo las tareas rutinarias serán mejor realizadas por uno o dos operadores seleccionados al interior de la comunidad que dediquen la mayor parte de su tiempo a esta labor.

Los operadores además de una capacitación y supervisión adecuadas, necesitan algún tipo de retribución. En algunos casos la sola entrega de un juego de herramientas y el reconocimiento social que implica su designación para desempeñar el cargo puede ser una recompensa suficiente; en otros casos la donación de una parcela cerca de la planta de tratamiento y el suministro de una cantidad limitada de agua pueden ser también una compensación adecuada. Sin embargo, cuando la comunidad se organiza para pagar al operador y éste recibe un salario mensual, hay mayor seguridad de que las tareas de operación y mantenimiento se lleven a cabo correctamente.

En tareas tales como la limpieza y rearenamiento de los filtros, que requieran mano de obra intensiva, los operadores pueden ser ayudados por otros miembros de la

comunidad. Algunas veces este será un trabajo gratuito, pero en otras comunidades se requerirá pagarlo. Los miembros de la comunidad también pueden contribuir considerablemente manipulando los grifos con cuidado y notificando inmediatamente al operador las fugas existentes en los grifos y en las redes, evitando así la pérdida del agua tratada.

Cuando el operador hace las visitas regulares de inspección a la red de distribución, puede realizar conversaciones informales con la comunidad, que favorezcan su relación con ésta y le permitan determinar si los usuarios están satisfechos con el servicio.



Figura 2.4: Apoyo de la comunidad durante la etapa de construcción de las redes de distribución, Alto de los Idolos, Colombia.

La delegación a la comunidad o a una organización comunitaria de actividades en la construcción, gestión y administración de los sistemas de abastecimiento de agua, tiene muchas ventajas, siempre que sea respaldada por la agencia de agua o por el gobierno local.

Participación en la administración

La comunidad reunida en asamblea general puede nombrar un comité o junta que la represente y se haga responsable de la gestión y administración del sistema de abastecimiento de agua.

Este comité se encargará de supervisar el trabajo del operador, recaudar las tarifas, mantener una reserva de materiales para reparaciones menores, otorgar conexiones, llevar la contabilidad de los ingresos y egresos y promover la educación de los usuarios. Actúa por períodos no inferiores a dos años y responde ante la comunidad y las autoridades locales por el manejo del sistema.

Cómo aproximarse e involucrar la comunidad

No existe ninguna receta que enseñe cuál es la mejor manera de comunicarse con la comunidad y lograr que ésta participe en el proyecto; no obstante, el primer paso generalmente consistirá en contactar a las autoridades locales para informarlas sobre el proyecto y solicitarles la organización de una asamblea general para presentar el proyecto a la gente y pedirle su opinión. En comunidades donde no es usual que la mujer o ciertos sectores de la población hagan preguntas o expresen sus puntos de vista, ellos pueden ser consultados separada e informalmente. Igualmente los líderes locales pueden contribuir organizando una reunión de las mujeres de la localidad, motivada por intermedio de una organización local de mujeres o de las mujeres líderes (van Wijk, 1985).

Todas las reuniones deben promoverse y llevarse a cabo a una hora y en un lugar adecuados y deben fomentarse discusiones activas. Las mañanas o el final de la tarde, por ejemplo, pueden ser momentos inoportunos para una reunión, porque las mujeres estarán ocupadas recogiendo agua y preparando la comida. También puede ser difícil que participen durante el día en los períodos de siembra y cosecha.

Después de que la concepción del programa ha sido presentada de manera amplia, es necesario realizar discusiones detalladas de planeación, por ejemplo, sobre el diseño, el apoyo comunitario en la construcción y el financiamiento de la operación y el mantenimiento. Estas deliberaciones y consultas a menudo se realizan mejor con un pequeño grupo de miembros seleccionados de la comunidad.

Si ya existe un Comité o Junta Administradora del Acueducto en la localidad, éste puede ser el organismo más indicado para participar en las deliberaciones, siempre y cuando represente los intereses de todos los habitantes y no de un grupo específico.

En otros lugares puede formarse un Comité especial o Subcomité para hacer acuerdos detallados que serán aprobados por la comunidad. Posteriormente este comité puede asumir la responsabilidad de organizar la participación de la comunidad y administrar el abastecimiento de agua después de que termine la construcción. En ambos casos, generalmente el comité necesitará ser capacitado para que pueda desempeñar sus tareas de gestión y administración financiera.

Una vez que los primeros contactos han sido establecidos, las comunidades pueden volverse muy entusiastas. Por lo tanto es importante organizar rápidamente el seguimiento. En algunos casos se requiere desarrollar una campaña de motivación o un programa de educación en higiene para convencer a algunos o a todos los miembros de la comunidad del potencial del nuevo sistema y así persuadirlos a participar en él. Debe recordarse siempre que para iniciar este proceso de participación comunitaria, es necesario dedicarle tiempo suficiente ya que es de vital importancia para el funcionamiento y utilización a largo plazo de las nuevas instalaciones.

2.7 EDUCACION EN HIGIENE

Un programa de educación en higiene en el cual la relación entre higiene y prevención de las enfermedades sea demostrada claramente, puede incrementar considerablemente la participación comunitaria y el impacto en salud del nuevo suministro de agua. Esto estimulará a la comunidad a utilizar únicamente el agua tratada y también será un paso importante para demostrar que el suministro de agua tratada, por sí solo, no previene la transmisión de enfermedades.

Frecuentemente los beneficios potenciales en salud de un suministro de agua tratada, adecuado y accesible, no son comprendidos puesto que las infecciones continúan al ser transmitidas por otras vías. Los mejoramientos en saneamiento y en el sistema de suministro de agua deben ser hechos simultáneamente porque ambos, disposición higiénica de desechos y un mejoramiento de la higiene en general, son esenciales para controlar la propagación de enfermedades.

Un programa de educación en higiene necesita ser planeado participativamente. Inicialmente deberá dirigirse a crear el interés por discutir las relaciones entre enfermedad, agua y saneamiento, de manera que las personas estarán luego en una mejor disposición para reconocer aspectos de su propio comportamiento y de su vivienda que ocasionan riesgos para su salud y para tomar medidas que les permitan cambiar estas prácticas (Boot, 1984).

Los cambios requeridos en las prácticas locales son discutidos mejor si se unen a los mejoramientos técnicos necesarios. Cuando se crea una atmósfera en que las dificultades y las limitaciones pueden ser discutidas abiertamente, se vuelve posible encontrar las soluciones que son factibles y aceptables por todos los interesados. Un tópico relevante para la discusión es la forma en la cual el agua tratada se puede volver a contaminar. Debe aclararse que el agua en el sistema de distribución es potable, a menos que entren impurezas a este sistema por causa de fugas o tuberías rotas, por lo tanto cuando ocurra un daño este debe ser reportado rápidamente al operador pues es esencial repararlo de inmediato.

El agua puede también volverse a contaminar durante la recolección y el almacenamiento casero porque:

- En el sitio de distribución se emplean recipientes sucios para recoger el agua;
- Las personas que acarrear el agua la manipulan con las manos sucias;
- El agua es almacenada en recipientes descubiertos, lo cual ocasiona la contaminación por polvo o tierra;
- El agua se extrae de los recipientes de almacenamiento con un utensilio sucio, o las manos sucias tocan el agua cuando se saca del recipiente.

La educación en higiene no debe limitarse a la utilización del agua sino que debe incluir el saneamiento y la higiene alimenticia. Los alimentos que no son preparados higiénicamente son una fuente importante de enfermedad. Para mayor información véase el Documento Ocasional del IRC “Guía de educación en higiene para sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento ambiental comunitarios”.

3. Principios de la filtración lenta en arena

3.1 COMPONENTES DEL FILTRO

Básicamente, un filtro lento de arena consta de una estructura que contiene:

- Una capa sobrenadante de agua;
- Un lecho de arena fina;
- Un sistema de drenaje;
- Una estructura de entrada y de salida;
- Un conjunto de dispositivos de regulación y control.

El flujo del agua en un filtro lento de arena puede regularse a la salida (Figura 3.1) o a la entrada del filtro (Figura 3.2) y el método seleccionado puede afectar ligeramente la estructura, los dispositivos de control y el funcionamiento, según se explica en la Sección 3.4. Estos componentes se describen someramente en este Capítulo y en el Capítulo 7 se tratan en mayor detalle en relación con el diseño de un sistema de filtración lenta.

Según las experiencias de CINARA en Colombia, dadas las limitaciones y dificultades que para una adecuada operación y mantenimiento de un filtro lento se presentan, especialmente en localidades ubicadas en la zona rural, la alternativa de regulación a la entrada ha sido la seleccionada para su desarrollo, promoción y transferencia en el país. Para esta alternativa, la descripción de sus componentes es la siguiente:

Caja del filtro

La altura total del filtro, desde el fondo hasta la corona de los muros, puede variar de 1,90 a 2,50 m y se puede construir en hormigón reforzado, ferrocemento, piedra o mampostería. La caja del filtro y las estructuras de entrada y salida deben ser estancos para prevenir pérdidas y evitar la recontaminación del agua tratada por las aguas subterráneas poco profundas o de escorrentía superficial.

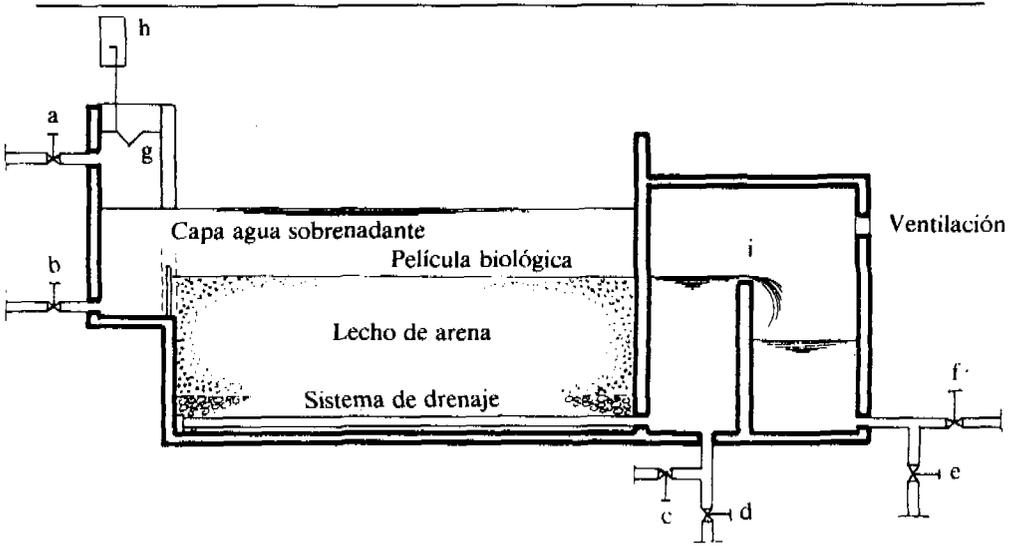


Figura 3.2: Componentes básicos de un filtro lento de arena con control a la entrada.

- a: válvula para dar entrada al agua cruda y regular la velocidad de filtración.
- b: dispositivo para drenar la capa de agua sobrenadante.
- c: válvula para llenar el lecho filtrante con agua limpia.
- d: válvula para drenar el lecho filtrante y la cámara de salida.
- e: válvula para desechar agua tratada.
- f: válvula para suministrar agua tratada al depósito de agua limpia.
- g: vertedero de entrada.
- h: indicador calibrado de flujo.
- i: vertedero de salida.

Salida de impurezas flotantes

Se necesita un dispositivo para extraer las impurezas, que pueden formarse de hojas, algas y demás material flotante en la capa de agua. Este dispositivo también puede servir como un rebosadero para el agua sobrenadante y para drenarla cuando se requiere sacar de servicio una unidad para mantenimiento y limpieza.

Lecho filtrante

Aunque se puede utilizar cualquier material inerte y granular como material filtrante, generalmente se selecciona la arena porque es barata, inerte, duradera y de fácil

obtención. Cuando se coloca en el filtro, la arena debe estar libre de arcilla, tierra y materia orgánica.

El material filtrante se describe en función de su tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad. El tamaño efectivo (d_c ó d_{10}) es la abertura del cedazo que permite pasar el 10% (por peso) de los granos. El coeficiente de uniformidad es la razón entre la abertura del cedazo y el tamaño efectivo a través del cual pasará el 60% (por peso) de los granos (d_{60}); el coeficiente de uniformidad $C_u = d_{60}/d_{10}$, como se explica con mayor detalle en la Sección 9.3.

La arena usada en los filtros lentos de arena debe ser relativamente fina, tener un tamaño efectivo de 0,15 - 0,30 mm y un coeficiente de uniformidad menor de 5, pero preferiblemente entre 2 y 3. Es importante que el tamaño efectivo de los granos de arena no sea más fino de lo necesario, dado que arena demasiado fina incrementará la pérdida inicial de carga hidrostática (Ellis, 1985), aunque la calidad del efluente sea mejor.

El espesor **mínimo** del lecho filtrante debe ser de 0,5 m. Como la limpieza periódica se realiza mediante la extracción de 1 - 2 cm de la capa superior de arena, generalmente se añaden 0,3 m para elevar a 0.8 m su espesor **inicial**. Las limpiezas sucesivas del filtro reducirán gradualmente el espesor del lecho filtrante, de modo que para el segundo o tercer año éste alcanzará el espesor mínimo. Entonces habrá que reponer la arena, tal como se discute en la Sección 10.7.

Sistema de drenaje

El sistema de drenaje sirve para dos propósitos: en primer lugar, permite el paso libre del agua tratada y en segundo lugar, soporta el lecho de material filtrante.

Generalmente consta de un drenaje principal y uno lateral construidos de tuberías perforadas, o de un piso falso hecho en bloques de hormigón o de ladrillo, cubierto con capas de grava gradada. Estas capas impiden que la arena del filtro penetre u obstruya el sistema de drenaje y aseguran la recolección uniforme del agua filtrada.

El espesor del sistema de drenaje, incluyendo las capas de grava, pueden variar de 0,2 a 0,5 m, aunque su profundidad será de 0,15 a 0,2 si se emplean tuberías corrugadas (ver Sección 7.4).

Cámara de salida

La cámara de salida generalmente consta de dos secciones separadas por una pared, en cuya parte superior se coloca un vertedero con su rebosadero ligeramente por encima de la parte superior del lecho de arena. Este vertedero previene el desarrollo de una

presión inferior a la atmosférica en el lecho filtrante, pues ello podría dar lugar a la formación de burbujas de aire debajo de la capa biológica. El vertedero también asegura que el filtro funcione independientemente de las fluctuaciones en el nivel del tanque de agua clara.

Al permitir la caída libre del agua sobre el vertedero, se aumenta la concentración de oxígeno en el agua filtrada, por cuyo motivo la cámara del vertedero debe estar debidamente ventilada para facilitar la aeración.

3.2 PROCESO DE TRATAMIENTO

En un filtro lento de arena las impurezas que contiene el agua se eliminan mediante una combinación de procesos: sedimentación, cribado, adsorción y acción química y bacteriológica. La purificación comienza en la capa de agua sobrenadante, donde las partículas grandes se asientan sobre el lecho filtrante y las más pequeñas se aglomeran en flóculos sedimentables como resultado de las interacciones físicas, químicas o bioquímicas. Bajo la influencia de la luz solar, las algas, que se han introducido en el filtro con el agua cruda, crecen y favorecen el proceso de purificación.

Durante los primeros días, el agua se purifica principalmente por los procesos mecánicos y físicos. El material retenido y el crecimiento orgánico forman una capa delgada sobre la superficie de arena, que sigue siendo permeable y retiene partículas incluso menores que los espacios entre los granos de arena. A medida que se desarrolla esta capa (a menudo llamada biomembrana o "Schmutzdecke"), se convierte en el "alojamiento" de enormes cantidades de microorganismos que descomponen el material orgánico extraído del agua, convirtiéndolo en agua, dióxido de carbono y otros óxidos (PO_4 , NO_3). Al principio, el material orgánico nitrogenado se transformará en amoníaco, que luego es oxidado por bacterias autotróficas específicas para convertirse en nitritos y por último en nitratos.

La mayoría de las impurezas, incluidas bacterias y virus, son removidas del agua cruda al atravesar la película y la capa de arena del lecho filtrante inmediatamente debajo. La eliminación de las bacterias del agua probablemente se debe principalmente a la acción de depredadores, como los protozoarios. Las impurezas que penetran más profundamente en el lecho filtrante entran en contacto con los granos de arena, a los cuales se adhieren, de manera que las partículas de arena gradualmente se recubren de una capa delgada compuesta en su mayor parte de material orgánico y microorganismos. A su vez, éstos adsorben las impurezas por diversos mecanismos de adhesión. Los mecanismos de purificación se extienden desde la biomembrana hasta aproximadamente 0,3 - 0,4 m por debajo de la superficie del lecho filtrante, disminuyendo gradualmente en actividad a niveles inferiores, a medida que el agua se purifica y contiene menos material orgánico y nutrientes. A profundidades mayores se elimi-

nan más productos de los procesos biológicos por los procesos físicos (adsorción) y la acción bioquímica (oxidación).

Cuando los microorganismos están bien adaptados, el filtro trabaja eficientemente y produce un efluente de superior calidad que prácticamente está libre de organismos transmisores de enfermedades, así como de materia orgánica biodegradable. El tiempo que demora el filtro en madurar depende de la calidad del agua cruda, pero la temperatura del agua y los niveles de oxígeno también son factores importantes.

En la Figura 3.3 se presenta un período de maduración de un filtro nuevo, que tomó 19 días. En la literatura se pueden encontrar distintos períodos de maduración, hasta por encima de 60 días. Sin embargo, en zonas tropicales por lo general estos periodos no superan unas tres semanas para filtros nuevos, mientras que para un filtro que se ha limpiado puede tomar de uno a dos días solamente. La ausencia de amoníaco en el agua filtrada es una señal de que el proceso de maduración ha terminado.

La actividad de los microorganismos disminuye considerablemente a medida que baja la temperatura, o que la concentración de oxígeno en el agua disminuya a menos

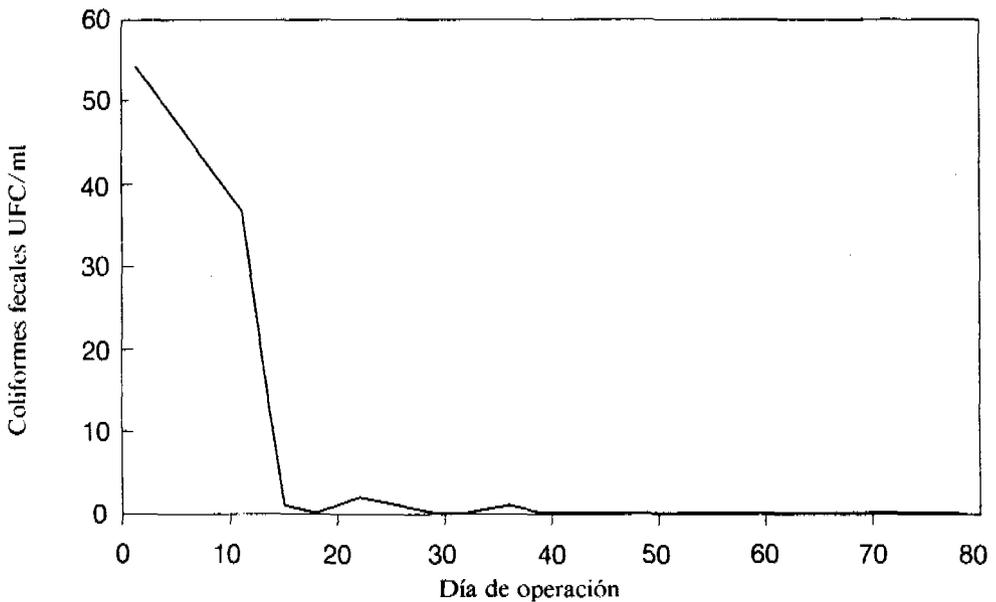


Figura 3.3: Calidad bacteriológica durante la etapa de maduración de un filtro lento de arena.

de 0,5 mg/l. Una concentración baja de oxígeno en el efluente puede incluso dar lugar a condiciones anaeróbicas en el filtro, particularmente cuando la temperatura es alta.

Esto puede producir diversas impurezas ofensivas y un efluente desagradable al paladar, de modo que si fuera necesario, el agua cruda se deberá airear para prevenir condiciones anaeróbicas en el lecho filtrante.

La sedimentación continua y el cribado de las partículas aumentarán gradualmente la resistencia de la biomembrana (Figura 3.4), y después de cierto tiempo la resistencia será demasiado fuerte para que el filtro pueda producir suficiente agua limpia. La capacidad de filtración se puede restablecer limpiando el filtro, lo que se hace drenando el agua sobrenadante y removiendo 1 a 2 cm de arena, incluyendo la biomembrana misma.

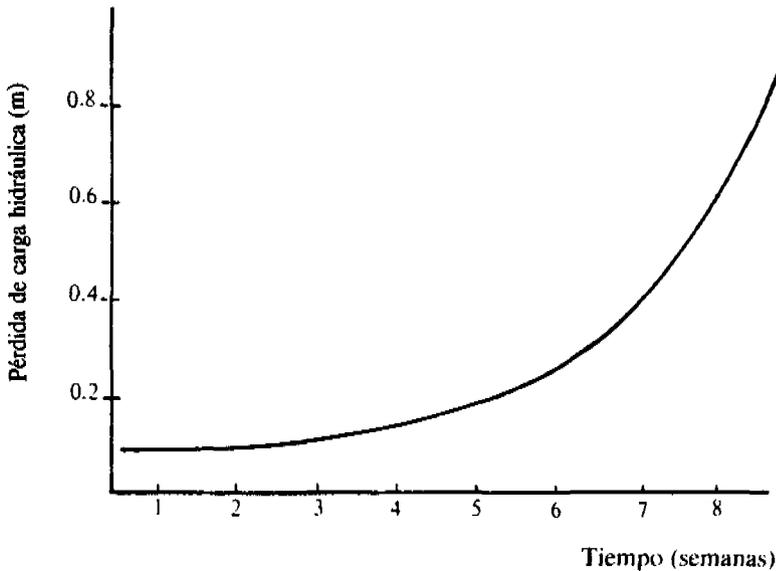


Figura 3.4: Desarrollo de la pérdida de carga en un filtro lento de arena.

Efecto de las algas

Las algas se desarrollan en el agua como resultado de la presencia de nutrientes, como nitratos, fosfatos y la luz solar. Pueden penetrar en el filtro con el agua cruda y luego proliferar en el agua sobrenadante. Son beneficiosas para el proceso de tratamiento en cantidades moderadas, en particular, cuando forman parte de la biomembrana.

Sin embargo, el florecimiento excesivo de algas, ha creado problemas en muchos filtros lentos de arena. En algunos casos, el florecimiento de variedades que flotan

libremente y que pueden bloquear los filtros, ha dado lugar a períodos de filtración muy cortos. En otros casos, el consumo de oxígeno en la noche por grandes cantidades de algas, ha creado condiciones anaeróbicas en los filtros, produciendo efluentes desagradables al paladar.

Ciertos tipos de algas forman filamentos largos que se adhieren a la superficie de la arena en el filtro y en las épocas con mucho sol, la totalidad de los lechos filtrantes pueden estar cubiertos de algas. En condiciones soleadas y calientes, las burbujas de oxígeno producidas por las algas pueden adherirse en tales cantidades que grandes masas de algas flotan hacia la superficie, arrastrando con ellas parte de la arena y la biomembrana, reduciendo así la eficiencia del filtro. Además, las masas de algas tienen que ser extraídas cuando se drena el lecho para limpiarlo, de modo que se pueda raspar adecuadamente.

Control de las algas

Las técnicas para prevenir o controlar el crecimiento de las algas en los filtros lentos de arena incluyen el sombreado, tratamiento químico, métodos biológicos y extracción manual.

Un pretratamiento adecuado puede ser muy efectivo para remover la mayor parte de las algas del agua cruda. Adicionalmente, para permitir períodos de filtración más largos, se cubren los filtros y así se impide el crecimiento subsiguiente de algas en el agua sobrenadante. Si ya comenzó a desarrollarse el florecimiento de algas en el agua cruda, no bastará con cubrir los filtros. Sin embargo, el principio de proporcionar sombra, puede emplearse cuando se construyen los depósitos de almacenamiento de agua cruda, pues la construcción de depósitos profundos ayudará a controlar el crecimiento de las algas.

Se ha ensayado la cloración del agua sobrenadante para controlar el crecimiento de las algas, así como la adición de sulfato de cobre, usándose ampliamente este último en particular para el control del florecimiento de algas en depósitos. Sin embargo, la dosificación directa en un filtro lento de arena entraña el gran riesgo de que se exceda la dosis accidentalmente, con el posterior efecto negativo sobre la vida biológica en el filtro y el subsiguiente deterioro del efluente.

Aunque no se dispone de datos concretos, los peces que se alimentan en la superficie, como la tilapia, pueden ser valiosos para controlar el crecimiento de algas en los filtros lentos de arena. En ninguna circunstancia deben introducirse peces que se alimentan en el fondo, como la carpa, pues pueden dañar la capa biológica (Ellis, 1985). Finalmente, la extracción manual puede ser un método apropiado de control del crecimiento de las algas filamentosas.

3.3 RESULTADOS DE LA FILTRACION LENTA EN ARENA

El mejoramiento en la calidad del agua mediante filtración lenta en arena difiere de un lugar a otro porque el proceso depende de muchos factores, como la calidad del agua cruda, el tamaño de los granos de arena, la velocidad de filtración, la temperatura y el contenido de oxígeno del agua. El riesgo sanitario se encuentra asociado a variables de tipo físico-químico y bacteriológico, siendo éste último el que causa la mayor morbi-mortalidad en los países en desarrollo (Lloyd y Helmer, 1991).

Un filtro lento maduro y bien operado puede reducir entre 1 a 3 log (escala logarítmica) la concentración de enterobacterias (Galvis, et al, 1991). En la Tabla 3.1 se resume la indicación del efecto de la purificación de un filtro maduro, que es un filtro con una biomembrana totalmente desarrollada, según el trabajo de Ellis (1985) y los resultados del Proyecto del IRC y CINARA sobre filtración lenta en arena.

Las cifras corresponden a filtros que están operando bajo condiciones variables, por lo que los resultados muestran gran variedad.

La selección del tamaño de los granos de arena es un factor crucial en el rendimiento del filtro, según se ilustra en la Figura 3.5, que representa los resultados de 18 pruebas con filtros piloto a una velocidad de filtración de 0,12 m/h (Bellamy, 1985).

La selección de un tamaño efectivo de grano fino mejorará el rendimiento del proceso de tratamiento, aunque aumentará la pérdida inicial de la carga hidrostática.

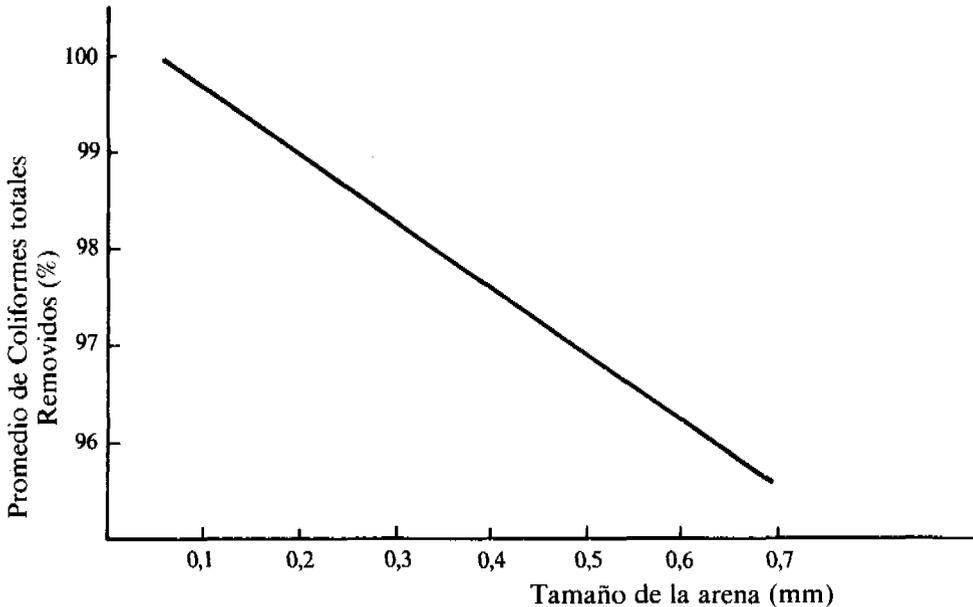


Figura 3.5: Efecto del tamaño de la arena en la remoción de bacterias coliformes totales en la filtración lenta en arena. (Bellamy, 1985).

Si se ha tenido poca experiencia con los filtros lentos de arena en una cierta región o país, es preferible probar su rendimiento con la fuente de agua cruda en pequeñas plantas piloto que consisten, por ejemplo, en tuberías de PVC, tambores de petróleo o tubos de alcantarillado de hormigón (Figura 3.6)

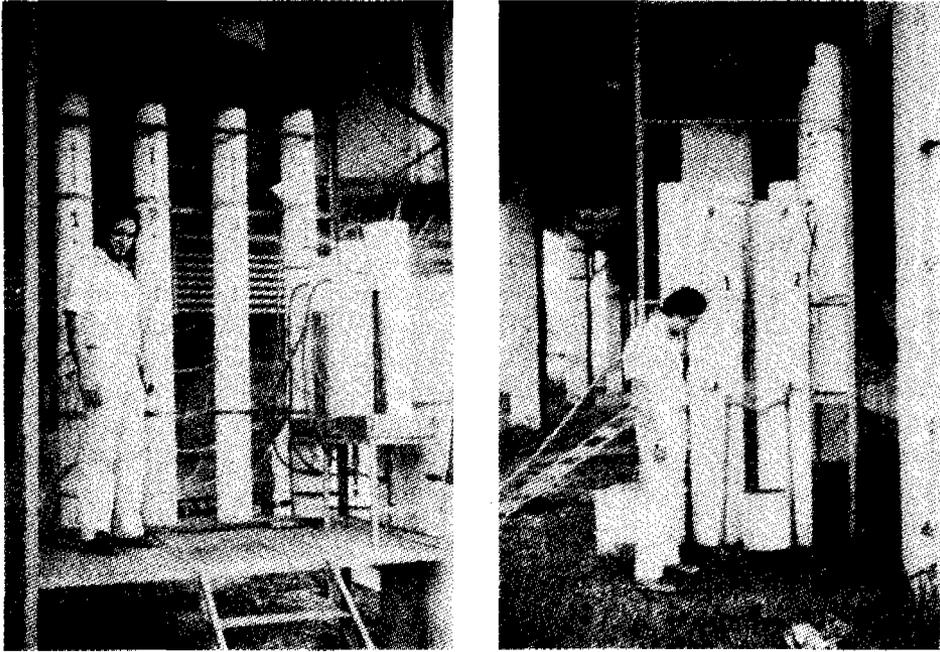


Figura 3.6: Planta piloto de filtración lenta en arena, Cali, Colombia.

3.4 OPERACION Y CONTROL

El aspecto más interesante de la filtración lenta en arena es su sencillez de operación y control porque después de un breve período de adiestramiento los procedimientos operativos los puede realizar un encargado local sin que necesariamente cuente con algún grado de educación formal.

El control de la velocidad de filtración es la clave del funcionamiento adecuado de un filtro lento de arena. Para el agua superficial, la operación a un ritmo entre 0,1 y 0,2 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ es generalmente satisfactoria, pues el filtro tiende a obstruirse en un periodo de tiempo más corto si se emplean velocidades de filtración más altas, además de que se deteriora la calidad del agua filtrada. Sin embargo, la velocidad puede aumentarse a 0,3 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ durante breves períodos de uno o dos días sin mayor daño, por ejemplo, mientras se está limpiando otro filtro. Es importante evitar fluctuaciones rápidas en la

tasa de filtración porque la flora bacteriana en el lecho filtrante requiere tiempo para ajustarse a nuevas condiciones.

Tabla 3.1 Eficiencias típicas de tratamiento para filtros lentos de arena (tomado de Galvis et al, 1991)

Parámetro	Reducción típica
Entero-bacterias	90 - 99% o aun mayor. Sin embargo, la eficiencia de remoción de Coliformes es reducida por bajas temperaturas, aumento en la velocidad de filtración, uso de arena gruesa, poca profundidad del lecho de arena, concentración reducida del contaminante y justo después de la remoción de la membrana biológica.
Cercarias de esquistosoma	Remoción virtualmente completa.
Quistes de protozoarios	99 - 99,99% aun después de la remoción de la biomembrana.
Turbiedad	Generalmente reducida a menos de 1 UNT.
Color	30 - 90% siendo 30% la eficiencia más usualmente reportada.
Materia orgánica	DQO 30 - 90%; COT 15 - 30%. Materia orgánica tal como ácidos húmicos detergentes, fenoles y algunos pesticidas y herbicidas pueden ser removidos desde 50 hasta más de 99%.
Hierro, Manganeso	Pueden ser significativamente removidos.
Metales pesados	30 - 90% o aun más.

Control de la velocidad de filtración de un filtro regulado a la salida

La velocidad de filtración se puede regular con la válvula situada en la salida del filtro (válvula (E) en la Figura 3.1). La resistencia aumentará con el transcurso del tiempo, particularmente en la biomembrana, por lo que se genera la necesidad de ir abriendo esta válvula a fin mantener la velocidad original de filtración.

Si no se puede abrir más la válvula, entonces es necesario limpiar el lecho filtrante para restablecer la velocidad de filtración. Dado que la limpieza significa que el filtro estará fuera de servicio por lo menos uno o dos días, deberán construirse dos o más unidades de manera que las otras puedan trabajar a una velocidad mayor si fuera necesario, mientras se está limpiando o reponiendo la arena en una de ellas. Por ejemplo, para que la producción total de agua de una planta de dos unidades siga siendo la misma, el retiro del servicio de un filtro para limpiarlo significa que hay que

duplicar el ritmo de filtración de la otra unidad. En una planta con tres filtros, la velocidad de las dos unidades que quedan funcionando tendrá que ser aumentada en un 50%. Por lo tanto, un número mayor de unidades tiene ventajas operativas, pero puede ser algo más costoso, según se explica en el Capítulo 5.

Control de la velocidad de filtración de un filtro regulado a la entrada

Otra manera de controlar la velocidad de filtración es fijando la válvula de entrada de agua cruda a la velocidad de flujo requerida (válvula (a) en la Figura 3.2).

Inicialmente, el nivel del agua sobrenadante será bajo, pero con el tiempo subirá gradualmente para compensar el aumento de la resistencia del filtro. Este método tiene la ventaja de que no es necesario ajustar las válvulas con regularidad y el nivel de agua ascendente es una indicación obvia de que se necesita limpiar el filtro. Por otro lado, la extracción de impurezas flotantes y de algas se complica más. No se ha determinado aún si el proceso de maduración es afectado por el menor tiempo de retención resultante de la baja capa inicial de agua sobrenadante (Figura 3.7).

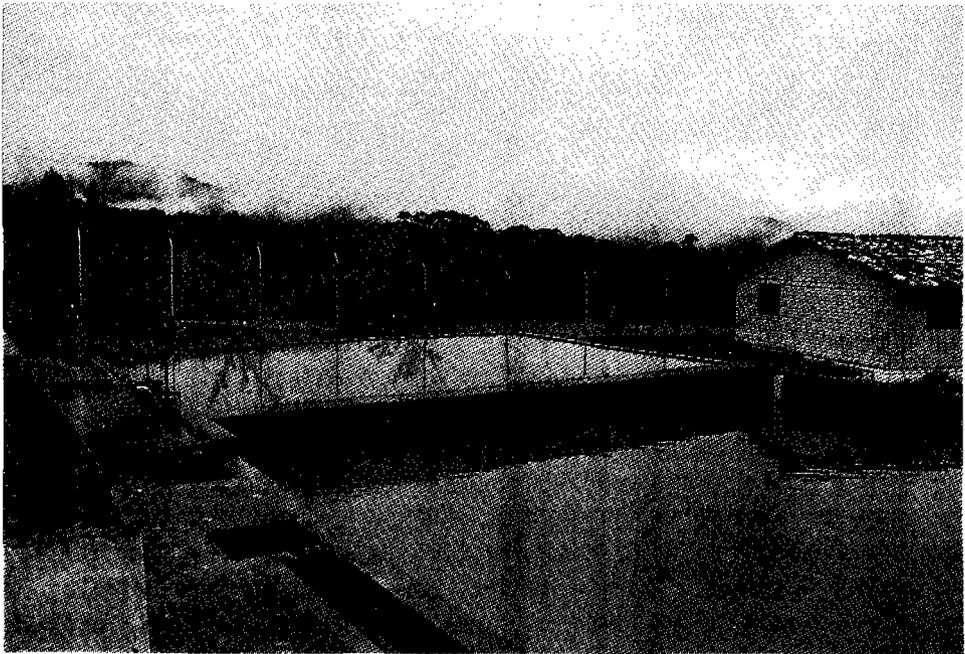


Figura 3.7: Filtro lento de arena con control a la entrada, La Marina, Colombia.

Modo de operación

Lo más eficaz es operar continuamente un filtro lento de arena, porque así se asegura una buena calidad del efluente y se utiliza un área filtrante más pequeña. La operación continua del filtro es posible cuando el agua cruda se puede hacer pasar a los filtros mediante el flujo por gravedad, pero en muchos casos hay que bombearla. Si no se puede garantizar el bombeo continuo debido a una fuente de energía intermitente o a la carencia de personal capacitado, la operación continua a una velocidad constante puede asegurarse construyendo un tanque de compensación de agua cruda. El agua es bombeada hacia este tanque a ciertos intervalos, antes de alimentarla continuamente hacia los filtros mediante flujo por gravedad. Tal vez haya que cubrir el tanque para evitar el crecimiento de algas.

De otro modo, en los filtros controlados a la salida puede emplearse una velocidad de filtración declinante, método que funciona del siguiente modo: cuando no hay fuente de energía eléctrica, el agua no es bombeada a los filtros, pero la válvula de salida (E), permanece abierta. El nivel del agua sobrenadante bajará lentamente y como proporciona la carga hidráulica para la filtración, la velocidad de filtración disminuirá gradualmente. Cuando se restablece el bombeo, la velocidad de filtración declinante aumentará nuevamente (Figura 3.8). La filtración a velocidad declinante a

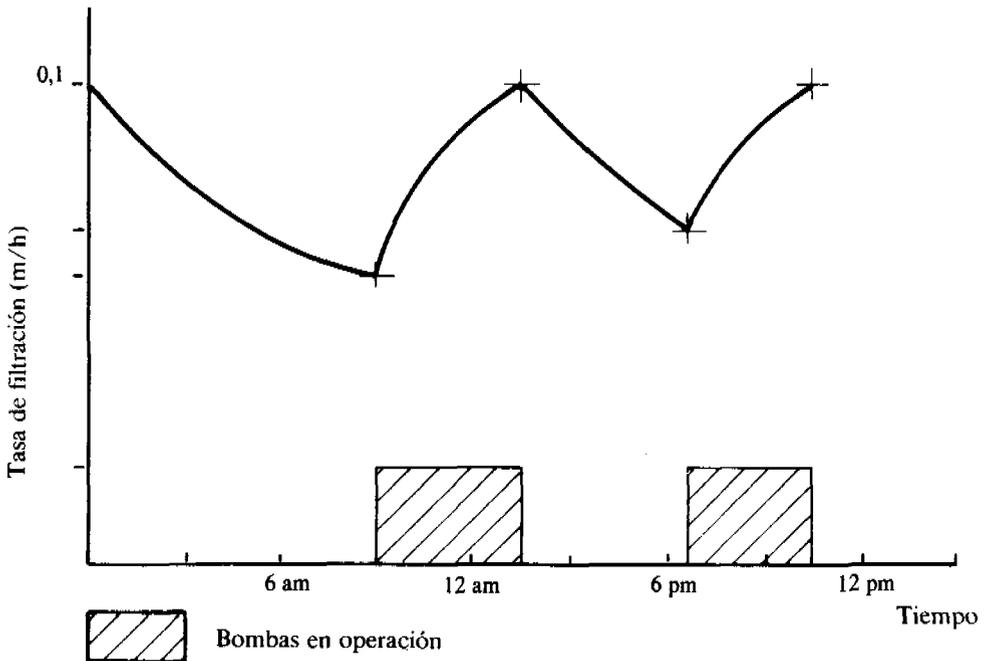


Figura 3.8: Desarrollo típico de la velocidad de filtración en funcionamiento a tasa declinante.

menudo es más costosa, ya que requiere un área mayor de lecho filtrante para obtener la misma producción de agua que con los filtros operados continuamente, no obstante, el efluente todavía es de calidad aceptable. Sin embargo, la filtración a velocidad declinante no se puede usar en filtros controlados a la entrada debido a la baja altura del agua sobrenadante en las primeras semanas de funcionamiento del filtro.

Desafortunadamente, en algunos países se acostumbra cerrar la válvula de salida cuando las bombas de agua cruda no están funcionando, lo que significa que la filtración es intermitente porque cesa completamente durante ciertos períodos del día.

No se debe permitir esta operación intermitente porque se ha demostrado de manera concluyente que se afecta en forma negativa el comportamiento de la membrana, lo cual se refleja en la calidad del efluente. Este deterioro se presenta en general entre las tres y las seis horas siguientes de haber reiniciado la generación de la unidad.

4. Proceso de diseño

El diseño de un proyecto de filtración lenta en arena para una localidad en particular, consta de dos etapas básicas en su proceso; en la primera fase se busca:

- Precisar la capacidad del sistema de almacenamiento;
- Aprovechar la infraestructura de abasto existente;
- Identificar la alternativa de pretratamiento que se va a proyectar;
- Estimar los costos de construcción, operación y mantenimiento.

Los resultados obtenidos en esta primera fase pueden utilizarse como base para captar recursos, planear y organizar el proyecto.

La segunda fase, se orienta a:

- La conceptualización y ejecución del diseño estructural;
- La definición de especificaciones técnicas tanto de materiales como de equipos utilizados en el diseño.

Este Capítulo se centra en la primera fase, mientras que en los Capítulos 7 y 8 se suministra información relativa a la segunda.

4.1 CAPACIDAD DEL SISTEMA

Al diseñar un sistema de abastecimiento de agua, el factor más importante por definir hace referencia a la capacidad de la planta de tratamiento, en otras palabras, a la cantidad de agua total requerida por día o demanda máxima diaria. Este parámetro es de difícil estimación y depende, entre otros factores, del período de diseño, el número de usuarios del sistema y la cantidad de agua que se va a suministrar por persona y por día.

4.1.1 Período de diseño

Se entiende por período de diseño, el tiempo durante el cual el sistema proporcionará a la comunidad agua de buena calidad y en cantidad suficiente. Este período no debe ser corto (inferior a 10 años) ni muy largo, debido a factores de tipo económico y dificultad en la estimación de demandas futuras. Un período de diseño adecuado para filtros lentos de arena, oscila entre 10 y 15 años.

4.1.2 Población de diseño

Una vez definido el período de diseño, se debe determinar la población de diseño futura, la cual puede ser calculada a partir de la información demográfica disponible.

Factores socio-económicos, tales como planificación familiar, migración, cambios en atención médica y nivel de ingresos, entre otros, deben ser considerados al estimar la tasa de crecimiento poblacional; sin embargo, la información demográfica disponible no es siempre confiable y en ciertas circunstancias debe ser confrontada con la población real que se va a abastecer, bien sea a través de un muestreo o de un censo poblacional, según la situación.

Es importante que el abastecimiento que se proyecte, satisfaga las necesidades de la comunidad a lo largo del período de diseño y obviamente hasta su culminación, tomando como base el incremento poblacional anual. A continuación se presenta una expresión que permite calcular la población de diseño con base en la población actual y la tasa de crecimiento anual:

$$P_d = P_a (1 + 0,01 r)^n$$

Donde:

P_d = Población de diseño (población futura)

P_a = Población actual

r = Tasa de crecimiento anual (%)

n = Período de diseño

Por ejemplo, si la población actual de una comunidad es de 1200 habitantes, su tasa anual de crecimiento 3% y el período de diseño 15 años, entonces el factor de crecimiento será $(1,03)^{15} = 1,56$. Esto significa que durante 15 años la población tiene probabilidades de aumentar a $1,56 \times 1200$, o sea, a 1872 personas. En consecuencia, el nuevo sistema de abastecimiento debe ser proyectado para este tamaño poblacional de tal manera que suministre agua en cantidad suficiente hasta finalizar el período de diseño. En la Tabla 4.1 se presentan los factores de crecimiento demográfico para diversas combinaciones de tasas anuales de crecimiento y períodos de diseño.

4.1.3 Demanda de agua per capita

La cantidad de agua promedia obtenida a partir de sistemas de abastecimiento en varios países en desarrollo, varía entre 20 y 150 litros por persona día. Aspectos como la calidad y disponibilidad del agua, el costo, las prácticas culturales, factores socio-

Tabla 4.1 Factores de crecimiento de la población.

Período de diseño (años)	Tasa de crecimiento anual de la población		
	2%	3%	4%
10	1,22	1,34	1,48
15	1,35	1,56	1,80
20	1,49	1,81	2,19

económicos y metodológicos y el tamaño de la comunidad, influyen en la demanda per capita (Tabla 4.2). El tiempo que las personas disponen para abastecerse de agua, la localización y facilidad de acceso a los puntos de distribución y los usos adicionales que se puedan derivar de ella, en sectores como el agropecuario, recreativo, turístico, etc., son también elementos importantes que influyen al estimar una dotación.

Los valores presentados en la Tabla 4.2 no se deben emplear directamente al proyectar un sistema de abastecimiento de agua, dado que no consideran limitaciones en la continuidad del sistema, lo que a su vez implica deficiencias en la cantidad de agua efectivamente suministrada. Otro elemento no considerado, es el tiempo de espera de los usuarios en las pilas públicas, cuando se adopta esta alternativa como nivel de servicio en la localidad. El diseño de un sistema de abastecimiento de agua debe hacerse con criterios de información nacional, preferiblemente con datos locales, sobre la cantidad de agua que se debe suministrar por persona y por día, teniendo en cuenta las condiciones y preferencias socio-económicas predominantes en la comunidad, (ver Tabla 4.3).

Cuando no se dispone de parámetros nacionales, la demanda per capita puede calcularse partiendo de las necesidades específicas de agua en la comunidad para diferentes usos.

Tabla 4.2 Cantidad de agua promedio usada en diversos sistemas de abastecimiento en zonas rurales (*).

Tipo de abastecimiento	Uso promedio diario de agua (l/p/d)	Rango de uso diario de agua (l/p/d)
Pozos o bombas manuales	15	5 - 25
Abastecimiento por tuberías a pilas públicas	30	10 - 15
Conexiones domiciliarias (un solo grifo)	50	20 - 150

(* Basado en Feachem et al (1977).

Tabla 4.3 Estimación de demanda per capita de agua para conexiones domiciliarias en zonas rurales de la India (**).

Consumo de agua	l/d
Beber	5
Cocinar y limpiar	18
Servicio sanitario	8
Baño	20
Lavado de ropas	20
Abreviar ganado	18
Consumo total de agua	89

(**) Basado en NEERI (1982)

4.1.4 Cálculo de la demanda diaria de diseño

La demanda de agua diaria de diseño, cantidad total que el sistema de abastecimiento tiene que proporcionar por día, puede calcularse como el producto entre la población de diseño y la cantidad de agua que se va a suministrar por persona y por día. Si la demanda considerada no incluye pérdidas, este valor debe ser incrementado en un 20% ó 30% aproximadamente.

4.2 COMPONENTES PRINCIPALES Y DIMENSIONES DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Una vez definido el tratamiento requerido y la demanda promedia diaria, se pueden determinar los componentes principales del sistema y sus dimensiones.

En zonas rurales el agua generalmente es captada en la mañana y al atardecer, lo que genera un incremento en la demanda en estos períodos. En este sentido puede ser razonable diseñar el sistema que satisfaga la demanda durante estas horas pico, no obstante se genere un incremento en los costos. Un abastecimiento de agua con insuficiencias en estos períodos, puede generar largas filas, pérdida de tiempo y motivar a los miembros de la comunidad a regresar a las fuentes tradicionales de suministro.

Idealmente el diseño debe asegurar que el sistema de tratamiento y en particular los filtros lentos de arena, operen permanentemente con una capacidad diaria igual a la demanda. En esta Sección se indican las características generales de diseño y los componentes principales. Estos se ilustran en el Capítulo 6.

4.2.1 Captación de agua cruda y bombeo

En los sistemas de abastecimiento de agua por gravedad, la captación de agua cruda está diseñada para funcionar las 24 horas. Por el contrario en sistemas que utilizan bombas, el tiempo de funcionamiento está basado en la tasa de descarga y en el tiempo de operación del equipo.

En la mayoría de los sistemas de abastecimiento en zonas rurales que consideran bombeo, los períodos de funcionamiento oscilan entre 8 y 16 horas por día, según el tamaño de la comunidad, la disponibilidad de mano de obra y energía eléctrica o combustible.

El filtro grueso dinámico es una alternativa de captación recientemente desarrollado en Colombia, que funciona como una primera barrera en el tratamiento del agua, mejorando su calidad y posibilitando un mejor aprovechamiento de las etapas subsiguientes de tratamiento. Puede también considerarse como una barrera de protección de todo el sistema de tratamiento (Galvis y Fernández, 1991).

4.2.2 Tanque de compensación de agua cruda

Cuando el sistema de bombeo no ha sido diseñado para operación continua, un tanque de compensación de agua cruda usualmente es la mejor alternativa. De esta manera se puede asegurar la operación continua de los filtros.

La capacidad del tanque depende del régimen de bombeo, el cual se explica en el Capítulo 6.

4.2.3 Unidad de pretratamiento

Esta unidad preferiblemente debe operar 24 horas al día con flujo a gravedad. En sistemas de bombeo, es aconsejable tratar previamente el agua antes de bombearla, o emplear un tanque de compensación que evite la operación intermitente.

4.2.4 Filtros lentos de arena

Los criterios de diseño para filtros lentos de arena se indican en la Tabla 4.4. A una velocidad de filtración de 0,1 m/h, un filtro que funcione continuamente producirá 2,4 m³ de agua por día por cada m² de superficie de lecho filtrante. Por lo tanto, el área superficial total requerida puede determinarse dividiendo por 2,4 la demanda diaria de diseño. Esta área superficial total debe distribuirse en varias unidades, en vez de una sola. Este número depende de varias consideraciones:

- Se requieren por lo menos dos módulos que permitan la operación segura y continua y así poder realizar su limpieza alternadamente. En plantas mayores, el número de unidades puede aumentarse con un costo adicional bajo, de manera que se garantice mayor flexibilidad de operación y mantenimiento. Una indicación del número adecuado de unidades rectangulares puede obtenerse con la expresión:

$$n = 0,5 \sqrt[3]{A}$$

Donde:

n = número total de unidades rectangulares

A = Área superficial total

- El tamaño máximo del lecho filtrante en áreas rurales es de preferencia inferior a 100 m², pero generalmente está por debajo de los 200 m². Esto posibilita su limpieza en un día.
- Como norma general, el tamaño mínimo del lecho filtrante debe ser de 5 m². Sin embargo, existen experiencias con filtros de áreas superficiales inferiores a 1 m² que son igualmente eficientes, siempre y cuando el agua cruda no fluya directamente por el interior de las paredes del filtro hacia el sistema de drenaje sin ser filtrada, generando de esta manera “corto circuito” o contaminación del agua tratada. Este fenómeno puede ser contrarrestado si las paredes interiores de los módulos de filtración cuentan con superficies rugosas o ásperas.

Los costos de construcción y operación difieren de un país a otro y de sistema a sistema. Ingenieros con experiencia, que sean responsables de los sistemas de abastecimiento, pueden suministrar información aproximada de costos, o un estimativo basado en la cantidad de obra, desagües, obras complementarias y mano de obra requeridos.

4.2.5 Almacenamiento y bombeo de agua tratada

El agua tratada es conducida hasta su respectivo tanque de almacenamiento a partir del cual puede distribuirse directamente o ser bombeada a uno o varios tanques de distribución. Cuando se puede suministrar agua por gravedad, el tanque de almacenamiento debe tener capacidad suficiente que permita compensar las variaciones horarias de la demanda en la red de distribución y almacenar el caudal continuo proveniente de los filtros lentos. En otros casos y acorde con el diseño hidráulico, el agua tratada tendrá que ser bombeada desde el pozo de succión hasta un tanque de almacenamiento central elevado, o a tanques descentralizados de capacidad suficiente

que permitan el suministro continuo a los usuarios, aun en el período en que las bombas no están en operación.

Tabla 4.4 Criterios generales de diseño para filtros lentos de arena que abastecerán zonas rurales.

Criterios de diseño	Valores recomendados
Período de diseño	10 - 15 años
Periodo de operación	24 h/d
Velocidad de filtración	0,1 - 0,2 m/h
Area superficial del filtro	5 - 20 m ² por filtro, mínimo 2 unidades
Altura del lecho filtrante:	
Inicial	0,8 - 0,9 m
Mínima	0,5 - 0,6 m
Especificación de la arena:	
Tamaño efectivo	0,15 - 0,30
Coeficiente de uniformidad	< 5 preferiblemente
Altura de drenaje incluyendo capa de grava	0,3 - 0,5 m
Altura de agua sobrenadante	0,8 - 1,0 m

4.2.6 Sistema de distribución

El sistema de distribución debe estar diseñado para satisfacer la demanda máxima horaria en la comunidad. Un almacenamiento descentralizado dentro del sistema de distribución genera una mejor distribución de flujo y presión y contribuye a reducir costos, ya que permite el uso de tuberías de menor diámetro.

4.3 ESTIMACION DE COSTOS

El último paso en la etapa del diseño consiste en estimar los costos de construcción, operación y mantenimiento, tema que es presentado con mayor detalle en el Capítulo 5. Estas cifras son importantes para la captación de recursos, pero principalmente

permite conocer si la comunidad y el Gobierno Nacional pueden asumir el costo del sistema, tanto de inversión inicial como de operación y mantenimiento.

Aunque los costos de mantenimiento de los filtros lentos de arena son bajos en comparación con los de otros sistemas de tratamiento, los costos totales de mantenimiento del sistema de abastecimiento pueden generar una carga onerosa sobre el presupuesto de las comunidades, especialmente en zonas rurales.

5. Costo de los filtros lentos de arena

5.1 COSTO DE CONSTRUCCION

El costo de construcción de los filtros lentos de arena se determina principalmente en función del costo de los materiales como cemento, arena de construcción, grava, acero para refuerzo, arena para filtros, tuberías y válvulas. El costo de la mano de obra y el terreno es menos importante. En algunos países, por ejemplo en las áreas rurales de la India, el costo del terreno rara vez excede el 1% del costo total de construcción.

La forma y el número de unidades de filtración tendrán muy poca incidencia en el costo por unidad de área del lecho filtrante, pero pueden influir en la longitud total de las paredes y en el costo por longitud de cada unidad, y por tanto afectará al costo total de construcción.

Para una mayor claridad se presenta la siguiente ecuación que permite calcular los costos totales de construcción de un filtro, excluyendo el costo de tuberías y válvulas:

$$C_1 = C_a A + C_l L_w$$

Donde:

C_1 = Costo total de construcción, excluyendo tuberías y válvulas.

C_a = Costos combinados por metro cuadrado de superficie del terreno para el lecho filtrante, sistema de drenaje, grava, arena y excavación.

C_l = Costo por metro lineal de tramo de pared.

A = Area superficial (m^2).

L_w = Longitud total de las paredes (m).

Costo por metro cuadrado del área de lecho filtrante

Una estimación del costo por metro cuadrado del área de lecho filtrante en un país o región específica, puede basarse en el costo de los trabajos de excavación, el concreto, el sistema de drenaje y el material filtrante. (ver Tabla 5.1)

Costo por metro lineal de las paredes

El espesor de la pared y el tipo de material de construcción empleado afectarán el costo por unidad de longitud de las paredes de cada unidad.

Los filtros circulares sólo están sujetos a las fuerzas de tensión, lo que significa que el espesor de la pared, y por lo tanto el costo por unidad de longitud de las paredes, puede ser menor, en particular para los filtros de ferrocemento. Sin embargo, la ventaja de un costo más bajo para las unidades circulares más grandes generalmente es compensada por el diseño más sencillo y la menor cantidad de mano de obra requerida para construir unidades rectangulares.

Tabla 5.1 Estimación del costo promedio por m² del área del lecho filtrante, sistema de drenaje, grava, arena de filtro y excavación, para zonas rurales de la India, 1983.

Items	Profundidad (m)	Costo unitario/m ³	Costo/m ² lecho filtrante (en Rp de la India)*
Trabajo de excavación	2,50	10	25
Cimientos (hormigón)	0,15	330	50
Piso (hormigón reforzado)	0,15	885	135
Arena de filtro (1 m) y grava (3 m)	1,30	200	260
Sistema de drenaje de ladrillos		280	30
Costo total por m ² de lecho filtrante			500

* Tasa de cambio US\$ 1 = Rp 10

En el siguiente ejemplo, usando un filtro de concreto fabricado en la India en 1983, se calculan los costos promedio de construcción por metro lineal de paredes. La pared de este filtro lento de arena tiene una altura de 2,7 m y un espesor de 0,23 m, lo que implica, un volumen por metro lineal de muro de: $0,23 \times 2,7 \times 1 = 0,62 \text{ m}^3$. En 1983, el costo promedio de construcción por m³ de pared de concreto para sistemas de agua en la India era de Rp 1,333 (US\$ 133), incluidos mano de obra y materiales. Por tanto, el costo por metro lineal de las paredes en este ejemplo fue Rp 1,333 multiplicado por 0,62, o sea, un total de Rp 830 (US\$ 83).

Longitud total de las paredes

El tamaño, la forma y el número de unidades de filtración determinarán la longitud total de la pared de la planta de filtración lenta en arena. La longitud total de la pared de una planta con unidades circulares puede calcularse del siguiente modo:

$$L_{wc} = 2 [n \pi A]^{1/2}$$

- L_{wc} = Longitud total de la pared (m)
 n = Número total de unidades de filtración
 A = Area superficial de cada unidad (m²)

Los filtros rectangulares tienen la ventaja de que se pueden construir con paredes comunes si las unidades se sitúan una junto a otra. (Figura 5.1)

La longitud total de la pared de una planta de filtración lenta con unidades rectangulares puede calcularse del siguiente modo:

$$L_{wr} = 2nb + l(n+1)$$

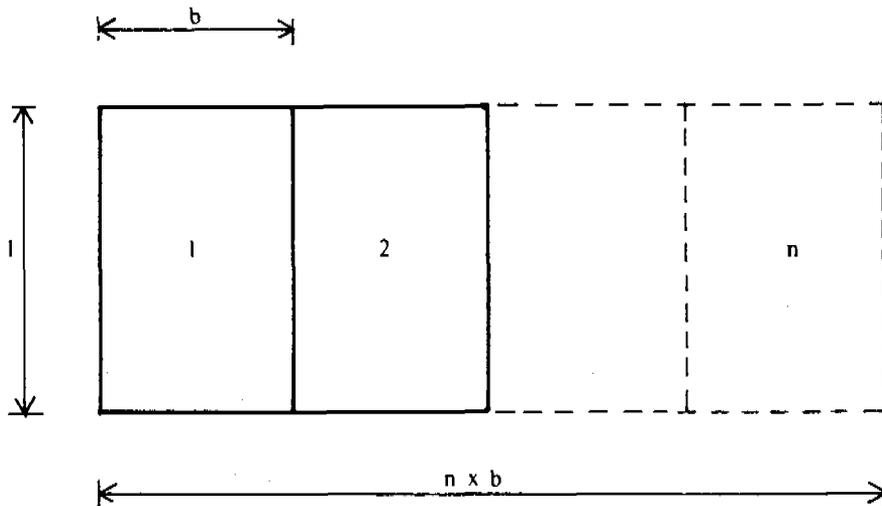


Figura 5.1: Disposición de un filtro lento de arena con (n) unidades rectangulares.

Donde:

- L_{wr} : Longitud total de la pared (m)
- n : Número de unidades
- b : Ancho de la unidad (m)
- l : Longitud de la pared de la unidad (m)

Para una determinada área superficial y cierto número de unidades con paredes comunes, la longitud total de las paredes variará con diferentes combinaciones de (b) y (l) y adquiere su más mínima expresión cuando:

$$l = \sqrt{\frac{2A}{n+1}} \quad \text{y} \quad b = \frac{(n+1)l}{2n}$$

Donde:

- l = Longitud pared de la unidad (m)
- A = Área superficial total (m^2)
- n = Número de unidades
- b = Ancho de la unidad (m)

Con este valor de (b), la ecuación para determinar la longitud mínima de la pared para el caso de filtros rectangulares es:

$$\begin{aligned} L_{wm} &= 2l(n+1) \\ &= 2[2A(n+1)]^{1/2} \end{aligned}$$

Donde:

- L_{wm} = Longitud total mínima de la pared (m)
- l = Longitud de la pared de la unidad (m)
- n = Número de unidades
- A = Área superficial total (m^2)

Las dimensiones y la longitud total de la pared de filtros circulares y rectangulares se comparan en la Tabla 5.2. Para las áreas de filtro más pequeñas, los filtros circulares (Figura 5.2) parecen tener cierta ventaja, porque aunque la longitud total de la pared es algo más grande, esto se compensa con paredes más delgadas. Las unidades rectangulares parecen ser muy apropiadas para las áreas de filtro más grandes, mayores de 100 m^2 , divididas entre un número mayor de unidades.

Tabla 5.2 Filtros lentos de arena y longitud total de la pared para diversas capacidades de diseño con una velocidad de filtración de 0,1 m/h

Area superficial (m ²)	Filtros Circulares			Filtros Rectangulares		
	Diámetro (m)	No. de unidades	Longitud Total de las paredes (m)	Ancho por unidad de	No. de unidades	Longitud Total de las paredes (m)
24	3,9	2	24,5	3,0 x 4,0	2	24,0
50	5,7	2	35,4	4,3 x 5,8	2	34,6
100	8,0	2	50,1	6,1 x 8,2	2	49,0
100	6,5	3	61,3	4,7 x 7,1	3	56,0
200	9,3	3	86,8	6,7 x 10,0	3	80,0
500	14,6	3	137,3	10,6 x 15,8	3	126,8
500	11,2	4	158,5	8,8 x 14,1	4	141,0

Costo mínimo de los filtros

El costo de una planta de filtración lenta en arena depende del número de unidades.

Un número mayor de unidades requerirá una pared mayor para la misma área superficial total.

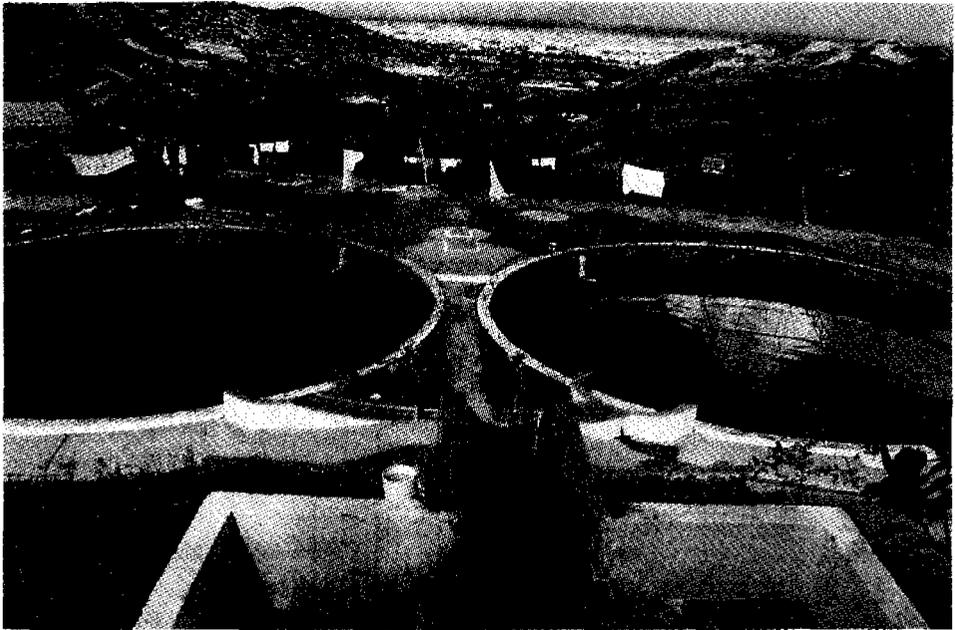


Figura 5.2: Filtro circular en mampostería de ladrillo, Cali, Colombia, 1990.

Al calcular el costo de los filtros rectangulares, no sólo importa el número de unidades, sino también su disposición, porque pueden tener paredes comunes (Figura 5.3). El costo total de los filtros rectangulares para el tramo de pared más corto puede calcularse del siguiente modo:

$$C_{tr} = C_a + 2C_l[2A(n+1)]^{1/2}$$

C_{tr} = Costo total de los filtros rectangulares para la longitud de pared más corta, excluyendo accesorios y el terreno.

C_a = Costos combinados por metro cuadrado de área de piso para el lecho filtrante, sistema de drenaje, grava, arena y excavación.

C_l = Costo de las paredes por metro lineal de tramo de pared.

A = Área superficial total (m²)

n = Número de unidades

El costo total de los filtros circulares puede calcularse del siguiente modo:

$$C_{tc} = C_a + 2C_l [n \pi A]^{1/2}$$

C_{tc} = Costo total de los filtros circulares, excluyendo accesorios y el terreno.

C_a = Costo combinado por m² de área de piso para el lecho filtrante, sistema de drenaje, grava, arena y excavaciones.

C_l = Costo de la pared por metro lineal.

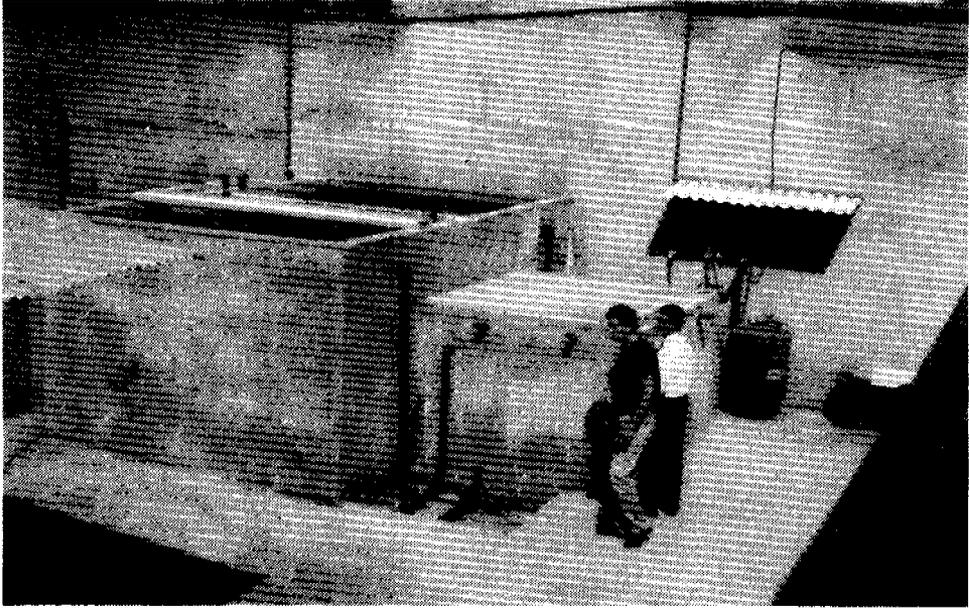
A = Área superficial total (m²)

n = Número de unidades

El costo por unidad del área de lecho filtrante (C_a) y por unidad de longitud de pared (C_l) depende de las condiciones locales, del precio de los materiales de construcción y del costo de la mano de obra. Con base en los valores estimados de (C_a) y (C_l) para las áreas rurales de la India en 1983, o sea, Rp 500 y Rp 830, respectivamente (ver Tabla 5.1), se han estimado los costos por metro cuadrado de filtros lentos de arena rectangulares con diversas capacidades y número de unidades (ver Tabla 5.3). Para obtener una estimación del costo total de construcción, deberá añadirse cerca del 15 - 20% a estas cifras para tener en cuenta tuberías, válvulas, accesorios y el terreno.

Modelo de Costos

En el marco del Proyecto Integrado de Investigación y Demostración en filtración lenta en arena ejecutado por CINARA en Colombia con el apoyo del IRC, se estudió



Filtro 5.3: Filtro lento de arena, Santa Rosa, Colombia.

un modelo de costos de inversión en la construcción de sistemas de tratamiento con filtración lenta en arena. El modelo general se planteó de la siguiente manera:

$$C = aQ^b \text{ ó } \ln(C) = \ln(a) + b \ln(Q)$$

Tabla 5.3 Costos estimados por m² de filtros lentos de arena rectangulares en áreas rurales de la India, 1983.

Area total de filtración (m ²)	Capacidad* (m ³ /h)	Costo por m ² con base en el número de unidades de filtración (Rp x 1.000)**			
		2	3	4	5
50	5	1,07	1,16	1,24	1,31
100	10	0,91	0,97	1,02	1,07
200	20	0,79	0,83	0,87	0,91
300	30	0,73	0,77	0,80	0,83
500	50	0,68	0,71	0,73	0,76
1 000	100	0,63	0,65	0,67	0,68

* Velocidad de filtración 0,1 m/h

** Tasa de cambio US\$ 1 = Rp 10

Donde:

C = Costos de construcción

Q = Capacidad de la planta. Esta capacidad puede considerarse en términos de caudal o de área superficial de filtración.

a,b = Coeficientes que deben ser precisados para cada región en particular.

ln = Logaritmo natural.

Un estudio realizado para la zona de ladera del Valle del Cauca en Colombia, en 1987, en el cual se consideraron diferentes formas (circular, rectangular y de pirámide truncada), materiales (concreto ciclópeo, mampostería), caudales entre 2 y 30 l/s y velocidad de filtración de 0,15 m/h, produjo los siguientes resultados:

Para Q entre 2 y 6 l/s o A entre 48 y 144 m².

$$C = 0,5226 A^{0,7509}$$

$$C = 5,6803 Q^{0,7509}$$

Para Q entre 6 y 30 l/s o A entre 144 y 720 m².

$$C = 0,2801 A^{0,8533}$$

$$C = 4,2166 Q^{0,8533}$$

Donde:

C = Costo de inversión inicial en la construcción, miles de US\$.

A = Area de filtración, en m².

Q = Caudal, en l/s.

Los valores promedios de costos que sirvieron de base para la formulación de estos modelos se indican en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Costo total de construcción de filtros lentos de arena. Valores seleccionados para la formulación del modelo de costos. Valle del Cauca. Septiembre de 1987.

Area de filtración (m ²)	Caudal considerado		No. de módulos	Costo Total	
	(l/s)	(m ³ /d)		Miles de Col \$	Miles de US\$
48	2	172,8	2	2 579	10,36
144	6	518,4	2	4 803	19,29
288	12	1 036,8	3	8 716	35,00
432	18	1 555,2	4	12 815	51,47
576	24	2 073,6	4	15 730	63,17
720	30	2 592,0	4	18 777	75,41

US\$ 1 = Col. \$ 249,00

Economía de Escala

Los estimativos de costos presentados en la Tabla 5.3 demuestran que se obtiene poca economía de escala en la construcción de los filtros lentos de arena, lo que significa que no es muy ventajoso construir plantas para un período de diseño largo.

Por ejemplo, suponiendo que una comunidad rural en la India tuviese una demanda, según diseño, de 30 m³/h (tres unidades) costaría:

$$300 \times 0,77 \times 1\ 000 = \text{Rp } 231\ 000$$

La construcción de una planta para 20 m³/h (dos unidades) y una unidad adicional de 10 m³/h después de diez años, requeriría una inversión inicial de:

$$200 \times 0,79 \times 1\ 000 = \text{Rp } 158\ 000$$

Suponiendo que el valor actual de la unidad adicional, que tendrá que construirse de aquí a diez años, es de Rp 91.000, el costo total podría ser aproximadamente

$$158\ 000 + 91\ 000 = \text{Rp } 249\ 000$$

Por lo tanto un período de diseño de 10 a 15 años es adecuado y mantendrá baja la inversión inicial. La selección de un período de diez años, más la opción de construir una ampliación posteriormente, tiene la ventaja adicional de que la estimación de la demanda futura de agua será menos crítica. Sin embargo, será necesario prever ampliaciones futuras.

El modelo de costos elaborado en estudios ejecutado por CINARA en Colombia confirma lo anteriormente expuesto. El valor del exponente, cercano a 1.0, es indicativo de la baja economía de escala de este tipo de tecnología.

Número de Compartimientos

Las estimaciones de costos calculados en la Tabla 5.3 también demuestran que un aumento en el número de unidades para la misma área aumenta muy poco el costo.

La división de un área total del filtro de 50 m² entre dos unidades sería 8% más barato que dividirla entre tres unidades, y 16% más barato que entre cuatro, mientras que para un área total del filtro de 500 m², las cifras serían 3,5% y 7% más barato, respectivamente. Considerando que el aumento requerido en la velocidad de filtración cuando se limpia una unidad es 100% por dos unidades, 50% por tres y 33% por cuatro,

entonces el gasto en un número mayor de unidades sobre la misma área de filtración bien puede considerarse aceptable.

Altura de las Unidades de Filtración

La Figura 5.4 muestra el efecto de la altura en los costos de construcción de las unidades de filtración lenta en arena con diferente capacidad y diferente número de compartimientos. Esta gráfica se construyó con información obtenida en el proyecto sobre filtración lenta ejecutado en Colombia por CINARA. Estos resultados muestran la importancia de las reducciones efectuadas en este parámetro, de alturas superiores a 2,7 m hasta alturas de 2,15 m.

5.2 COSTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO

El costo de operación de un filtro lento de arena depende de los costos de la mano de obra, y de la energía eléctrica si se requiere bombeo, pero no se pueden dar cifras

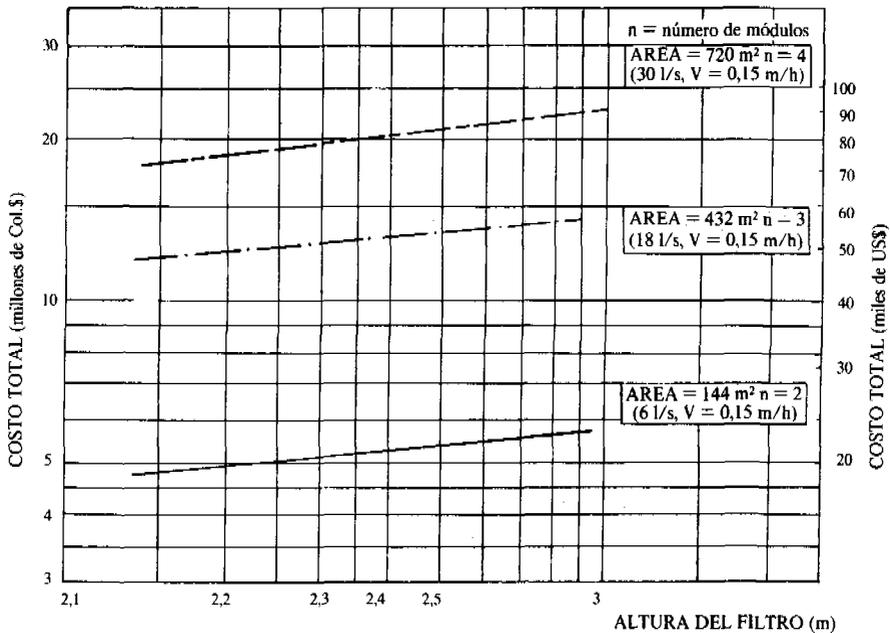


Figura 5.4: Efecto de la altura en los costos de construcción de filtros lentos de arena. Valle del Cauca, Colombia, 1987.

generales debido a la variación en las situaciones locales. Por ejemplo, los sistemas pequeños de suministro de agua por gravedad requieren menor asistencia, y en ocasiones no necesitan un encargado en áreas remotas. Requieren más mano de obra únicamente cuando hay que limpiar el filtro. En contraste, las plantas grandes con sistemas de bombeo necesitan la asistencia continua de un operador y/o de vigilantes.

Cuando las bombas funcionan 24 horas al día y el trabajo está dividido en tres turnos, se necesitan, por consiguiente, tres operadores y posiblemente tres vigilantes.

También pueden hacer falta más obreros para limpiar los filtros cuando se obstruyen.

Los costos de mantenimiento incluirán reparaciones menores a los filtros, y el reemplazo de la arena lavada en los raspados.

Aunque el material raspado en el proceso de limpieza se puede lavar, almacenar y volver a usar, cerca del 20% de la arena se pierde junto con el sedimento durante el raspado. Otros costos de mantenimiento se relacionan con el reemplazo de las pocas partes móviles del filtro, aunque estos costos también serán mayores en los sistemas con bombeo.

En cuatro sistemas con pretratamiento y filtros lentos de arena, evaluados en el Valle del Cauca, Colombia, los costos de operación y mantenimiento no sobrepasaron los valores US\$0,75 mensuales por familia servida.

5.3 COMPARACION DE COSTOS ENTRE LA FILTRACION LENTA EN ARENA Y LA FILTRACION RAPIDA

Durante 1983, en la India se hizo una comparación de los costos de los sistemas de filtración lenta y rápida en arena. Se demostró que el costo de inversión económica de los sistemas de filtración lenta en arena era menor que el de los sistemas de filtración rápida en arena, hasta una capacidad de 3 000 m³/día. Cuando se consideraron los costos de operación y mantenimiento, el punto de equilibrio fue de 8 000 m³/día. Además, el costo de construcción de una planta de filtración lenta en arena en Colombia, con una capacidad de 1 500 m³ día (población del diseño 15 000 y un costo de US\$ 35 000) fue comparado con el de una planta de filtración rápida en arena. El costo de los filtros rápidos de arena fue aproximadamente el doble que el de los filtros lentos de arena, simplemente porque se utilizó equipo importado.

Por lo tanto, los sistemas de filtración lenta en arena a menudo resultan más económicos para las comunidades de muchos países en desarrollo donde se necesita un abastecimiento de agua confiable.

6. *Ejemplo de planeación y diseño de un sistema de filtración lenta en arena*

6.1 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Esta sección trata un ejemplo del procedimiento que se debe seguir en la planeación y diseño de un sistema de filtración lenta para una comunidad de 1 200 habitantes. La comunidad, que se abastece de agua captada de una fuente superficial sin tratamiento, ha solicitado a las autoridades sanitarias su propio sistema de potabilización de agua, dada la distancia de la población a la fuente, y al conocimiento de la proliferación de enfermedades de origen hídrico por el consumo de agua sin tratar.

Dentro de la fase de planeación del proyecto, un equipo de trabajo interdisciplinario realiza un diagnóstico participativo en la localidad, orientado a determinar la viabilidad técnica y social del sistema de abastecimiento, posibilidades económicas y condiciones sanitarias existentes. También se recopila información complementaria: demografía, causas de morbimortalidad, usos del agua, identificación de fuentes de abastecimiento, variación de la calidad y cantidad de agua en épocas de verano e invierno, disponibilidad de materiales para construcción, especialmente arena para medios filtrantes, nivel de servicio esperado en la comunidad, identificación de formas organizativas y comunicativas e identificación de líderes en la comunidad y motivación hacia el proyecto.

Una vez realizado el diagnóstico, se identifica la viabilidad técnica y social del nuevo sistema de abastecimiento y la motivación y participación de la comunidad en las fases subsiguientes. Sin embargo, observaciones personales y discusiones con promotores de salud, indican que no todas las enfermedades intestinales se deben únicamente al consumo de agua sin tratamiento sino que además son el resultado de condiciones higiénicas pobres, uso limitado de letrinas y mal manejo de alimentos.

Ante esta situación, el equipo de trabajo sugiere implantar un programa de educación en higiene, simultáneamente con el desarrollo del nuevo sistema de abastecimiento.

La educación en salud debe efectuarse paralelamente con los desarrollos técnicos a fin de lograr el máximo impacto en la salud de la comunidad, no obstante, en este Capítulo, solamente se examinan aspectos técnicos que intervienen en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua.

6.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para el proceso de diseño, se han identificado varios pasos. En este Capítulo se presentan los 17 pasos identificados.

Las hipótesis planteadas en cada uno de ellos, se basan en consideraciones generales de diseño sustentadas en los Capítulos 4 y 5. Las cifras y datos empleados se obtuvieron a partir del estudio de viabilidad mencionado en la Sección 6.1; de igual manera, el procedimiento indicado sirve principalmente como ilustración, pero también indica el tipo de información requerida para la preparación de un diseño adecuado. Sin embargo, esta Sección no considera un proceso integral de cómo introducir el sistema de abastecimiento de agua en la comunidad; información sobre este aspecto puede ser consultada en el Capítulo 2.

Paso 1: Selección del período de diseño

Al definir el período de diseño, se consideran factores relativos a la vida útil de las instalaciones, factibilidad de construcción y posibilidad de ampliación, tendencias de crecimiento poblacional, posibilidades de financiamiento y fundamentalmente el efecto de la economía de escala en la tecnología de filtración lenta (Capítulo 5). Para el ejemplo, este parámetro ha sido fijado en 15 años. Esto significa que una vez concluido el período de planeación y construcción, (estimado en 2 ó 3 años), la capacidad de la planta, debe funcionar adecuadamente para 12 ó 13 años, como mínimo.

Paso 2: Estimación de la población de diseño

A partir de información recopilada en las instituciones del sector y en la localidad misma, se estima que la tasa de crecimiento anual sea de 3%. En este sentido, es probable que la población actual (1 200 habitantes) aumente con un factor de 1,56 en 15 años (ver Tabla 4.1), o sea, 1 872 personas. En consecuencia, la población de diseño ser de 1 900 habitantes.

Paso 3: Cálculo de la demanda promedio diaria de diseño

Aspectos técnicos, socio económicos, culturales e infraestructura existente en saneamiento, permiten identificar el nivel de servicio por proyectar. La consulta con la comunidad permite conocer el nivel de servicio deseado. Para el ejemplo, se ha seleccionado y concertado un sistema de distribución con pilas públicas, cuyo con-

sumo se ha estimado en 50 litros per capita por día y se calcula que la demanda para efectos de diseño debe ser de 60 litros, incluyendo pérdidas y desperdicios (estimados en 20%). La demanda promedio diaria ser entonces:

$$1\ 900 \times 60 = 114\ 000 \text{ l/d} = 114 \text{ m}^3/\text{d} (4,75 \text{ m}^3/\text{h}).$$

Paso 4: Estimación de la demanda máxima horaria

Al no disponer de registros propios en la localidad, respecto a demanda de agua, se ha investigado el comportamiento diario del consumo en otra comunidad vecina con características similares, que posee un sistema de abastecimiento por tubería (Figura 6.1). El consumo total de agua en esta comunidad es $76 \text{ m}^3/\text{d}$ ($3,17 \text{ m}^3/\text{h}$) y el consumo máximo horario $15,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Por lo tanto, el factor de demanda máxima horaria (razón entre el consumo máximo y el promedio) es $15,0/3,17 = 4,7$.

Dado que las condiciones de demanda en las dos localidades son similares, el factor calculado anteriormente se emplea como base para estimar la demanda máxima horaria del nuevo sistema de abastecimiento. Esta cifra se requiere para diseñar el tanque de almacenamiento y el sistema de distribución de agua tratada. La demanda promedio por hora para el nuevo sistema será, por tanto, $114/24 = 4,75 \text{ m}^3/\text{h}$ y la demanda máxima horaria $4,7 \times 4,75 = 22,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

En situaciones en las cuales se desconoce el comportamiento diario del consumo, se debe estimar el factor de demanda máxima y aunque el valor de casi 5 mostrado en el ejemplo parece ser elevado, no es irreal en sistemas de abastecimiento de agua en comunidades rurales agrícolas. Sin embargo, en otras comunidades donde se desarrollen otras actividades diarias, es probable que el agua se distribuya de manera más uniforme a lo largo del día, y por consiguiente el factor de demanda máxima horaria ser menor.

Paso 5: Selección de la fuente de agua cruda

Diferentes alternativas de suministro pueden ser consideradas, una de ellas la constituye el agua subterránea, cuya viabilidad técnica, económica y social debe ser determinada. No obstante, independientemente de la alternativa de abastecimiento que se seleccione, ésta debe de garantizar la cantidad demandada por la comunidad.

En algunas circunstancias una combinación de alternativas puede ser la solución viable.

El desarrollo de este ejemplo, considera el aprovechamiento de la fuente superficial que representa las mejores características desde el punto de vista técnico-económico y

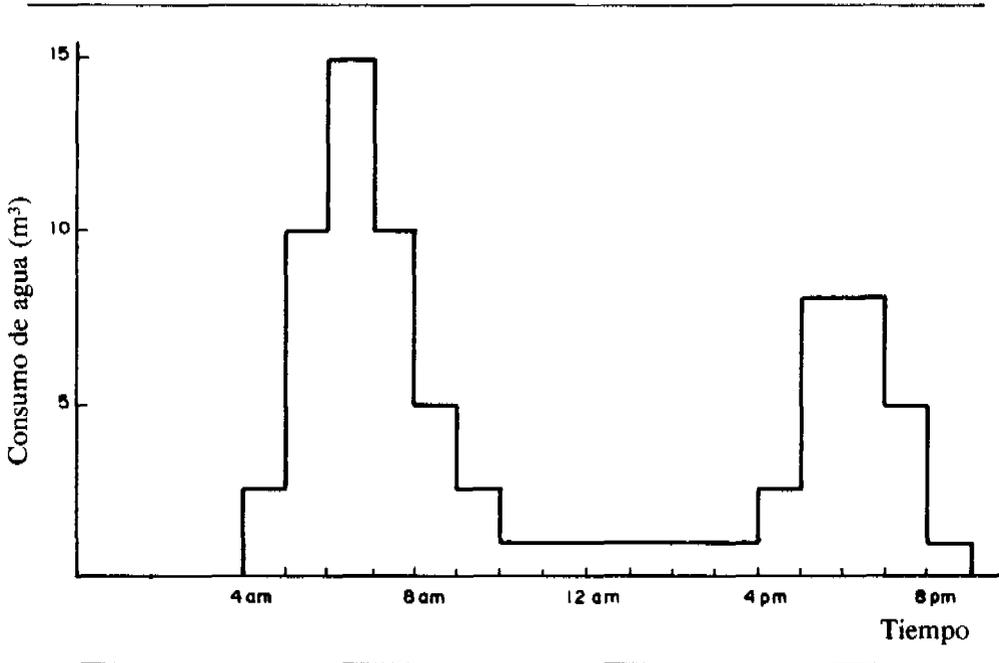


Figura 6.1: Curva de demanda diaria en una comunidad vecina.

aunque no se dispone de información hidrológica, se estima que el caudal mínimo durante el período de estiaje no es inferior a 140 l/seg. Teniendo en cuenta que el caudal por captar es de 114 m³/día (1,3 l/seg) y que representa un valor inferior al 1% del flujo mínimo de la fuente, se considera ésta como la alternativa viable ya que no presenta mayores problemas ambientales.

Paso 6: Selección del sistema de tratamiento

Información obtenida por los ejecutores del proyecto en trabajo con la comunidad, indica que la mayoría de los parámetros de calidad de agua cruda están dentro de los límites permisibles para consumo humano, exceptuando la turbiedad (5 y 100 UNT) y los bacteriológicos (coliformes fecales 100 y 1 000/100 ml). Algunas muestras puntuales tomadas en el sitio propuesto de captación en épocas de verano e invierno confirman tal información. Además, se realizó una inspección sanitaria con participación de autoridades del sector de agua potable y saneamiento en la región y de miembros de la comunidad que ha confirmado los riesgos potenciales debidos a la contaminación del agua cruda.

Tomando como referencia los lineamientos presentados en la Sección 2.5, en este ejemplo, se decide tratar el agua a través de sedimentación simple, seguida de filtración lenta en arena (Figura 6.2). Este tratamiento permitirá reducir la turbiedad a valores generalmente inferiores a 1 UNT y obtener niveles aceptables de bajo riesgo sanitario en parámetros microbiológicos para agua potable. Sin embargo, debe recordarse que el caso que se está analizando es sólo un ejemplo, pero que últimos resultados obtenidos en los proyectos colombianos, usando otros sistemas de pretratamiento, indican que en la mayoría de los casos estos presentan mejores alternativas que la sedimentación simple, por lo cual estas otras alternativas de pretratamiento también deben ser estudiadas. (ver Apéndice II).

Paso 7: Localización de la captación de agua cruda

La identificación de fuentes y de zonas específicas con bajo riesgo sanitario con calidad y cantidad de agua adecuada a través del tiempo, y sitios donde la vulnerabilidad a deslizamientos, erosión y desbordamientos en épocas de invierno sea mínimas, son factores que permiten definir la mejor localización para las obras de captación. Aspectos particulares relativos a geotécnia y topografía del lugar de captación, gradientes hidráulicos disponibles, distancia a la localidad, aspectos culturales en la comunidad (mitos, creencias, leyendas, costumbres, etc), conflictos por servidumbres, conexiones clandestinas en conducción y disponibilidad de energía eléctrica, se constituyen también en elementos para la planeación y toma dedecisiones, sobre la localización de la captación.

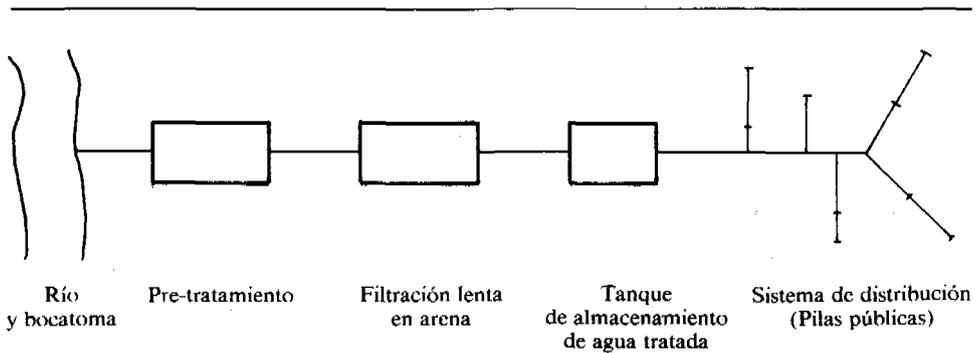


Figura 6.2: Componentes de un sistema de abastecimiento de agua.

Paso 8: Ubicación de la planta de tratamiento

Los siguientes factores influyen en la ubicación:

- Localización de la captación;
- Disponibilidad de área apropiada y legalización del predio;
- Topografía del sitio;
- Características geomecánicas del sitio seleccionado;
- Nivel de aguas freáticas;
- Riesgo de inundación y deslizamiento;
- Accesibilidad;
- Localización del almacenamiento de agua tratada, longitud de la conducción, red de distribución y garantía de presiones mínimas.

La estabilidad y capacidad portante del suelo determinan el tipo de cimentación a proyectar. En este sentido, deben evitarse pilotes y espolones en las fundaciones. El Apéndice IV, indica métodos sencillos para estudio de suelos.

Los niveles freáticos altos indican la necesidad de drenajes adecuados durante la excavación y construcción, lo que aumenta la complejidad y costo del proyecto; los efectos de subpresión deben ser considerados en esta situación. De igual manera deben tomarse medidas tendientes a evitar la contaminación del agua tratada por efecto de infiltración de aguas subterráneas (ver Capítulo 7).

En el ejemplo en consideración, se trata de identificar un lugar apropiado para la planta de tratamiento, cerca de la captación de tal manera que el fontanero pueda operar la planta y realizar un mantenimiento al sitio de toma sin viajar largas distancias. Esta situación es deseable, pero no es viable en muchas situaciones.

Paso 9: Operación general del sistema de tratamiento

La filtración lenta en arena es una tecnología que debe ser operada las 24 horas del día, dadas las características biológicas en que se fundamenta su proceso. Tratando de garantizar esta condición y dar mayor confiabilidad al proceso, se evita al máximo proyectar sistemas de bombeo y se da prioridad al abastecimiento por gravedad de la planta de tratamiento. No obstante generar un aumento en la longitud de conducción de agua cruda, en ciertas circunstancias un estudio detallado de alternativas puede determinar el potencial de un suministro total por gravedad, o al menos una alimentación parcial del sistema.

El planteamiento general presentado en este ítem, no elimina la alternativa de un abastecimiento por bombeo entre captación y planta de tratamiento, simplemente sugiere el estudio de otras posibilidades, idealmente a gravedad, o en su defecto, tomar los factores de seguridad correspondientes, de tal manera que se garantice flujo

continuo a las unidades de tratamiento. Un caso particular lo constituye este ejemplo, que ha sido desarrollado de tal manera, que el tanque de sedimentación de agua cruda es abastecido por gravedad desde la captación y posteriormente se bombea agua cruda sedimentada hasta un tanque de almacenamiento localizado en una cota superior a la planta de tratamiento; de esta manera y con flujo a gravedad se suministrará el caudal de diseño garantizando la operación continua de los filtros.

Paso 10: Dimensionamiento del tanque de sedimentación

Un gran tanque de sedimentación es proyectado en una zona próxima al sitio de captación, acorde con los criterios de diseño que se indican en el Apéndice II. Se adopta un tiempo de detención de 2 meses, una profundidad total de 8 m y se asumen 2 m para acumulación de lodo; se genera una altura efectiva de 6 m que requieren un área total aproximada a 1 150 m².

Paso 11: Cálculo de la capacidad de la bomba de agua cruda

La construcción de un tanque elevado o tanque de compensación para almacenamiento de agua cruda aumenta la flexibilidad del sistema, especialmente al considerar las consecuencias de los cortes temporales de energía eléctrica y la opción de poder disminuir las necesidades de personal. Adicionalmente su construcción puede ser efectiva en función de los costos, cuando no se puede garantizar un bombeo continuo y por el contrario, esta situación obliga a aumentar el área del lecho filtrante o a trabajar el sistema de filtración a velocidad declinante.

El tamaño del tanque se determina en función del número de horas de operación y de la capacidad de las bombas; en este caso, se supone que el operador trabajará 8 horas al día y el bombeo de agua cruda se efectuará en dos turnos, de 6:00 AM a 10:00 AM y de 4:00 PM a 8:00 PM. Las condiciones locales pueden hacer necesario otro horario de operación.

En general, las bombas operarán 8 horas al día para bombear 114 m³/d, debiendo tener una capacidad de $114/8 = 14,25$ m³/h (4 l/s).

Paso 12: Determinación del volumen del tanque de compensación de agua cruda

En el supuesto de que el tanque elevado de compensación de agua cruda esté vacío a las 6:00 AM y su variación diaria, esté dada por la Figura 6.3, el volumen requerido será de 47,5 m³. Presentando alternativas confiables y económicas, se construirá un

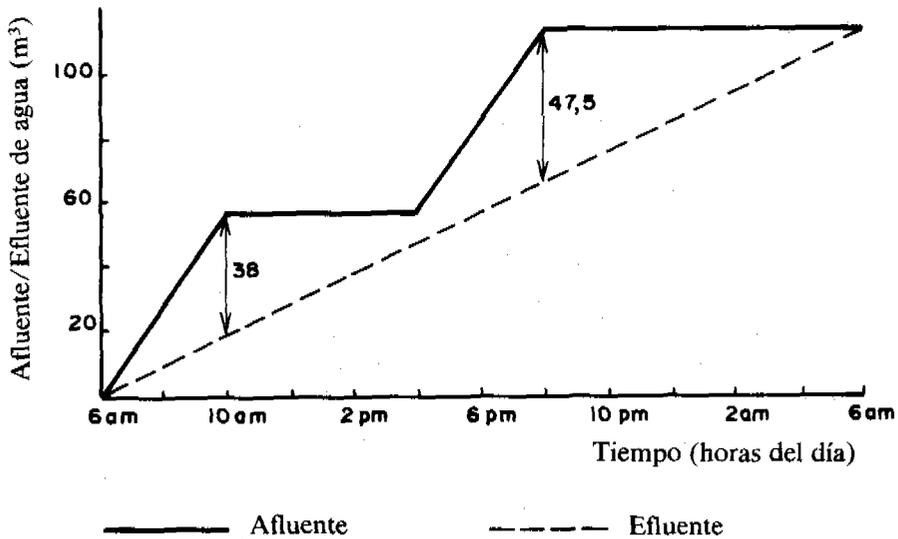


Figura 6.3: Volúmenes de acumulados de afluente y efluente en un tanque de compensación elevado en un período de 24 horas.

tanque sencillo de 25 m², 2,5 m de profundidad y taludes revestidos con una membrana de polietileno.

Otras alternativas constructivas, con base en los materiales existentes en la zona y características propias del terreno pueden ser consideradas: mampostería estructural, ferrocemento, concreto ciclópeo, suelo-cemento, entre otros.

Paso 13: Dimensionamiento de los filtros lentos

Tratando de disminuir problemas de colmatación rápida y por consiguiente carreras cortas en los filtros lentos generados por picos en la turbiedad del agua cruda, se selecciona una velocidad de filtración de 0,1 m/h. Ante un suministro continuo de agua cruda, el área del lecho filtrante se calcula dividiendo la demanda promedio de agua por hora entre la velocidad de filtración seleccionada, o sea, $4,75/0,1 = 47,5 \text{ m}^2$ (Aproximadamente 48 m²).

El tamaño apropiado para cada unidad de filtración, se determina mediante una combinación de factores constructivos y operativos. En este caso, una solución satisfactoria puede ser proyectar dos unidades, cada una con un área neta de 24 m² y reservando una zona adicional para una futura ampliación de la planta. Durante la

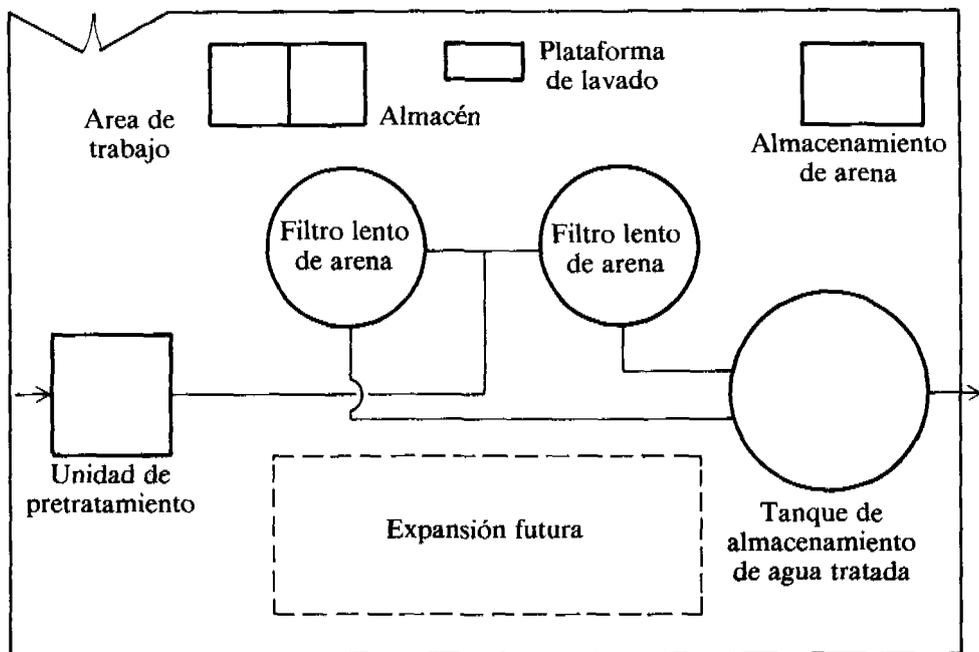


Figura 6.5: Posible disposición de una planta de tratamiento de agua.

de distribución; si estas cifras no están disponibles, será necesario calcular detalladamente cantidades de obra y mano de obra para la construcción, la operación y el mantenimiento. La información resultante puede ser utilizada en discusiones con la comunidad, las autoridades del sector y en la captación de recursos para la financiación del proyecto.

6.3 RESUMEN DEL EJEMPLO DE DISEÑO

El ejemplo presentado en este capítulo puede resumirse así:

Período de diseño:	15 años
Población actual:	1 200 habitantes
Población futura:	1 900 habitantes
Dotación per capita:	50 l/p/d
Pérdidas de agua:	20%
Demanda diaria de diseño:	114 m ³ /d (4,75 m ³ /h)
Demanda horaria:	22,3 m ³ /h
Fuente de agua cruda:	Río
Tratamiento:	Sedimentación Filtración lenta en arena
Tanque de sedimentación:	
— Area superficial	1 150 m ²
— Profundidad	8 m
Capacidad de las bombas	4 l/s
Tanque de compensación:	
— Area superficial	25 m ²
— Profundidad	2,5 m
Filtro lento de arena:	
— Número de unidades	2
— Area superficial	24 m ²
— Velocidad de filtración	0,1 m/h
Tanque de agua tratada:	
— Area superficial	30 m ²
— Profundidad	2,5 m

7. Consideraciones para el cálculo estructural y de diseño de los componentes principales

Como una fase intermedia entre el desarrollo hidráulico del proyecto y su implementación son considerados los aspectos estructurales que permiten el dimensionamiento y especificación de elementos comprometidos en la estabilidad y estanqueidad de las obras civiles. Se recomienda por lo tanto, tener en cuenta la importancia de realizar secuencialmente las siguientes actividades:

- Entendimiento de los aspectos hidráulicos del sistema (niveles, flujos, exigencias de estanqueidad, rugosidades...);
- Condiciones locales y particulares del proyecto; aspectos topográficos, geotécnicos, flujos de aguas superficiales y subterráneas, tipo de materiales existentes, mano de obra calificada, equipo disponible, accesibilidad al sitio de la obra;
- Tipo de estructura que se va a usar: hormigón armado, hormigón simple, mampostería, ferrocemento, suelo estabilizado y protegido, taludes recubiertos, otros.

En el Apéndice IV aparece información sobre la investigación del suelo; los criterios generales para el diseño de las unidades de pretratamiento aparecen en el Apéndice II y la información sobre el diseño del equipo de cloración y el almacenamiento adecuado de los componentes de cloro se muestra en el Apéndice III.

7.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL FILTRO

Para soportar los lechos de arena de los filtros lentos se proyecta una estructura rígida que se construirá de hormigón reforzado, hormigón simple, mampostería, ladrillos o ferrocemento, o una estructura excavada con taludes recubiertos. Los filtros con paredes verticales pueden tener forma circular o rectangular, pero los que tienen paredes inclinadas y protegidas generalmente son rectangulares.

Filtros circulares

Los filtros circulares pueden emplearse con ventaja en plantas pequeñas y pueden construirse de mampostería (piedra natural, de cantera o ladrillos), ferrocemento u hormigón reforzado. El último material tiene la desventaja de requerir encofrados de mayor costo. Los filtros circulares tienen ventajas estructurales obvias, como esfuerzos de tensión uniformes y momentos despreciables en la pared, lo que da por resultado economía en los materiales (Figura 7.1).

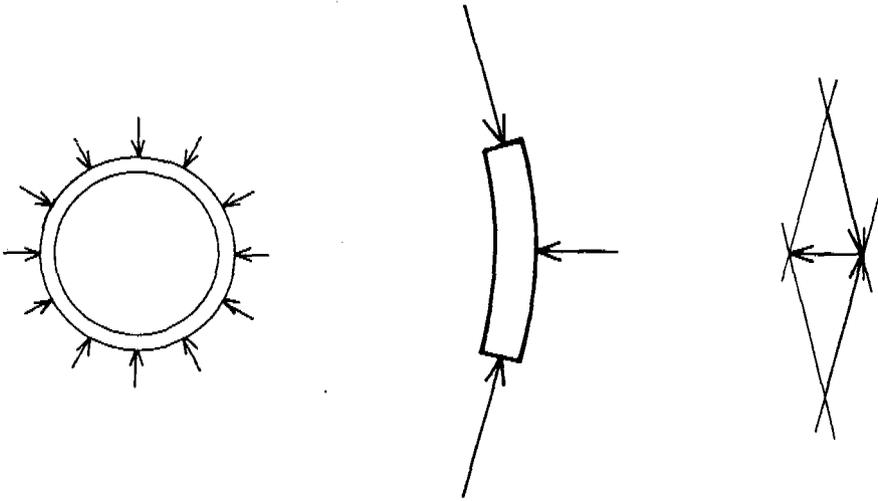


Figura 7.1: Principio de los esfuerzos universales de compresión y tensión.

En los filtros construidos en su mayor parte debajo del nivel del terreno, la presión resultante del suelo produce fuerzas de compresión sobre las paredes del filtro. En filtros construidos sobre el terreno, la presión de la arena y del agua producirá fuerzas de tensión en las paredes del filtro, por lo que es preferible usar ferrocemento, hormigón reforzado o una combinación de mampostería y ferrocemento (Figuras 7.2 y 7.3).

Los filtros circulares de ferrocemento pueden construirse por encima o por debajo del nivel del suelo, dependiendo del nivel de las aguas subterráneas. Tanques hasta de 5 m de diámetro son comunes, pero también hay experiencias de 10 m de diámetro.

Los esfuerzos de tensión en el ferrocemento se distribuyen de manera uniforme a través de una red de barras de acero dispuestas con muy poca separación entre una y otra (10 - 15 cm), de 4 - 5 mm de diámetro, y una capa de malla de gallinero a cada lado de la red (Figura 7.3). Se recomienda espesores de pared entre 5 - 8 cm, especialmente si sólo existen esfuerzos de tensión, como en estructuras circulares.

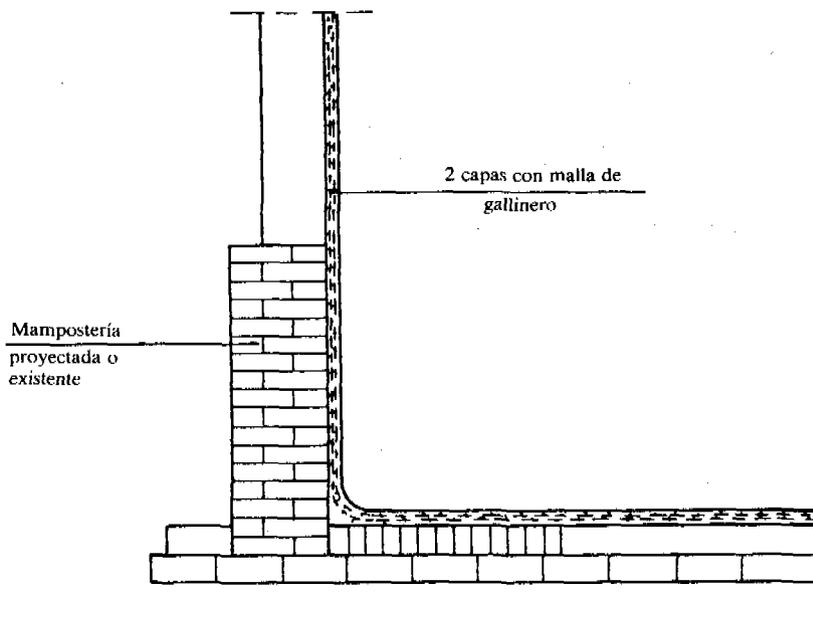


Figura 7.2: Sección transversal de la pared de un filtro construida de mampostería y ferrocemento.

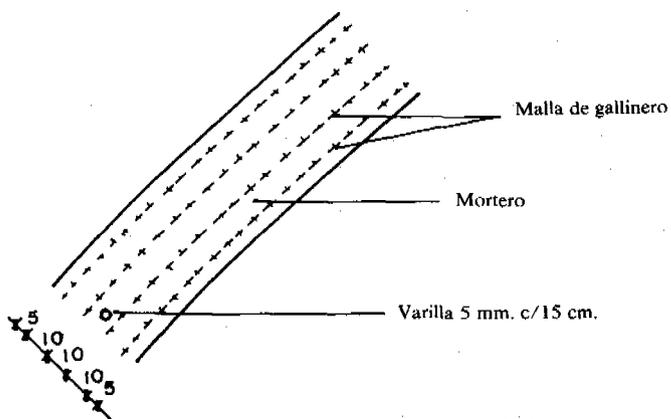


Figura 7.3: Sección transversal de la pared de un tanque de ferrocemento.

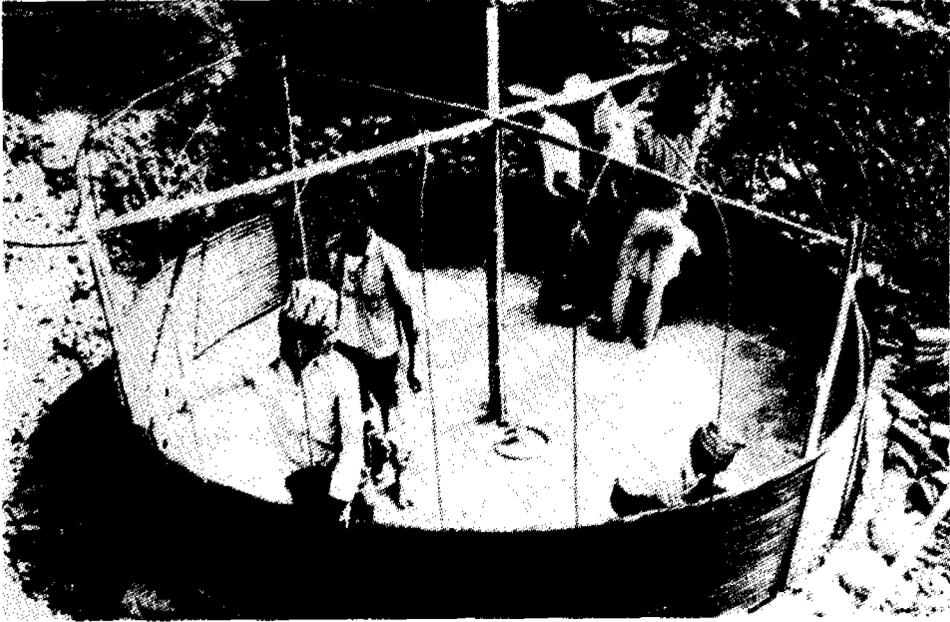


Figura 7.4: Construcción de tanque de ferrocemento empleando tubería plástica como molde interior, Nepal, 1986.

Para calcular las dimensiones con ferrocemento, véanse las publicaciones de Watt (1978) y Sharma et al (1980), y las publicadas por el International Ferrocement Information Centre (Apéndice VII).

Aunque la construcción de tanques de ferrocemento es nueva en muchos lugares, los albañiles locales pueden aprender el oficio con rapidez. Además, la construcción es más rápida y el costo es considerablemente inferior al de otros sistemas. Por ejemplo, el costo de construcción de un tanque de ferrocemento en Nepal fue sólo 30 - 50% del costo de un tanque en mampostería de piedra. Un equipo de trabajo conformado por un supervisor, dos albañiles experimentados y 5 - 10 trabajadores semicalificados, puede construir dos tanques de 4 m de diámetro en cuatro semanas. Por lo tanto, el trabajo en ferrocemento realizado por un pequeño equipo de trabajadores puede ser muy eficiente si se les proporciona capacitación adecuada, particularmente en preparación, colocación del mortero y curado del ferrocemento.

También vale la pena considerar una combinación de mampostería y ferrocemento (Figura 7.2). Primero se construye la pared de ladrillo o piedra, que sirve de encofrado para la capa delgada de ferrocemento, por cuyo motivo la construcción es rápida. Una ventaja adicional es que el ferrocemento es soportado por la mampostería.

Filtros rectangulares

Siempre y cuando se cuente con los recursos necesarios, los filtros rectangulares generalmente se construyen en hormigón reforzado, pero las unidades más pequeñas también se pueden construir de hormigón masivo o mampostería. La cantidad de refuerzo depende de las dimensiones del filtro y la profundidad de cimentación. En la Figura 7.5 se muestra un diagrama de presión para los filtros rectangulares construidos por encima del nivel del suelo.

La tubería y las válvulas en los filtros rectangulares son de fácil manejo y las ampliaciones futuras se pueden adicionar modularmente. Pueden emplearse filtros pequeños o grandes, pues los experimentos han revelado que la calidad del efluente procedente de las unidades más pequeñas es igualmente buena, siempre y cuando se prevengan "cortocircuitos" a lo largo del interior de las paredes. Esto puede lograrse haciendo áspera la superficie de la pared hasta la altura del lecho de arena, por ejemplo, pintando las paredes con lechada de cemento y cubriéndolo con una capa de arena gruesa.

Las unidades más pequeñas tienen la ventaja de asegurar una construcción estanca, que es importante cuando el filtro se encuentra en su mayor parte debajo del nivel del terreno. Además, la contracción del hormigón y la mampostería, los asentamientos diferenciales y los esfuerzos producidos por la temperatura, que dependen de la extensión de las paredes, son menores en las unidades más pequeñas.

Otros factores que pueden reducir la contracción son una baja proporción agua-cemento y un buen vibrado de la mezcla de hormigón.

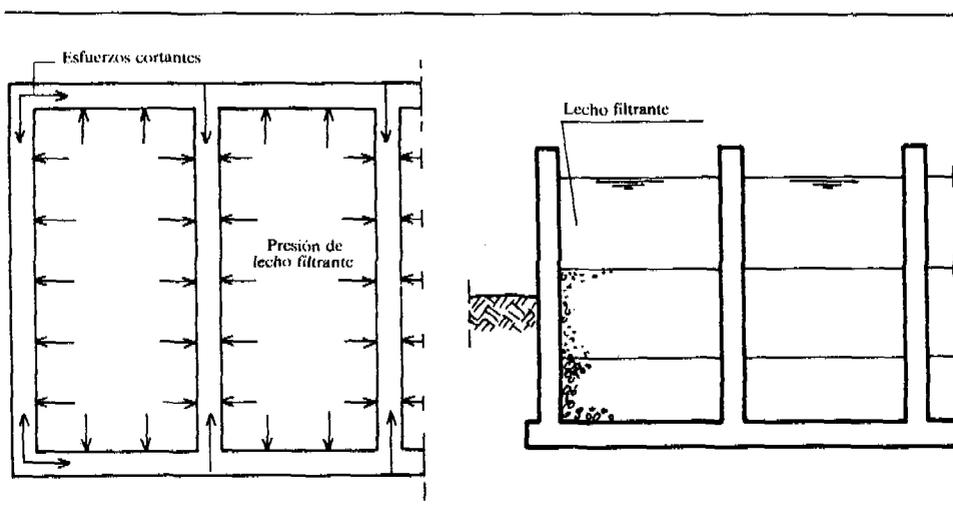


Figura 7.5: Diagrama de presión para filtros rectangulares.

Cimientos

La caja del filtro puede construirse por encima o parcialmente por debajo del nivel del terreno. La profundidad mínima de los cimientos debe ser 0,3 m en las áreas donde no se registren temperaturas por debajo de cero, pero cuando se construye debajo del nivel del terreno, la pared debe extenderse por lo menos 0,5 m por encima del terreno para impedir que el polvo, los animales e incluso los niños penetren en el filtro. Una caja de filtro colocada en su mayor parte por debajo del nivel del terreno tiene ventajas estructurales, porque la carga sobre las paredes es menor debido a la presión externa del terreno que compensa la presión del agua en el interior (Figura 7.6). Sin embargo, la presión externa del terreno sólo puede considerarse parcialmente en los cálculos si no se puede garantizar una buena compactación del terreno después de haberse construido la caja. También debe considerarse si no se puede garantizar la supervisión adecuada de las posibles reparaciones, (por ejemplo, de tuberías y válvulas) dado que la excavación junto a la caja sin desaguar el filtro, puede producir serias grietas en la pared. La carga hidrostática disponible del agua cruda puede afectar a la posible profundidad de la excavación en que se colocará la caja del filtro, pero generalmente se prefiere el flujo por gravedad a través de toda la planta de tratamiento.

Nivel de aguas freáticas

En las áreas donde el nivel de las aguas freáticas es alto, es recomendable colocar el filtro sobre el nivel del terreno, o garantizar la impermeabilidad de la caja del filtro para impedir que vuelva a contaminarse el agua filtrada. Las cajas de filtros en

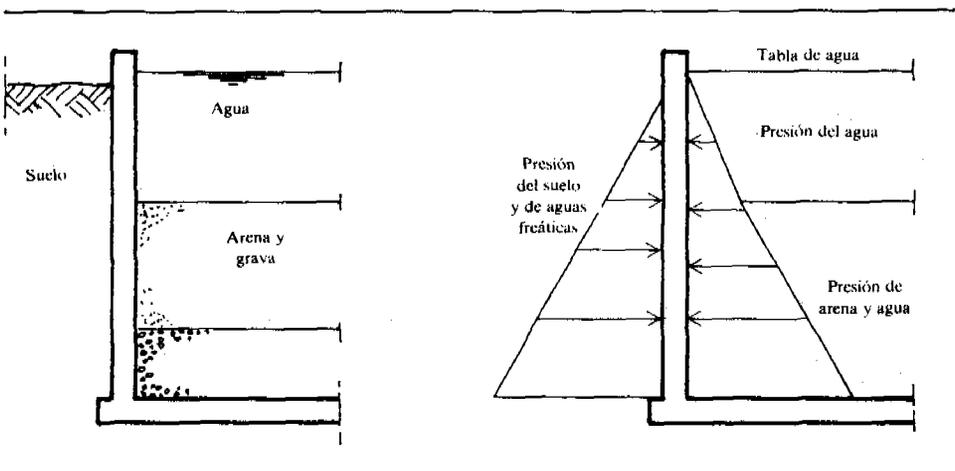


Figura 7.6: Diagrama de presión para una pared de la caja del filtro.

hormigón reforzado o ferrocemento por lo general no dejan pasar el agua, mientras que las de hormigón masivo o mampostería son menos apropiadas y requieren protección adicional y una ejecución cuidadosa para garantizar su estanqueidad.

Las cajas de filtro construidas por debajo del nivel del terreno pueden ser levantadas por efecto de la subpresión, según se muestra en el siguiente ejemplo con el filtro indicado en la Figura 7.7 y un nivel de aguas subterráneas de 0,1 m por debajo del nivel del terreno. Suponiendo que el peso específico del hormigón es 24 kN/m^3 , el peso total de la caja vacía del filtro puede calcularse del siguiente modo:

Peso de las paredes	$14 \times 0,2 \times 2,75 \times 24 = 184,8 \text{ kN}$
Peso de la losa	$0,25 \times 3,0 \times 4,0 \times 24 = 72,0 \text{ kN}$
Peso total de la caja vacía del filtro	<u>256,8 kN</u>

Presión exterior del agua (Carga hidrostática x longitud x anchura x gravedad) = $2,4 \times 3 \times 4 \times 9,8 = 292 \text{ kN}$.

Del cálculo anterior puede deducirse que la caja vacía del filtro será levantada por la presión del agua. Sin embargo, bajo condiciones normales, la caja permanecerá en su lugar una vez que la grava está en su sitio, pues esto le agrega cerca de $187,8 \text{ kN}$ ($0,4 \times 3 \times 4 \times 16$) al peso de la construcción. En consecuencia, hay que habilitar un desagüe durante la construcción para bajar el nivel de las aguas subterráneas hasta que se coloque la grava, y esto puede hacerse fabricando un sistema de desagüe por debajo de los filtros. Luego se puede bajar el nivel de las aguas freáticas mediante bombeo durante los trabajos de construcción y reparación (Figura 7.7), pero como esto es

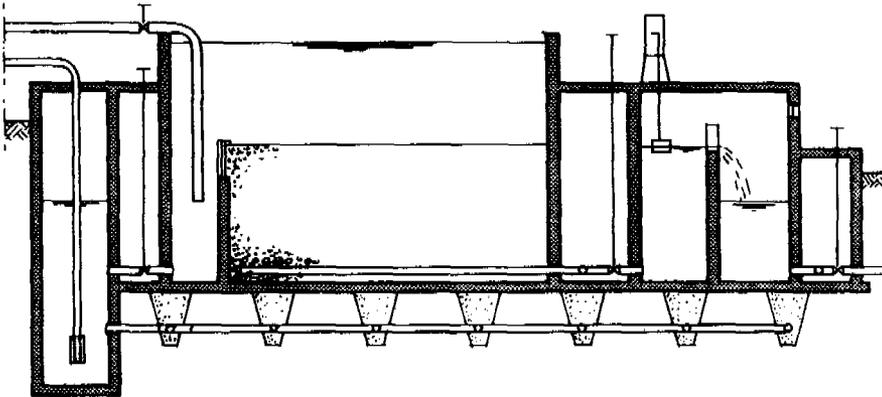


Figura 7.7: Sistema de drenaje debajo de la caja del filtro.

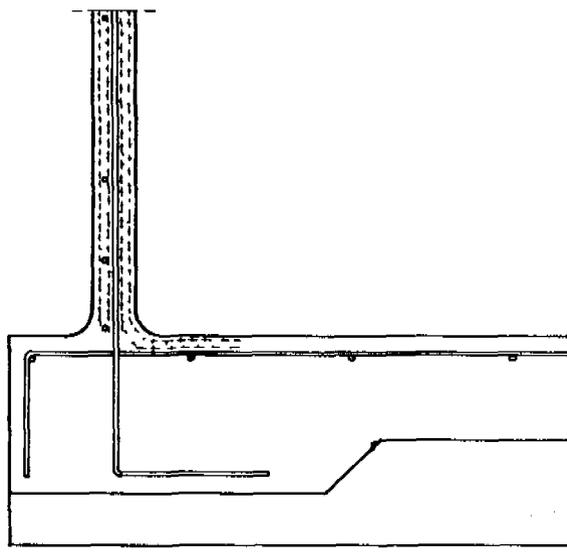


Figura 7.8: Conexión de la pared y el piso en ferrocemento y hormigón reforzado.

obviamente engorroso, las cajas de filtro preferiblemente se construyen por encima del nivel de las aguas subterráneas.

Construcción de las paredes y el piso

Si las paredes del filtro se construyen de hormigón reforzado, el piso también debe ser de hormigón reforzado. Las uniones entre el piso y la pared se pueden rigidizar extendiendo el refuerzo del piso hasta la parte inferior de la pared. Esta unión también tiene que ser rígida si las paredes se construyen de ferrocemento (Figura 7.8), pero no, si son de hormigón masivo o mampostería. Estas paredes se colocan sobre una viga de cemento perimetral con una junta o aplicación bituminosa que evite fugas de agua en la unión losa-muro (Figura 7.9).

Para las estructuras de filtros en mampostería de piedras de gran tamaño, debe proyectarse una cimentación "corrida" o continua para los muros con el objeto de distribuir los esfuerzos y evitar asentamientos diferenciales que generen grietas y fugas. Es recomendable el recubrimiento de la mampostería con mortero y malla de gallinero.

La carga desigual de los pisos no reforzados producirá fisuras. Puede proporcionarse un refuerzo mínimo que sea suficiente para prevenir el surgimiento de fisuras, por ejemplo, colocando barras de acero de 6 mm de diámetro a intervalos de 150 mm en ambas direcciones.

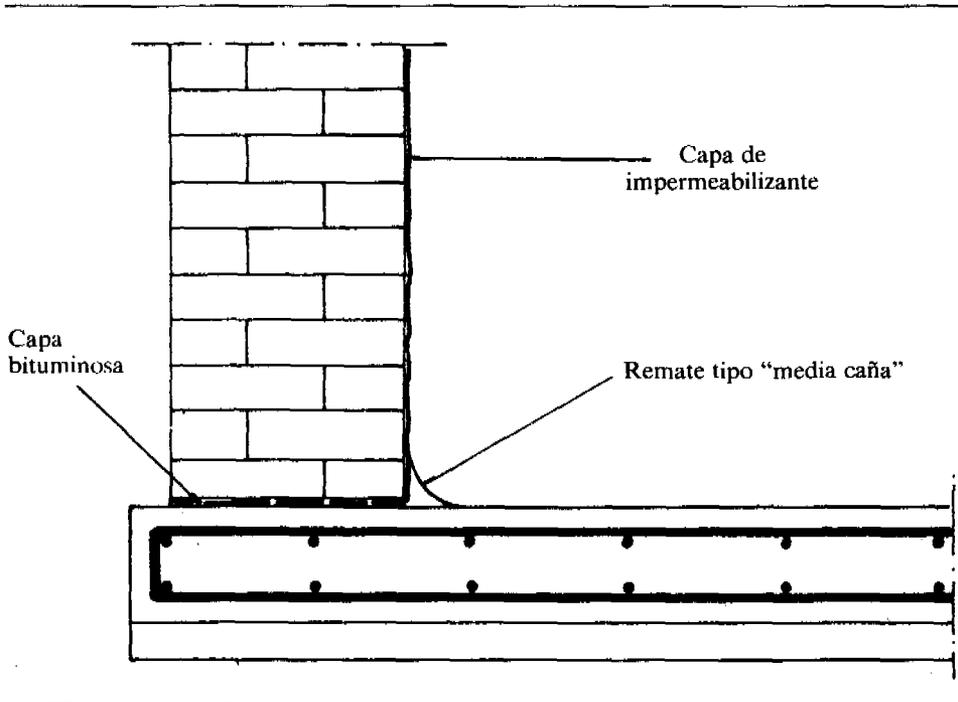


Figura 7.9: Conexión de la pared y el piso en mampostería y hormigón reforzado.

Refuerzo en paredes y losa de fondo

Los espesores y el refuerzo requerido de las paredes y el piso dependen de muchos factores, como las dimensiones y la forma del filtro y la presión sobre las paredes. Los cálculos para cada situación posible están fuera del alcance de esta publicación.

En las zonas rurales es difícil tener un control en la resistencia del concreto, por lo tanto se recomienda dosificar las mezclas para una resistencia 25% mayor de la exigida, se recomienda usar un recubrimiento mínimo de 25 mm para el refuerzo y con una cuantía que garantice un comportamiento adecuado y seguro en las condiciones críticas de carga, momentos y cortantes máximos, además en caso de producirse agrietamientos o fisuras, éstos deben ser menores a 0,10 mm. Además de esta cantidad mínima, puede ser necesario refuerzo adicional a fin de reducir la contracción. Las paredes y el piso generalmente se funden por separado, por lo que la contracción del piso ya está en curso cuando se realiza el vaciado de la pared. Esto producirá esfuerzos de tensión sobre el refuerzo horizontal. La cantidad de refuerzo adicional dependerá de la resistencia del hormigón, el refuerzo y del espesor de la pared. El diseño del refuerzo debe proporcionar la mejor combinación de propiedades mecánicas, tanto del acero como del hormigón (Figura 7.10).

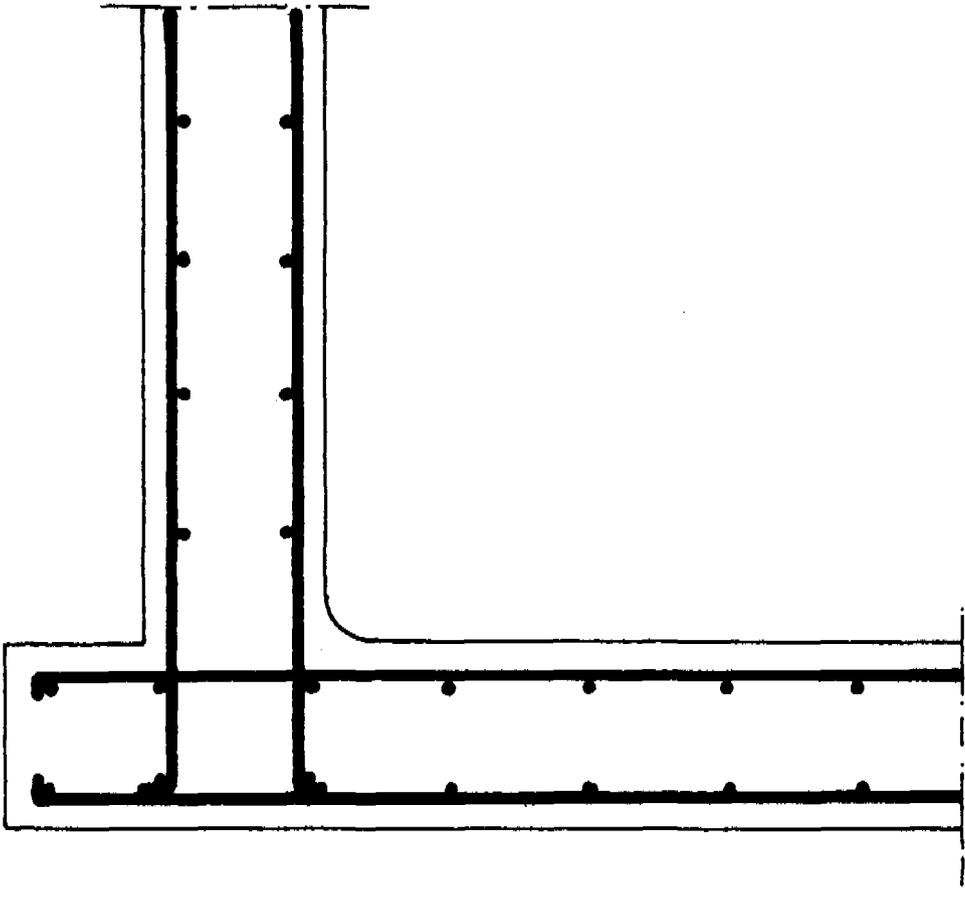


Figura 7.10: Ejemplo de diseño de refuerzo para conexión de pared y piso.

Filtros con taludes recubiertos

Un filtro de pared inclinada generalmente es excavado, total o parcialmente en el terreno, y la estabilidad de éste determina la pendiente de las paredes, aunque una de 1:2 es normalmente satisfactoria. Entre los materiales idóneos para el revestimiento de las paredes figuran la mampostería, mosaicos de hormigón y ferrocemento (Figura 7.11). El ferrocemento parece ser muy prometedor, pero su baja resistencia al impacto es una ligera desventaja y se requieren construcciones especiales para que los filtros sean accesibles. Los costos de construcción de los filtros de pared inclinada son relativamente bajos, y pueden emplearse obreros no calificados.

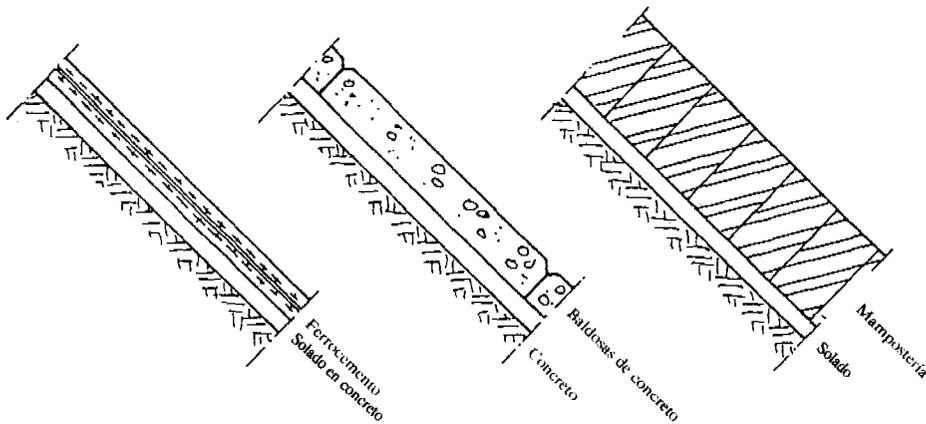


Figura 7.11: Tipos de revestimientos para los filtros de pared inclinada.

Entre las desventajas de los filtros con recubrimiento del talud figuran las siguientes:

- Se requiere más terreno que para las estructuras con paredes verticales (el área del diseño es el área neta del lecho del filtro a la profundidad mínima de éste);
- Las tuberías y las instalaciones de control de filtros son menos accesibles;
- La estanqueidad de la construcción es difícil de garantizar. Cuando el nivel de aguas subterráneas es bajo, quizás no sea importante excepto por las fugas, pero el agua filtrada puede volver a contaminarse con un nivel alto de las aguas subterráneas;
- Pueden contaminarse las paredes inclinadas con el crecimiento de junquillos y otra vegetación.

Los filtros de paredes inclinadas también se pueden construir en tierra sobre el nivel del terreno. Esto reduce las desventajas, pero también produce una presión mayor en la capa superior del terreno, lo que puede causar asentamiento y fisuras. En la Tabla 7.1 se resumen varios tipos de construcciones para la caja del filtro.

Tabla 7.1 Aplicabilidad de diversos tipos de construcciones para filtros lentos de arena.

Tipo de construcción	Area por módulo* (m ²)	Espesor del prefabricado o de la pared (m)	Comentarios
Taludes revestidos	Rectangular 40 -400	0,04 - 0,10	— Bajo costo; — No requiere mano de obra especializada
Concreto simple o mampostería	Circular o cuadrado 2 - 300	0,20 - 0,30	— Apropiado en sitios con bajo nivel freático
Ferrocemento	Circular 2 - 120	0,05 - 0,08	— Posible deformación en paredes — La construcción y curado requieren atención
Concreto Reforzado	Rectangular 4 - 400	0,15 - 0,20	— Mano de obra especializada en formaletería y colocación de refuerzos
	Circular 4-400	0,10 - 0,20	

* Para áreas rurales, el área por módulo es preferible limitarla a un máximo de 200 m².

7.2 ESTRUCTURA DE ENTRADA

Las funciones principales de la estructura de entrada son las siguientes:

- Disipar energía en el flujo de llegada a los filtros, de tal manera que evite el rompimiento de la membrana biológica. En consecuencia, la entrada debe estar localizada por encima del nivel máximo del lecho de arena y es diseñada de tal manera que se generen velocidades bajas aproximadas a 0,1 m/s. Esto puede lograrse proyectando planchas en concreto o tablonces de madera, con un ancho mínimo de 0,4 m y máximo de 1,0 m. En general, esta dimensión puede calcularse dividiendo el flujo de diseño (m³/h) por 20.
- Posibilitar el ajuste del nivel del agua sobrenadante, bien sea, a través de una de las siguientes posibilidades: flotador controlador, válvula de mariposa, válvula de compuerta manual, o vertedor de excesos ajustable, localizado en el canal o tubería de entrada. El diámetro en la tubería de entrada, debe ser tal que la velocidad de flujo esté comprendida entre 0,3 - 0,5 m/s, cuando el filtro sea operado a la tasa de filtración de diseño.

- Interrumpir el flujo de agua cruda a través de una válvula de compuerta manual.
- En filtros con control a la entrada, medir y controlar el flujo.

Generalmente, la estructura de entrada es una caja con una tubería de salida, que permite evacuar rápidamente el agua sobrenadante, en el momento en que el filtro necesita limpiarse. Drenar este flujo a través del lecho filtrante, implicaría un tiempo relativamente grande, dada la resistencia del medio ante la colmatación producida.

Los tablonés en madera o las placas en concreto, colocadas en la estructura de entrada, pueden removerse a través del tiempo, de tal manera que se ajusten al mismo nivel del lecho filtrante generado a consecuencia de los raspados sucesivos.

Estas variaciones pueden ser de 0,05 a 0,10 m, acorde con el tamaño de los elementos utilizados.

7.3 ESTRUCTURA DE SALIDA

Las funciones principales de la estructura de salida son las siguientes:

- Evitar la formación de presión inferior a la atmosférica en el lecho filtrante (presiones negativas). Con frecuencia se proyecta un vertedor con descarga libre y con su cresta localizada ligeramente por encima del nivel máximo del lecho de arena, que permite obviar tal inconveniente.
- Desaguar de manera independiente cada módulo de filtración. Usualmente se proyecta una tubería exclusiva para tal fin, descargando libremente en la estructura de salida y vertiendo los desechos a la red general de desagües de la planta.
- Posibilitar el llenado ascendente de cada uno de los filtros, con agua tratada después del raspado, lo cual puede efectuarse a través del sistema de drenaje o recolección de agua filtrada en cada módulo.
- Un filtro con control a la salida debe permitir la medición de flujo a través del lecho filtrante. Un vertedor de descarga libre, como el indicado anteriormente, puede ser utilizado para este propósito complementándolo con un indicador calibrado de flujo y combinándolo con un vertedero triangular. La relación entre el flujo y la altura de agua en la cresta del vertedor se explica en el Apéndice V.
- Un filtro con control a la salida, debe permitir el ajuste de la velocidad de filtración cerrando gradualmente el flujo de salida del filtro. El método más sencillo es el ajuste manual de una válvula o grifo.

En la Figura 7.12 se puede distinguir:

- La llegada del agua filtrada en la estructura de salida.
- La válvula que permite controlar la velocidad de filtración.
- El indicador de flujo y el vertedor de descarga libre.
- La facilidad de aeración del agua tratada después de ser medida.
- La boca de inspección que permite la limpieza de la cámara y la calibración del indicador de flujo.
- La salida del agua tratada hacia el almacenamiento.

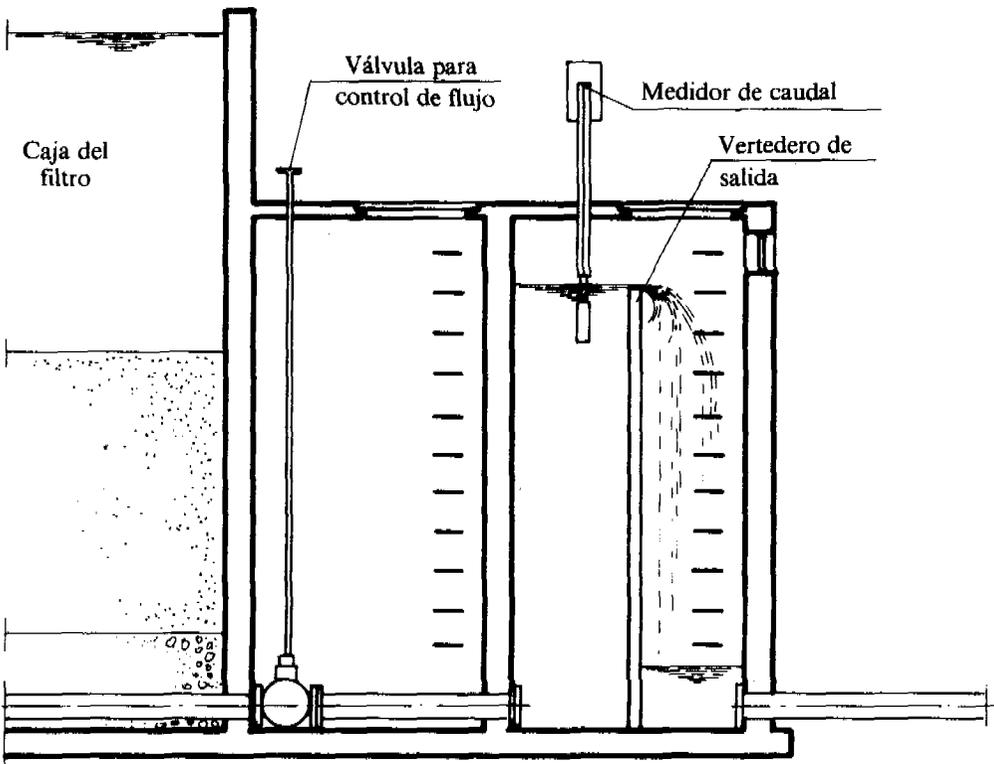


Figura 7.12: Estructura de salida de un filtro con control a la salida.

7.4 SISTEMA DE DRENAJE INFERIOR

El drenaje inferior en un filtro lento, permite cumplir tres funciones básicas:

- Soportar el material filtrante e impedir que sea arrastrado a través del sistema de drenaje.
- Asegurar la recolección uniforme del agua filtrada, a través de toda el área de filtración.
- Permitir el llenado ascendente de los filtros, bien sea en su arranque inicial o después de raspados los módulos.

El sistema de drenaje debe ser diseñado y construido cuidadosamente, dado que no se puede inspeccionar, limpiar o reparar, sin retirar la totalidad del material filtrante.

En los filtros lentos de arena se pueden proyectar varios tipos de desagües, siendo los más utilizados, los sistemas que se ilustran en la Figura 7.13.

Para prevenir la pérdida de material filtrante a través de los orificios del sistema de drenaje, se colocan capas de grava entre la arena del filtro y el sistema de drenaje.

Generalmente, en sistemas convencionales se usan tres capas de grava con tamaños de grano, que oscilan entre 1,0 - 1,4 mm, 4,0 - 6,0 mm y 16,0 - 23,0 mm, respectivamente. Cada una de estas capas tiene un espesor aproximado entre 100 -150 mm (Figura 7.14).

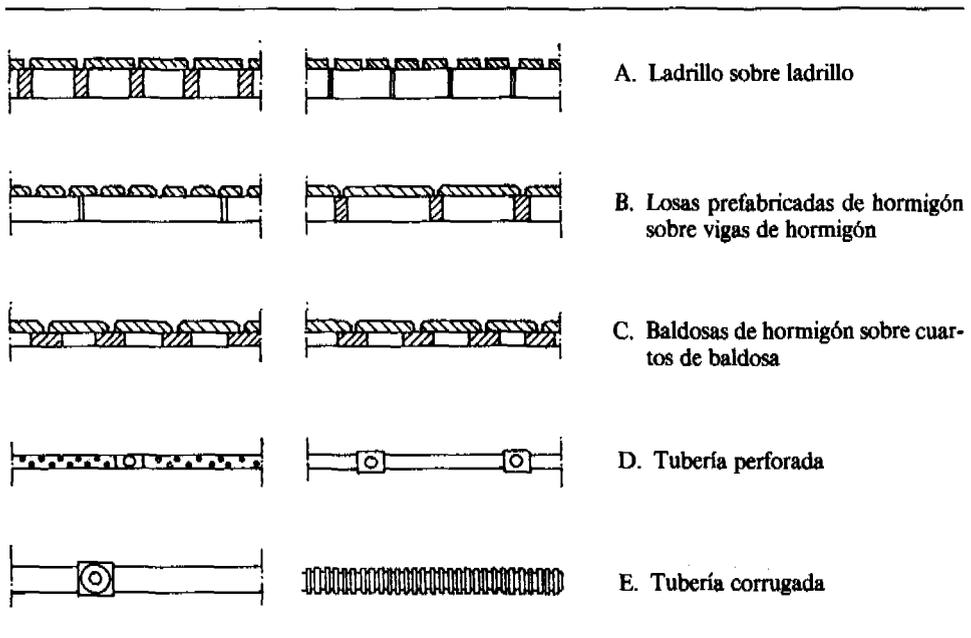


Figura 7.13: Sistemas comunes de drenaje utilizados en filtros lentos de arena.

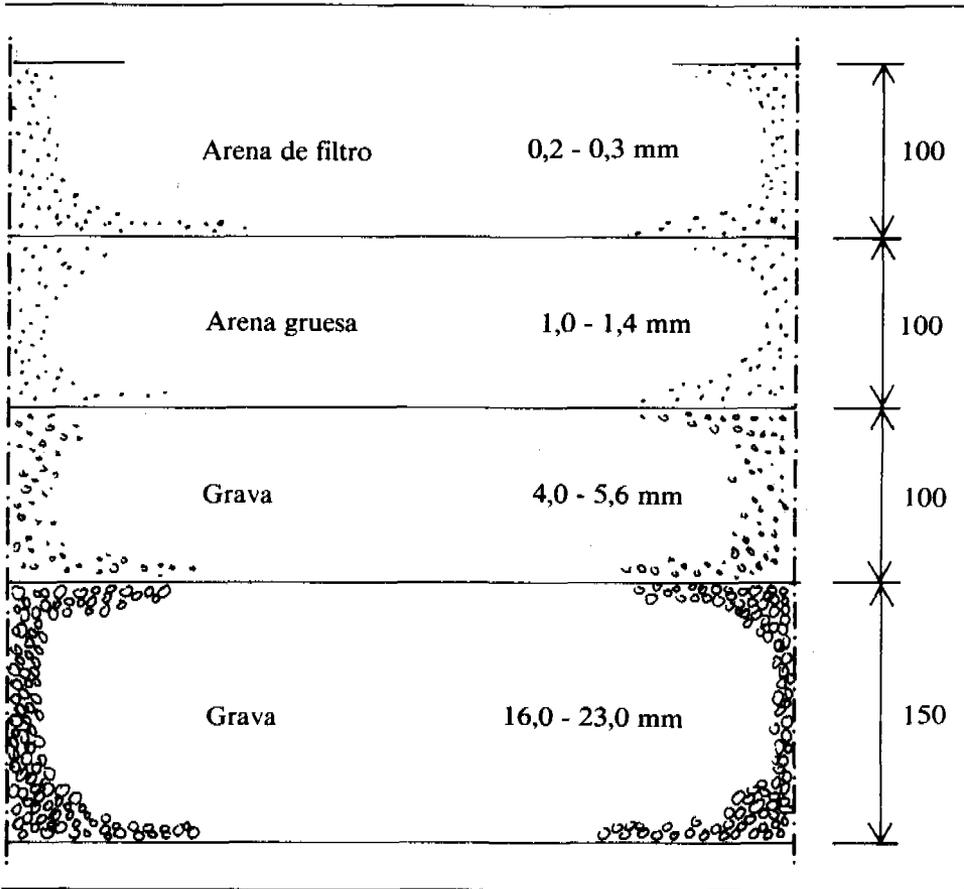


Figura 7.14: Medio de soporte.

Existen experiencias positivas en la utilización de tubería de drenaje PVC corrugada, como sistema de drenaje en filtros lentos, dada la facilidad de instalación, transporte, economía, comportamiento mecánico e hidráulico. Otro aspecto importante, derivado de esta experiencia, consiste en permitir disminuir el espesor de la capa de grava por encima de los tubos corrugados PVC, a sólo 100 mm. Los sistemas construidos en losas de concreto prefabricadas, ladrillo cocido o baldosas de hormigón, tienen una característica en común y es que el agua fluye libremente fuera del lecho de arena, sobre un área relativamente grande. En consecuencia, se puede depender de estos sistemas sin tener que calcular sus propias características hidráulicas, mientras que los sistemas que utilizan tuberías perforadas deben ser diseñados más cuidadosamente (ver Tabla 7.2).

Para filtros pequeños con áreas inferiores a 20 m² puede usarse una capa de 15 cm de piedra triturada de tamaño entre 25 y 50 mm, como grava para el medio filtrante.

Tabla 7.2 Criterios para el dimensionamiento de un sistema de drenaje inferior, utilizando tuberías perforadas.

Criterios de diseño	Valores
Velocidad máxima del colector	0,5 m/s
Velocidad máxima en los tubos laterales	0,5 m/s
Separación de laterales	1 - 2 m
Tamaño de orificios en tubos laterales	2 - 4 mm
Separación de orificios en tubos laterales	0,1 - 0,3 m

En Colombia existen experiencias en la utilización de tuberías corrugadas PVC de 6 cm de diámetro con una separación de un metro entre laterales y cubiertos con una capa de 0,1 m de grava fina (Figura 7.15). Este método es interesante ya que reduce la necesidad de colocar capas de grava gradadas, se disminuye la altura del sistema de drenaje en comparación con los sistemas tradicionales y la altura total del filtro se hace menor. Están siendo realizadas investigaciones a nivel piloto en tubos corrugados envueltos en un material tejido de nilón o plástico. Este método puede obviar la necesidad de usar grava, siempre y cuando los tubos se coloquen más cerca unos de otros, por ejemplo, de 0,6 - 0,7 m, y el material sea resistente a la obstrucción microbiológica.

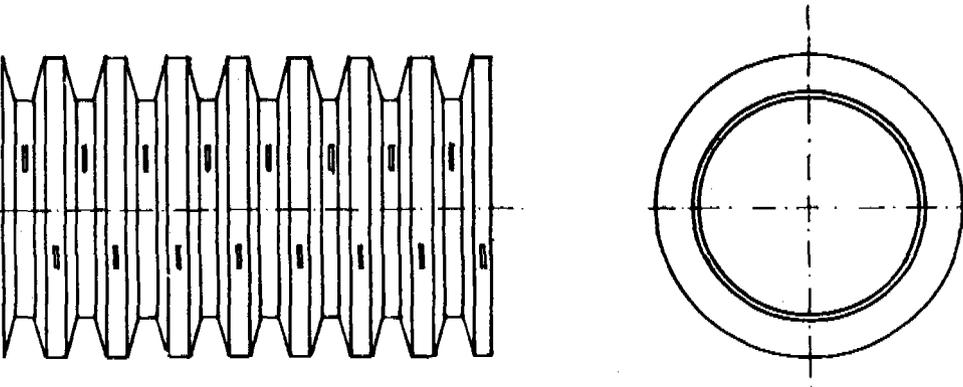


Figura 7.15: Tubo corrugado de PVC para sistema de desagüe inferior.

7.5 DISPOSITIVOS PARA CONTROL DEL FILTRO

Es indispensable la utilización de dispositivos que permitan efectuar adecuadamente las actividades de operación y mantenimiento a nivel de filtros lentos y de planta de tratamiento en general. Tales elementos pueden ser instalados con la ayuda de un diagrama de flujo en ciertos puntos del sistema de tratamiento (Figura 7.16) y cumplen entre otras las siguientes funciones:

- Control del caudal afluente a las unidades de tratamiento.
- Aforo de caudales afluentes y efluentes.
- Interrupción total o parcial del flujo.
- Vertimiento de excesos.
- Desagües y reboses en general.
- Vertimiento de agua sobrenadante en los filtros lentos, etc.

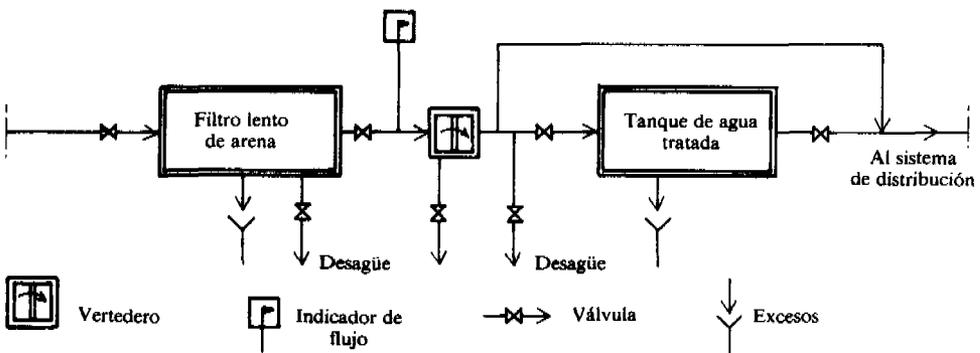


Figura 7.16: Diagrama de flujo para la instalación de un filtro lento de arena.

Las válvulas de compuerta, de globo, de mariposa y las compuertas mismas circulares o rectangulares (Figura 7.17), son los accesorios que con mayor frecuencia se proyectan y permiten cumplir las actividades indicadas en la planta de tratamiento.

Sin embargo, su selección debe ser justificada con base en la exactitud de medición requerida, estanqueidad, pérdida de carga producida, disponibilidad y calidad del accesorio, costos del material y facilidad de mantenimiento y reposición de sus partes.

La válvula de compuerta, o válvula de esclusa es el dispositivo más sencillo que contribuye al control de flujo en una tubería. Sin embargo, no es tan precisa como otros tipos de válvulas, dado que el flujo empieza a disminuir considerablemente, sólo cuando la válvula está cerrada más del 90%. A pesar de esto y su sencillez, se constituye en una solución adecuada para las áreas rurales en muchos países, especialmente para conductos que trabajen a flujo libre o con pequeñas cargas hidrostáticas.

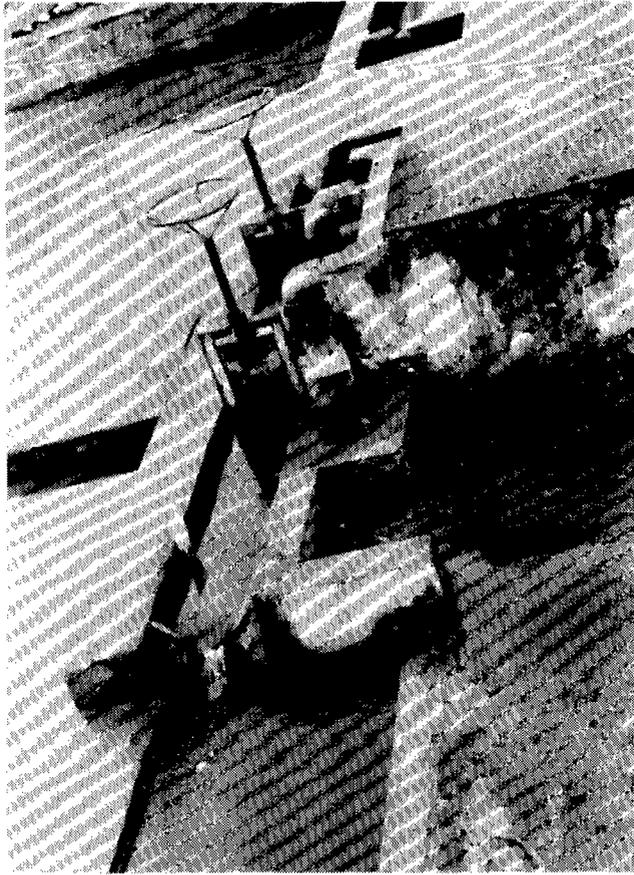


Figura 7.17: Compuertas para el control de flujo, Vereda La Sirena, Cali, Colombia.

El dispositivo de control de flujo con mayor exactitud de tuberías, lo constituye la válvula de mariposa. Debido a su acción rápida, permite un mejor control de la velocidad y su diámetro mínimo es de dos pulgadas. Las válvulas de globo tienen una mayor pérdida de carga, comparativamente con las de compuerta o de mariposa, pero son más económicas y controlan adecuadamente el flujo y los diámetros comerciales, por lo general se ajustan a las necesidades de proyectos de abastecimiento de agua en zonas rurales.

La actividad y la utilización de materiales y mano de obra local, puede permitir presentar alternativas técnica y económicamente viables. (Figuras 7.17 y 7.18).

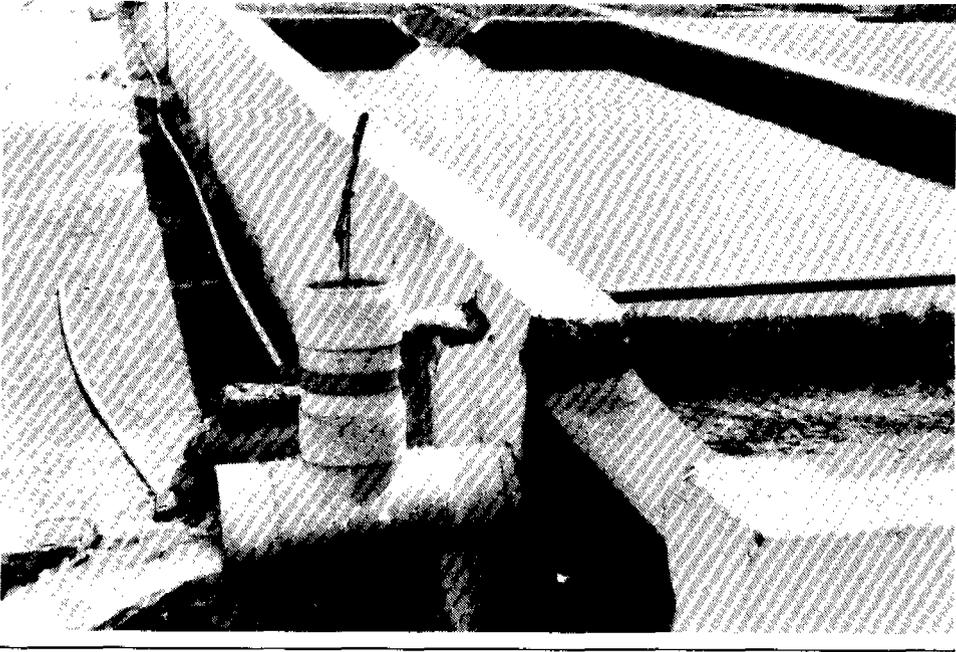


Figura 7.18: Válvula para el control de flujo, Parcelación El Retiro, Cali, Colombia.

Perfil hidráulico

La Figura 7.19 ilustra un ejemplo de una línea de gradiente hidráulico, o sea, la que indica la pérdida de la carga hidrostática sobre los componentes de la planta.

Durante la operación, la pérdida de carga sobre toda la planta se conserva constante, ajustando las válvulas de control.

7.6 TUBERIAS Y BOMBEO

En el área de abastecimiento de agua y en ingeniería, es buena práctica “exceder el diseño” de los elementos hidráulicos principales de una planta de tratamiento, hasta por lo menos una vez y media (1.5) la capacidad requerida. Esto garantiza que la planta de tratamiento se pueda ampliar sin tener que reemplazar tuberías, válvulas y otros aditamentos. Las válvulas de compuerta y las de control del filtro deben disponerse de tal modo que se puedan conectar extensiones y además, las partes mecánicas vulnerables deben ser de fácil acceso para fines de control y reparaciones. El efluente y los tubos de desagüe deben estar bien separados de las tuberías de agua clara.

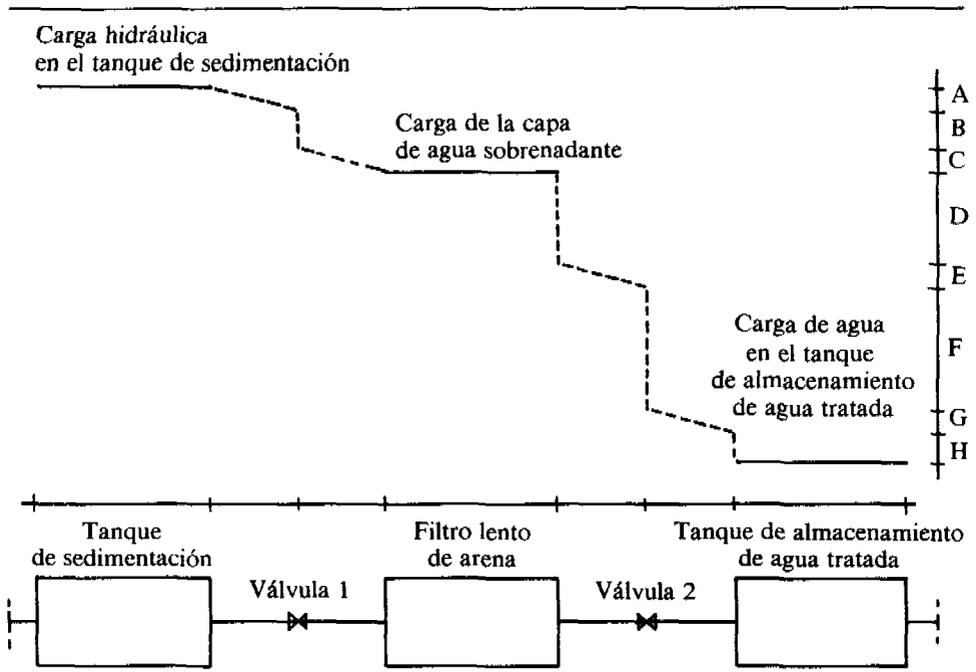


Figura 7.19: Línea del gradiente hidráulico en una planta de filtración lenta en arena (flujo por gravedad).

- A = pérdida de carga en la tubería entre el tanque de sedimentación y la válvula 1
- B = pérdida de carga sobre la válvula 1
- C = pérdida de carga en la tubería entre la válvula 1 y el filtro lento de arena
- D = pérdida de carga sobre el filtro lento de arena (aumenta durante la filtración)
- E = pérdida de carga en la tubería entre el filtro lento y la válvula 2
- F = pérdida de carga sobre la válvula 2 reguladora del filtro (disminuye durante la jornada de filtrado)
- G = pérdida de carga en la tubería entre la válvula 2 y el tanque de agua clara
- H = pérdida de carga sobre el vertedero del effluente

Las bombas centrífugas se emplean en muchas plantas de tratamiento de aguas.

Cuando se diseñan las tuberías y las bombas, es necesario conocer el flujo requerido, la pérdida de carga hidrostática en las tuberías y unidades de tratamiento y la cabeza de presión requerida.

La pérdida de carga en las tuberías puede ser fácilmente determinada usando gráficas que están disponibles para la mayoría de materiales. La Figura 7.20 muestra un ejemplo para tubería de PVC.

De la Figura 7.20 se puede ver que para un caudal de 1,0 l/s (3,6 m³/h) la pérdida de carga será de 0,7 m por 1 000 m de recorrido, usando un tubo de 75 mm de diámetro. Los accesorios y cambios de dirección aumentarán la pérdida. La pérdida de carga en el filtro lento es de aproximadamente 1,0 m de columna de agua y en los tanques de presedimentación, entre 0,05 y 0,1 m.

7.7 CONSTRUCCION DEL TANQUE DE AGUA TRATADA

El tanque de almacenamiento de agua tratada no necesariamente tiene que estar en la planta de tratamiento. La ubicación en el poblado tiene la ventaja de ofrecer un flujo más constante en la tubería de transporte entre la planta de tratamiento y el poblado.

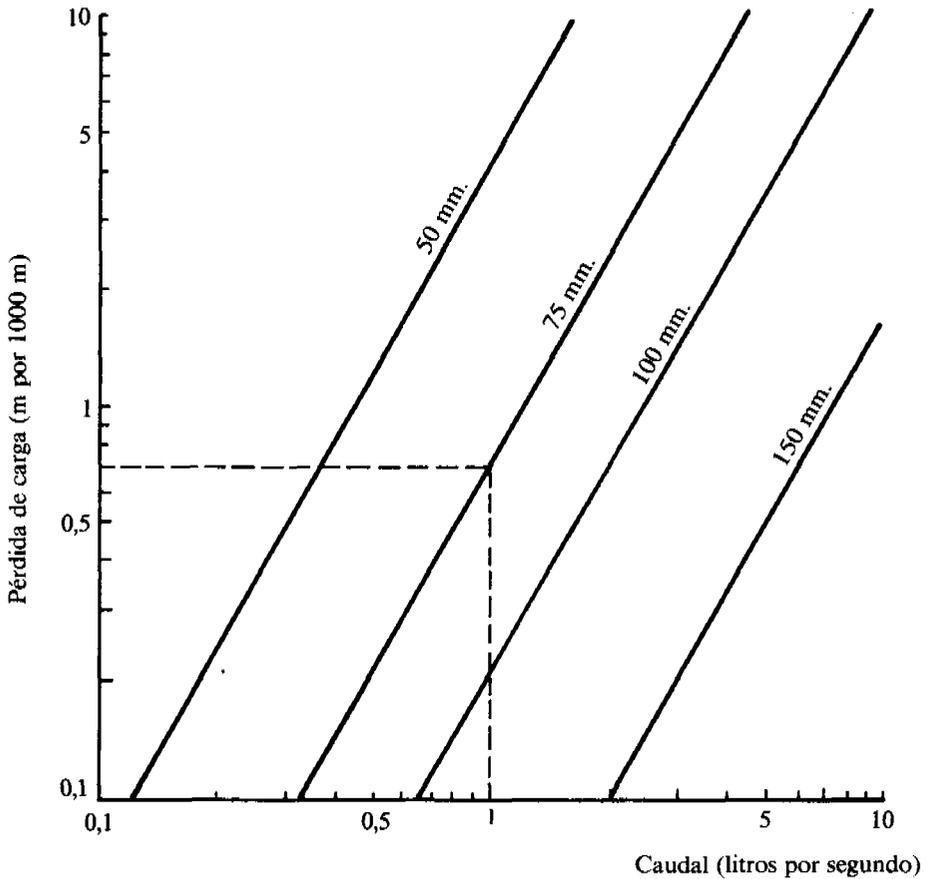


Figura 7.20: Pérdida de carga por fricción para tubería de PVC.

Además, se pueden construir dos o tres tanques más pequeños, con un volumen neto total equivalente al requerido para el almacenamiento. Esto puede reducir el costo de las tuberías de transporte, pues pueden usarse diámetros más pequeños, lo que aumenta la fiabilidad del sistema de abastecimiento de agua ya que cuando deja de funcionar un tanque, los otros pueden seguir suministrando agua.

Los cimientos para los tanques de agua tratada generalmente son profundos, porque la pérdida de carga hidrostática a través del filtro es de 1 m (Figura 7.19), y hay que prever cierta variación en el nivel de agua del tanque para equilibrar la producción y la demanda.

En instalaciones pequeñas, la cubierta del tanque de agua tratada puede ser una estructura sencilla de ferrocemento o madera. Para los tanques más grandes se aconseja una cubierta de hormigón reforzado macizo o aligerado. Cuando el tanque de agua tratada está cubierto con una losa de hormigón reforzado, el diseño estructural difiere del de los filtros lentos de arena porque las presiones laterales también se transmiten hacia la cubierta. Si las uniones entre la cubierta y las paredes se fortalecen con barras extendidas de refuerzo, aumenta la resistencia de la estructura y entonces se puede reducir el espesor de las paredes. Cuando se calculan las dimensiones del piso y la pared del tanque, la combinación de un tanque vacío y un nivel freático alto es crítica. Se debe considerar cuidadosamente si debe aumentarse el peso total de la estructura, a fin de evitar la subpresión.

El tanque de agua tratada debe estar dotado de tubos de ventilación, un tubo de drenaje, un rebosadero y una abertura de inspección. Si el tanque también sirve como cámara de contacto para el cloro, entonces la tubería de salida de agua tratada debe estar situada a una altura por encima del nivel del fondo, de tal manera que el tiempo de retención mínimo sea de 30 minutos.

8. Ejemplos de plantas de filtración lenta en arena (FLA) en Colombia

Este capítulo presenta cuatro ejemplos de plantas en Cali, Colombia, desarrolladas bajo diferentes características físico-mecánicas del suelo, topográficas, de utilización de materiales, formas geométricas de estructuras, tamaños poblacionales y de caudales, y de diferentes calidades de aguas afluentes a las unidades de tratamiento.

En cada caso, se trata de realizar un aprovechamiento óptimo del área disponible, de la topografía, de materiales, mano de obra, arquitectura, clima y vegetación local.

Los proyectos, además de cumplir su misión técnica, empiezan a ser considerados como un lugar que permite resaltar códigos culturales, recreativos, lúdicos y son puntos de encuentro de las comunidades mismas, en un proceso de educación y búsqueda de una identidad local o regional.

La selección de tecnología, la calidad en la información, la participación de la comunidad en las fases previas de planeación y diseño, aunado a la imposibilidad de presentar tipos de diseños que se ajusten a las situaciones generales y particulares, son aspectos que un diseñador debe considerar cuando ejecute un proyecto.

Un diseño, además de las unidades específicas de tratamiento, debe incluir un manejo adecuado de los accesos tanto exterior como interior, de las aguas residuales producidas dentro de la planta y su tratamiento, el abastecimiento de agua potable para el consumo humano dentro de la planta misma, y la necesidad de proyectar desagües de las unidades, preferiblemente a gravedad, acorde a las condiciones críticas de operación y mantenimiento. De igual manera se deben diseñar las áreas respectivas para lavado y almacenamiento de arena, caseta de operación y sitios de reunión de la Junta Administradora del Acueducto, los cuales además pueden aprovecharse como puntos de capacitación en general para la comunidad.

8.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DEL COLEGIO COLOMBO-BRITANICO, CALI

En principio era una planta convencional, la cual por su mal funcionamiento y altos costos de operación fue transformada en un sistema FLA en el año de 1987, aprovechando la infraestructura existente. La planta está construida en concreto

reforzado y su forma es rectangular. Adicionalmente a los filtros lentos, como caso especial, se diseñó una captación dinámica y un filtro grueso de flujo ascendente como pretratamiento previo a los filtros lentos. El sistema abastece cerca de 1 000 estudiantes procedentes de estrato socio-económico alto. (Figuras 8.1.A y 8.1.B).

8.2 PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA PARCELACION EL RETIRO

Es el resultado de un estudio previo de seis meses de tratabilidad mediante plantas piloto FLA. Como en el caso anterior corresponde a una modificación de una planta convencional mal operada, con costos de funcionamiento altos. La reforma fue ejecutada en el año de 1986. El diseño estructural corresponde a muros en taludes inclinados (60°) revestidos en concreto. Como sistema de pretratamiento se diseñó inicialmente un sistema de filtración gruesa ascendente en capas consistente en tres módulos en paralelo, al cual se le agregó en 1992, un filtro grueso dinámico. El sistema abastece una población equivalente de 4 000 personas de estrato social medio y alto. Actualmente los costos de operación y funcionamiento representan el 50% de los costos que generaba la anterior planta y los ahorros son invertidos en optimización de la red de distribución, control y vigilancia de la calidad del agua. (Figuras 8.2.A y 8.2.B)

8.3 PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA VEREDA LA SIRENA

Esta planta es un ejemplo de la activa participación comunitaria. El proyecto fue impulsado, gestionado, planeado y construido por la comunidad en el año de 1986, con el apoyo de instituciones oficiales, regionales, locales, y la Embajada Real de los Países Bajos. Su diseño estructural corresponde a mampostería estructural y repello interior impermeable, su forma geométrica circular, aprovecha el área disponible y las características físicas y geométricas del terreno. No tiene sistema de pretratamiento por lo cual durante las fuertes lluvias es necesario sacar las unidades de FLA de funcionamiento evitando su rápida colmatación. El sistema abastece cerca de 4 500 personas de estrato social bajo. (Figuras 8.3.A y 8.3.B)

8.4 PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA PARCELACION CAÑASGORDAS

El diseño corresponde a la optimización de una planta FLA con limitaciones en diseño, operación y mantenimiento, la cual estuvo fuera de funcionamiento cerca de

dos años. La optimización, realizada en el año de 1990, consistió en diseñar las unidades de pretratamiento (filtro dinámico y filtros gruesos ascendentes en capas en dos fases), adicionar una nueva unidad de filtración lenta y optimizar los módulos de FLA existentes. Estos corresponden a un diseño estructural de muros en taludes inclinados (60°) y revestidos en concreto impermeabilizado. El módulo FLA nuevo y adicional fue proyectado en concreto reforzado y forma rectangular. El sistema abastece 150 viviendas de estrato social alto-alto. (Figuras 8.4.A y 8.4.B).

Las unidades de pretratamiento se localizan antes de las unidades FLA a fin de acondicionar el agua y proteger la carrera de los filtros lentos.

En cada uno de los ejemplos presentados, se indican los criterios de diseño hidráulico, sus características constructivas y la cantidad de material requerida en los lechos filtrantes.

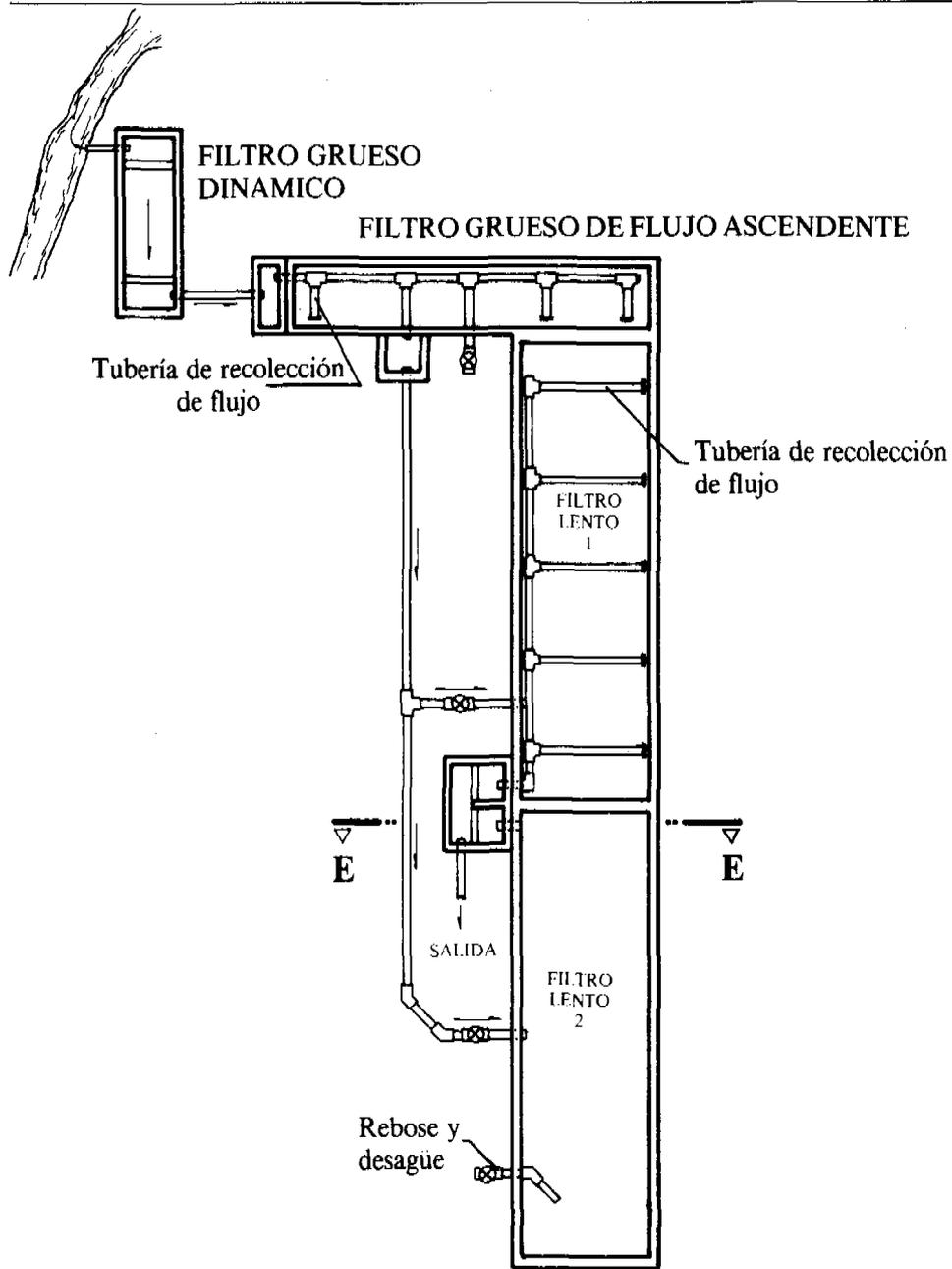
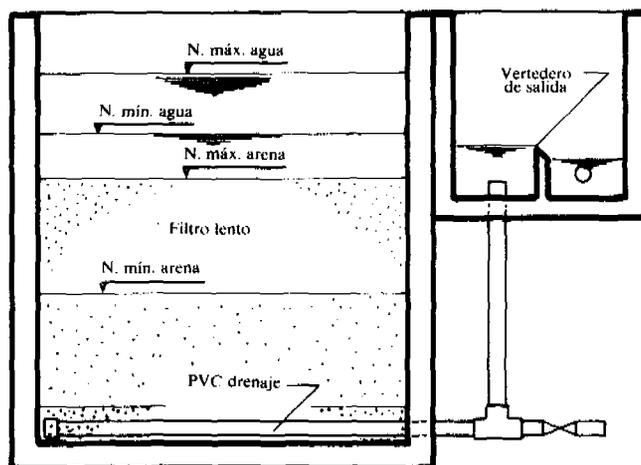


Figura 8.1.A.: Esquema de la planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.



CORTE E-E

Figura 8.1.B: Detalles de la estructura de salida de los filtros lentos del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.

FILTROS LENTOS

Información general

Caudal de diseño:	1,0 lps	Borde libre:	0,33 m
Tasa de filtración:	0,15 m ³ /m ² /h	Altura total:	2,3 m
Area de filtración/unidad:	12 m ²	Diseño estructural:	Cemento reforzado
Número de unidades:	2	Control:	A la entrada
Forma geométrica:	Prismática rectangular		
Dimensión del filtro:		CANTIDADES TOTALES DE MATERIAL FILTRANTE	
Ancho:	2,0 m	Grava:	5,6 m ³
Largo:	7,0 m	Arena:	33,6 m ³
Altura del lecho de soporte:	0,20 m		
Altura del lecho de arena inicial:	1,20 m	Número de válvulas:	4
Altura mínima del lecho de arena:	0,6 m	Número de compuertas:	2

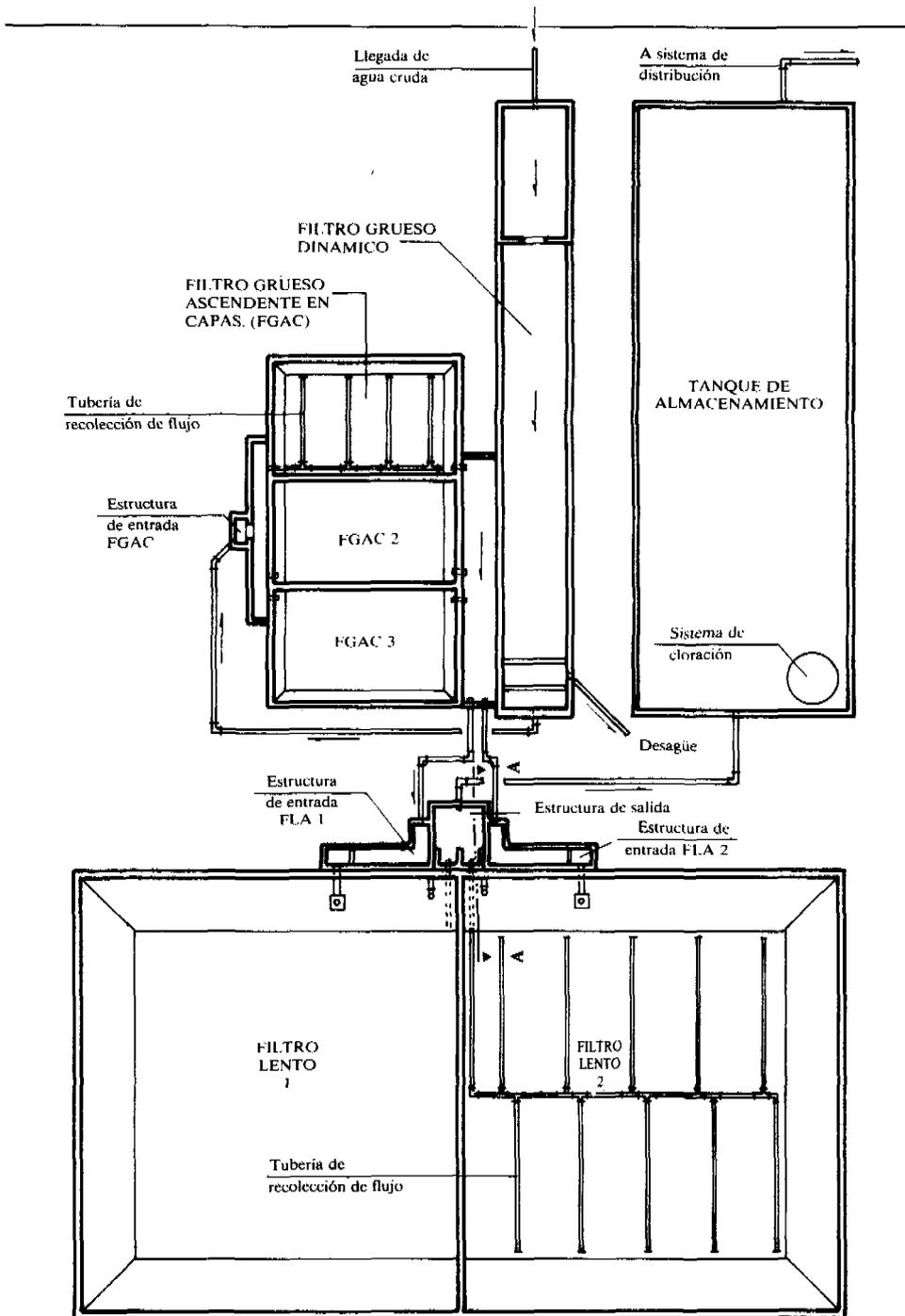
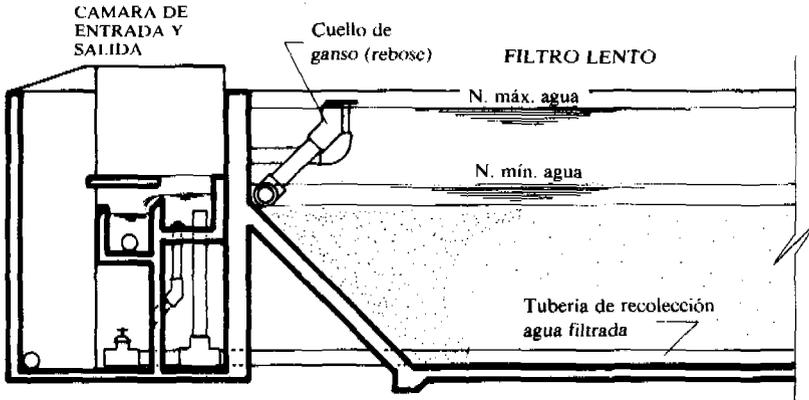


Figura 8.2.A: Esquema de la planta de tratamiento de la Parcelación El Retiro, Cali, Colombia.



CORTE A-A

Figura 8.2.B: Detalles de la estructura de salida de los filtros lentos de la Parcelación El Retiro, Cali, Colombia.

FILTROS LENTOS

Información general:

Caudal de diseño:	9,15 lps
Tasa de filtración:	0,15 m ³ /m ² /h
Área de filtración total:	109 m ²
Número de unidades:	2
Forma geométrica:	Tronco de pirámide
Dimensión de la losa:	
Longitud:	10 m
Ancho:	9,85 m
Espesor máximo del lecho filtrante:	1,22 m
Espesor mínimo del lecho filtrante:	0,80 m

Diseño estructural:	Cuarto estructural con paredes inclinadas 60° (Taludes revestidos)
Control:	A la entrada

CANTIDADES TOTALES DE MATERIAL FILTRANTE

Grava:	36 m ³
Arena:	180 m ³
Número de válvulas:	4
Número de compuertas:	2

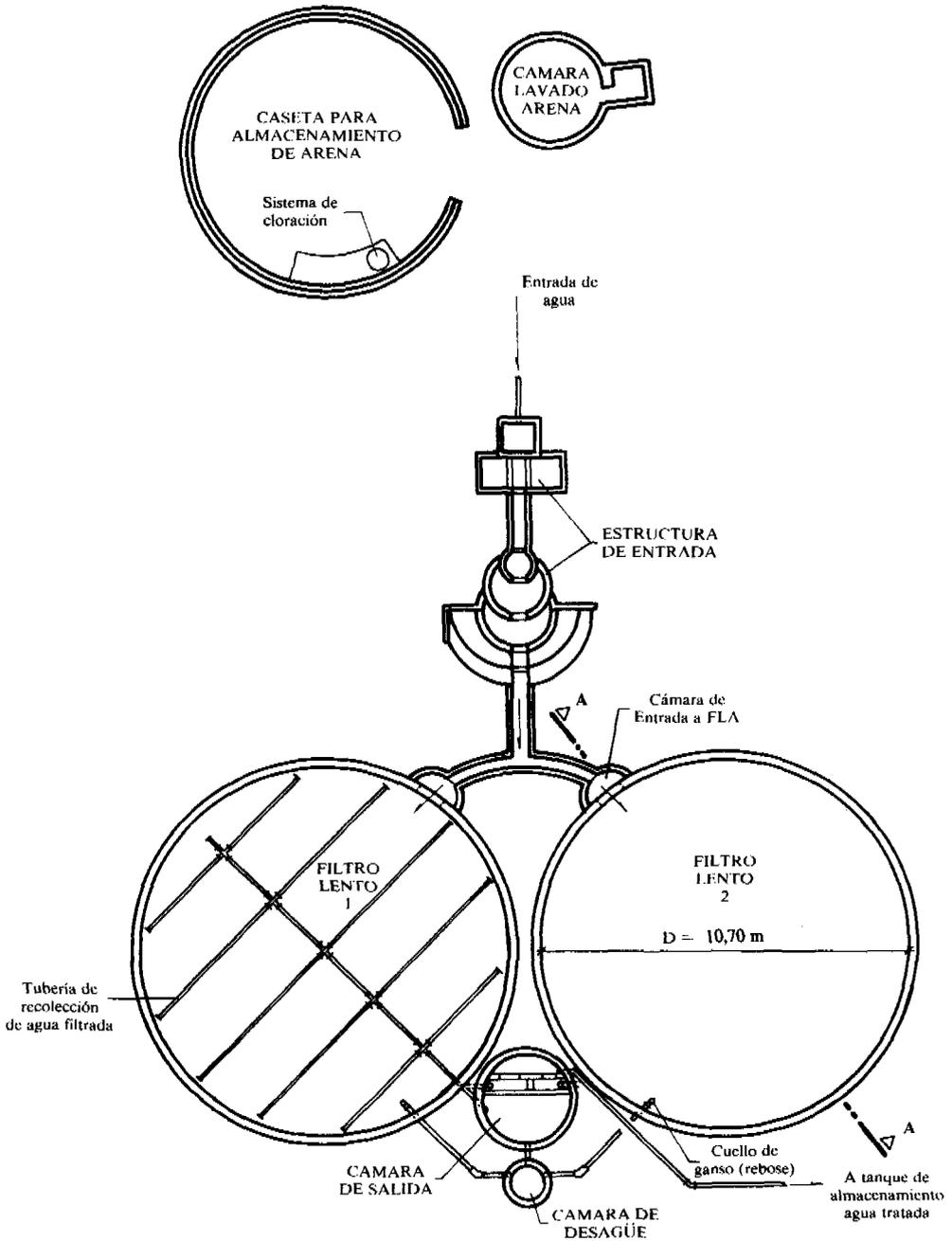


Figura 8.3.A: Esquema de la planta de tratamiento de la Vereda La Sirena, Cali, Colombia.

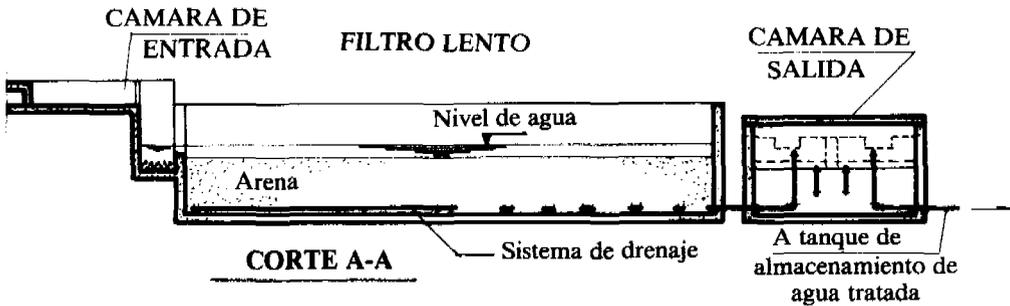


Figura 8.3.B: Detalles del filtro lento de arena de la Vereda La Sirena, Cali, Colombia.

FILTROS LENTOS

Información general

Caudal de diseño:	7,5 lps
Tasa de filtración:	0,15 m ³ /m ² /h
Area de filtración total:	180 m ²
Número de unidades:	2
Forma geométrica:	Circular
Diámetro de cada filtro:	10,7 m
Altura de cada filtro:	2,15 m
Altura del lecho de soporte:	0,20 m
Altura del lecho filtrante:	1,00 m
Altura para variación de niveles:	0,65 m
Altura mínima de agua con el filtro limpio:	0,2 m

Diseño estructural:	Mampostería estructural
Control:	A la entrada

CANTIDADES TOTALES DE MATERIAL FILTRANTE

Grava:	36 m ³
Arena:	180 m ³
Número de válvulas:	4
Número de compuertas:	2

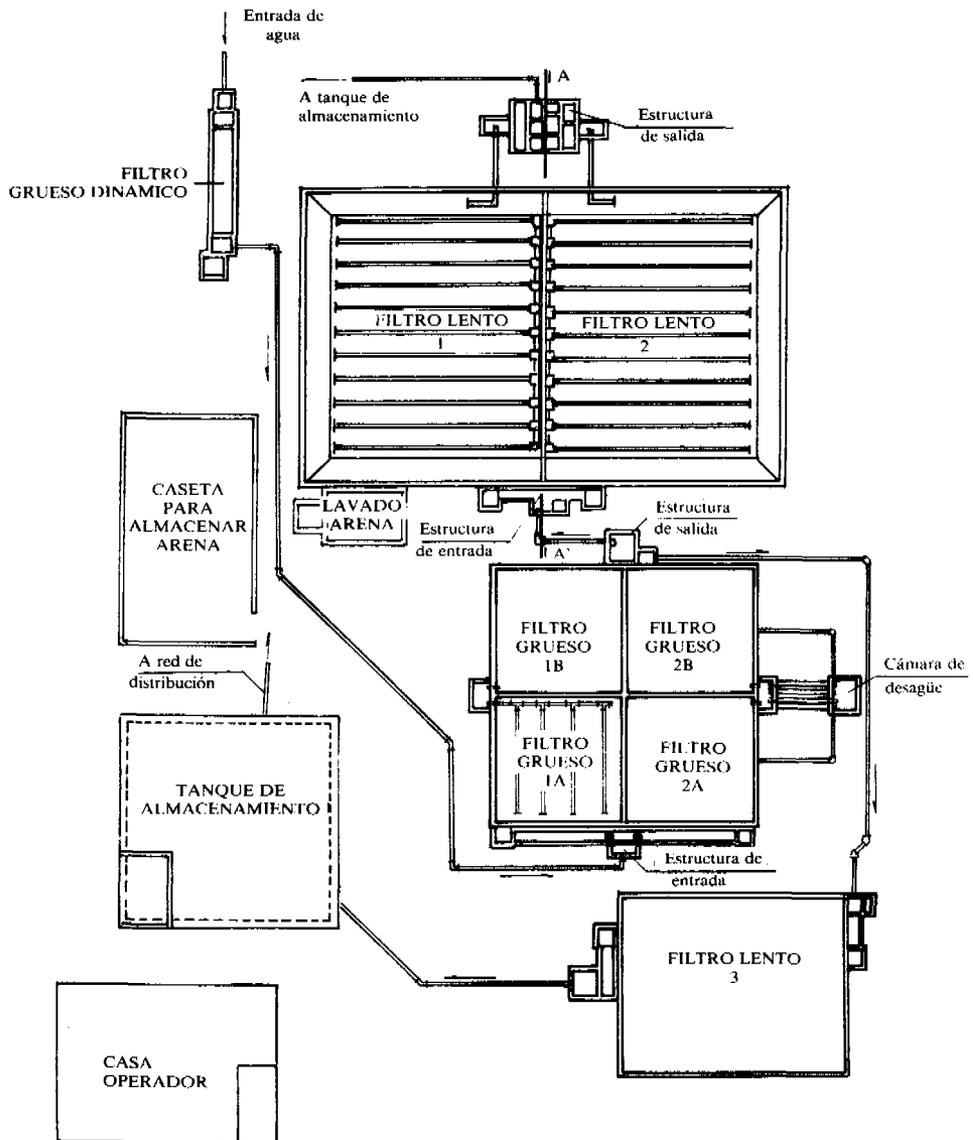


Figura 8.4.A: Esquema de la planta de tratamiento de la Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.

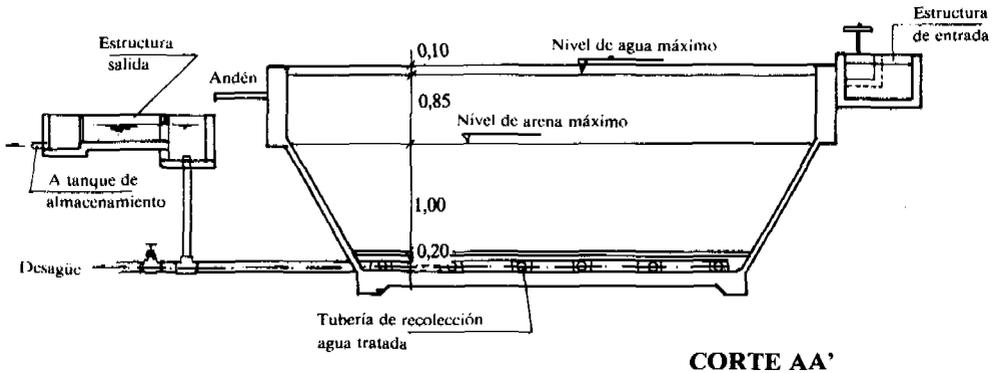


Figura 8.4.B: Detalle del filtro lento de arena de la Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.

FILTROS LENTOS

Información general

Caudal de diseño:	7,6 lps	Altura máxima de agua en el filtro:	0,80 m
Tasa de filtración:	0,16 m ³ /m ² /h	Borde libre:	0,10 m
Area de filtración total:	169 m ²	Altura total:	2,66 m
Número de unidades:	2	Diseño estructural:	Taludes revestidos
Forma geométrica:	Tronco de pirámide	Control:	A la entrada y a la salida
Dimensiones de la losa de fondo:			
Longitud:	9,8 m	CANTIDADES TOTALES DE MATERIAL FILTRANTE	
Ancho:	8,6 m	Grava:	44 m ³
Inclinación de los taludes:	60°	Arena:	331 m ³
Altura del lecho de soporte:	0,20 m	número de válvulas:	4
Altura del lecho de arena inicial:	1,51 m	Número de compuertas:	2
Altura mínima del lecho de arena:	1,0 m		
Altura mínima agua sobrenadante:	0,18 m		

9. Consideraciones para la construcción

Un buen diseño no garantiza necesariamente la buena construcción de una planta de filtración lenta, ésta depende de factores tales como: la calidad de los materiales utilizados en la construcción, la mano de obra disponible y la interventoría que se proporcione durante la construcción. Con mucha frecuencia y especialmente en áreas rurales, no se presta atención suficiente a la construcción, la calidad y la composición de los materiales empleados, lo que da lugar a muchas obras con una vida útil corta.

Por ejemplo, la arena utilizada para hacer concretos en las áreas rurales puede contener arcilla y sustancias orgánicas, pero si no se limpia o selecciona, harán que el hormigón sea de menor resistencia. El concreto también será de menor calidad y menos durable si no se cura en forma adecuada, por lo tanto, la calidad y durabilidad de las estructuras dependerán del cuidado que tenga el contratista o la firma constructora. Es necesario discutir aspectos técnicos previamente con el contratista y comprobar el progreso de las obras con regularidad, especialmente si el contratista no está familiarizado con los nuevos materiales que se están utilizando.

Las primeras actividades que se deben realizar son la demarcación de linderos con estacas, la limpieza y descapote del terreno, seguido de la construcción del campamento para el almacenamiento de materiales como tuberías, cemento y válvulas. Luego se realiza el replanteo de las estructuras y se fijan los sitios de excavación y vaciado de concreto destinado a cimientos.

En suelos con buena capacidad para resistir cargas y que presenten buena estabilidad, se usa una cimentación de tipo superficial; los sitios que requieren una cimentación especial y/o profunda, presentan un mayor incremento de los costos de construcción, recomendándose en lo posible un cambio de sitio.

Primero es necesario colocar el refuerzo de la losa, así como también el refuerzo que conecta la losa con los muros. Después se debe vaciar el piso de hormigón y dejarlo curar adecuadamente manteniéndolo mojado durante varios días, actividad que también hay que hacer si se usa ferrocemento para las paredes. Luego se coloca el encofrado exterior, tras lo cual se ponen en posición el refuerzo de las paredes y las tuberías que pasan a través de ellos. Cuando se han colocado correctamente todos los refuerzos y tuberías, se instala la formaleta interior y se alista el concreto para fundir los muros; preferiblemente no se debe interrumpir el vaciado del concreto ni hacerse en el momento más caluroso del día. Un interventor calificado debe prestar mucha atención a la preparación del concreto, pues esto es lo que determina en gran parte la resistencia y la vida útil de la construcción. También es preciso prestar atención a la compactación

y curado del hormigón. La compactación se obtiene con la acción de un vibrador en el concreto, y el curado se puede hacer colocando una capa de agua sobre la losa inmediatamente después de verter el hormigón, para mantenerlo mojado durante varios días y dejar que ocurra el endurecimiento químico.

El hormigón también puede curarse cubriéndolo con tela, papel, hojas de plátano, arena o aserrín y rociándolo con agua a intervalos durante todo el día.

Cuando se efectúa un curado permanente al hormigón durante una semana, éste adquiere una resistencia excelente. Luego se debe retirar la formaleta.

9.1 PREPARACION DE UN FILTRO NUEVO

Después de la construcción, se debe inspeccionar la estructura del filtro y hacer la prueba de estanqueidad, lo que se hace llenándola de agua y cerrando todas las válvulas durante 48 horas. Si el nivel del agua baja unos pocos centímetros durante ese tiempo, se deben localizar las fugas y repararlas, y repetir el procedimiento.

Después de que concluya satisfactoriamente esta prueba, se procede a cepillar y lavar muy bien la estructura antes de llenarla con grava y arena lavada hasta el nivel indicado en el diseño (Tabla 9.1).

Tabla 9.1 Resumen de los procedimientos de preparación del filtro de arena

Procedimientos	Detalles
1. Comprobar la estanqueidad	<ul style="list-style-type: none"> — Cerrar todas las válvulas — Llenar con agua la estructura del filtro y observar el nivel del agua
2. Limpiar la estructura del filtro y la caja de salida	<ul style="list-style-type: none"> — Cepillar las paredes y el piso y lavarlos muy bien.
3. Llenarlo con grava	<ul style="list-style-type: none"> — Lavar antes la grava — Distribuir la grava uniformemente sobre el sistema de drenaje
4. Llenarlo con arena	<ul style="list-style-type: none"> — Lavar y cernir antes la arena — Distribuir la arena uniformemente sobre la grava hasta una altura de 0,8 m como mínimo

9.2 MATERIALES DE CONSTRUCCION PARA FILTROS LENTOS DE ARENA

La calidad y las características de los materiales de construcción empleados en los filtros lentos de arena varían de un lugar a otro y de acuerdo con factores como la naturaleza, la calidad de las materias primas, las condiciones climáticas y la atención prestada al manejo, procesamiento y acabado.

Concreto

El concreto consta de una mezcla de arena, grava, cemento y agua. A menudo será necesario comprobar la calidad de estos componentes, para lo cual se han establecido normas internacionales de métodos de prueba. Las pruebas no tienen que hacerse en el lugar de la obra, se pueden examinar las muestras en el laboratorio.

La calidad del cemento local generalmente se conoce, por lo que no es necesario comprobarlo. Pero, hay que tener cuidado de no guardarlo demasiado tiempo; su almacenamiento debe ser en un lugar seco. La arena y la grava deben ser examinadas para determinar el contenido de materia orgánica, y además conocer la distribución del tamaño, la cual debe cumplir ciertas especificaciones. El agua que se vaya a utilizar debe ser limpia, fresca y clara y estar limpia de sustancias químicas, turbiedad y a una temperatura media (18°C).

La proporción de estos tres componentes para la mezcla de concreto dependerá de sus características. Una mezcla de un litro de cemento (1.25 kg) por 2,0 litros de arena y 3,0 litros de grava generalmente dará buenos resultados para construcciones en condiciones de estanqueidad, si se prevé el uso de un aditivo impermeabilizante.

Es aconsejable basar la mezcla en el peso del cemento en lugar del volumen.

Para garantizar que el concreto sea impermeable, es preciso tomar las siguientes medidas:

- Debe prestarse atención a la distribución del tamaño de los granos, especialmente el contenido del material fino. Este consiste en el cemento y la fracción de partículas de arena menores de 0,3 mm. En la Tabla 9.2 se indican los niveles recomendados.
- La cantidad de agua por metro cúbico de hormigón debe ser la más baja posible y suficiente para hacerlo "manejable". El efecto que la variación en la cantidad de agua inicial ejerce sobre la resistencia a la compresión de varias mezclas de hormigón se muestra en la Figura 9.1. Puede llegarse a la conclusión de que si se aumenta el contenido de agua de 160 a 180 l/m³, la resistencia a la compresión definitiva disminuirá de 245 a 210 kg/cm². Dado que la arena y la grava ya tendrán adherida

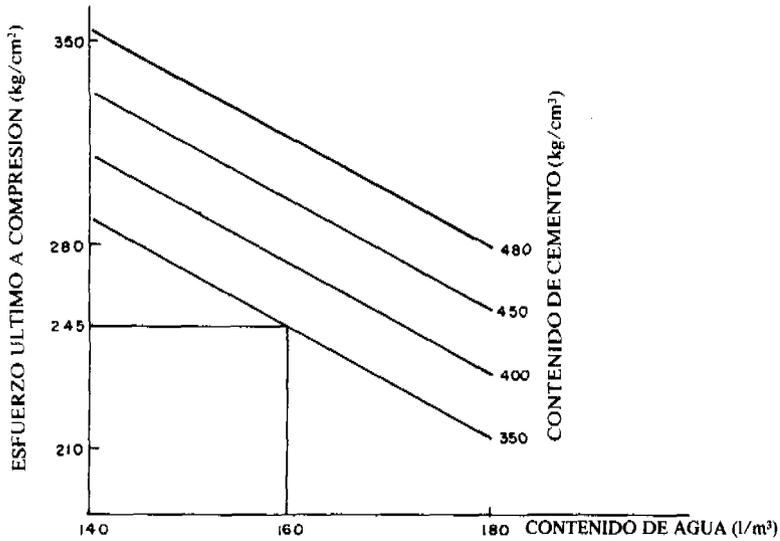


Figura 9.1: Relación del contenido de agua, contenido de cemento y los esfuerzos de compresión del concreto.

cierta cantidad de agua, que puede ser muy alta, es necesario tenerla en cuenta al calcular la cantidad que hay que agregar. En consecuencia, en 1 m^3 de concreto no se deben tener relación agua-cemento mayores a 0,55

- Cuando es necesario economizar cemento, se aconseja aumentar el tamaño máximo de los granos de grava para poder reducir el contenido de cemento, por ejemplo, 50 mm en vez de los acostumbrados 30 mm.
- Es preciso prestar buena atención al curado del hormigón. Es importante mantener húmeda la formaleta y la superficie del hormigón vertido rociándolos frecuentemente con agua, preferentemente a una temperatura que no exceda de 20° a 25°C , impidiendo así temperaturas altas y la evaporación rápida. Esto puede hacerse erigiendo una cubierta plástica temporal sobre el hormigón.
- Para el acero de refuerzo del concreto se requiere información sobre la calidad del mismo disponible en la localidad.

Tabla 9.2 Contenido recomendado de los materiales finos para agregado normal y grande del hormigón.

Característica	Tamaño máximo (mm)	Contenido de finos (kg/m ³)
Concreto normal	10	500-550
	20	425-475
	30	375-425
Concreto con agregado grande	50	300-350
	80	250-300

Ferrocemento

El ferrocemento consiste en un mortero de arena-cemento que se refuerza bien con varillas y malla de gallinero (porcentaje de refuerzo en peso: 0,9 - 1,1%). El refuerzo consta de una red de varillas verticales y horizontales de pequeño diámetro (4 - 5mm) con una separación de 50 a 120 mm entre sí. Se coloca una capa de malla de gallinero (malla de 20 mm) a ambos lados de esta red, que luego se sumerge en mortero hecho de una parte de cemento y dos de arena. La arena no debe contener sedimento y debe estar bien gradada. La arena gruesa tiene la ventaja sobre la arena fina de que la contracción será menor, pero el mortero será menos manejable.

Preferiblemente, se debe usar cemento fresco para el mortero, pero si no lo hay, se debe tamizar antes de ponerlo en la mezcla.

El ferrocemento es muy apropiado para elementos estructurales curvos, como los filtros lentos de arena circulares, porque no ocurren momentos de flexión y el grado de deformación es pequeño. Las ventajas principales también son su bajo costo, sencillez de construcción y durabilidad.

Se utiliza un molde interior o exterior cuando se construyen estanques de ferrocemento. Cuando se emplea un molde interior, el proceso de construcción es el siguiente:

- La red de varillas horizontales y verticales de pequeño diámetro y una capa de malla de gallinero son colocadas en el molde y cubiertas con una capa espesa (10 mm) de mortero.
- Se extiende el mortero sobre el refuerzo con una "llana" o con la mano hasta el molde interior. Después se coloca una segunda capa de malla de gallinero y de mortero sobre la primera.

- ° Por lo general en el término de dos horas, se añaden capas sucesivas de la misma manera hasta alcanzar el espesor requerido de la pared, generalmente entre 40 y 80 mm.

Es preciso hacer un curado cuidadoso, sobre todo en un clima caliente y seco, para asegurar la adherencia satisfactoria de las capas sucesivas; esto se puede verificar simplemente frotando una piedra sobre la superficie del tanque. Un sonido bastante alto indica buena construcción, mientras que un sonido bajo en una sección sugiere que las capas sucesivas no están bien adheridas. Para corregir esto se puede cortar y retirar la parte débil de la capa más alta, devastando la penúltima capa, y colocando otra capa de malla de gallinero sobre el sitio dañado. Luego se debe aplicar una capa de mortero y curarse adecuadamente. Las fugas de los tanques pueden repararse de una manera similar, pero si se cura bien el mortero y se emplea arena limpia y cemento fresco, no es muy común que presenten secciones débiles.

Para proteger la estructura contra las inclemencias del tiempo y obtener un alto grado de estanqueidad se requiere darle un acabado con una mano de mortero impermeabilizante o goma natural. Se puede envolver el tanque en plástico para protegerlo de las aguas subterráneas ácidas al construir por debajo del nivel de la superficie. Puede obtenerse información actualizada sobre las aplicaciones del ferrocemento del Ferrocement Information Centre, Bangkok (Apéndice VII).

Mampostería

La mampostería y el mortero deben ser de superior calidad para obtener una estructura estanca. El espesor de la pared de los filtros circulares construidos debajo del nivel del suelo con un diámetro de 5 - 10 m, debe ser de 0,2 - 0,3 m y se debe comprobar cuidadosamente para ver si tiene fugas. Los puntos importantes en su preparación son:

- Las uniones verticales entre las unidades de mampostería nunca deben colocarse una encima de la otra.
- Los ladrillos no se deben dividir en pedazos más pequeños que la mitad del tamaño estándar disponible localmente.
- Se deben usar los ladrillos que han estado cerca del fuego del horno porque son más fuertes.
- Los ladrillos o las piedras que se vayan a utilizar no deben tener un porcentaje de absorción de más del 25%.

Los morteros para la mampostería constan de cemento, arena y agua. Una mezcla de una parte de cemento y 2,0 - 3,0 de arena es apropiada. Si los ladrillos son de poca resistencia, entonces también debe reducirse la resistencia del mortero a 1,4 por

ejemplo, para evitar diferencias de contracción entre los ladrillos y el mortero. Esta producirá una construcción menos rígida y estanca, por lo que deben frotarse las paredes con una brocha sumergida en una mezcla de una parte de cemento y una de arena para mejorar su estanqueidad. Si se desea más información sobre los tanques de ladrillo poco profundos, y sobre cómo probar la resistencia de las paredes de ladrillo, ver Costa et al (1981).

La mampostería de piedras de cantera puede emplear una gran cantidad de mortero, en particular si las piedras son irregulares y los espacios entre ellas no se llenan con piedras más pequeñas. Si éste es el caso, debe considerarse si la construcción de ferrocemento sería más eficiente. También se puede aplicar una combinación de mampostería y ferrocemento. Se construye una pared de mampostería de 5 - 10 cm y se emplea como molde exterior, en cuyo interior se coloca una capa de 2 - 3 cm de ferrocemento. Esta estructura combina la ventajosa característica de estanqueidad del ferrocemento con la mayor resistencia a impactos y fácil encofrado de la mampostería.

9.3 SELECCION DE LA ARENA DE FILTRO

Los filtros lentos de arena requieren grandes cantidades de arena, y por tanto su costo puede ser considerable, en particular si hay que transportarla una larga distancia. Afortunadamente, la arena del filtro a menudo puede encontrarse en la localidad. El que la arena local sea apropiada depende de los siguientes factores:

- El tamaño y distribución de los granos.
- El contenido de sedimentos.
- La solubilidad.

Tamaño y distribución de los granos

Los parámetros más importantes son: el tamaño de los granos, que se determina por el diámetro efectivo (d_{10}), y su distribución granulométrica determinada por el coeficiente de uniformidad (C_u). Estos parámetros afectan la eficiencia de purificación del filtro lento de arena. El diámetro efectivo, o el tamaño efectivo, es la abertura del tamiz a través del cual pasará el 10% (por peso) de los granos (es decir d_e o d_{10}). El coeficiente de uniformidad es la relación entre el diámetro efectivo y la abertura del tamiz a través del cual pasará un 60% (por peso) de los granos (d_{60}): coeficiente de uniformidad = d_{60} / d_{10}

La arena empleada en los filtros lentos debe ser relativamente fina y tener un diámetro efectivo entre 0,15 y 0,35 mm, y un coeficiente de uniformidad menor de cinco, pero preferiblemente entre 2,0 y 3,5. Como se explicó antes, la arena más fina dará mejor resultado en los filtros en función de la calidad del agua producida, pero

aumentará la pérdida en la carga hidrostática del sistema, lo que reduce el período entre dos limpiezas sucesivas.

El tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad se identifican con un análisis granulométrico, y los resultados pueden disponerse en un cuadro o trazarse en un gráfico (Figura 9.2). El procedimiento es el siguiente:

- Se toma una muestra representativa de la arena, por ejemplo, una mezcla de la arena de cuatro o cinco muestras de un área marcada con estacas. Se lava bien la muestra para extraer las impurezas y se deja secar.
- Después se tamiza una cantidad de aproximadamente 500 g de arena seca pasándola a través de una serie de tamices estándar, con el más grueso en la parte superior y el más fino en la inferior. Se continúa el tamizado durante un período de 15 minutos y se usa con regularidad un agitador mecánico de tamices.
- Se pesa la arena que queda en el tamiz más grueso, y se le va añadiendo la que quedó retenida en cada uno de los tamices subsiguientes.

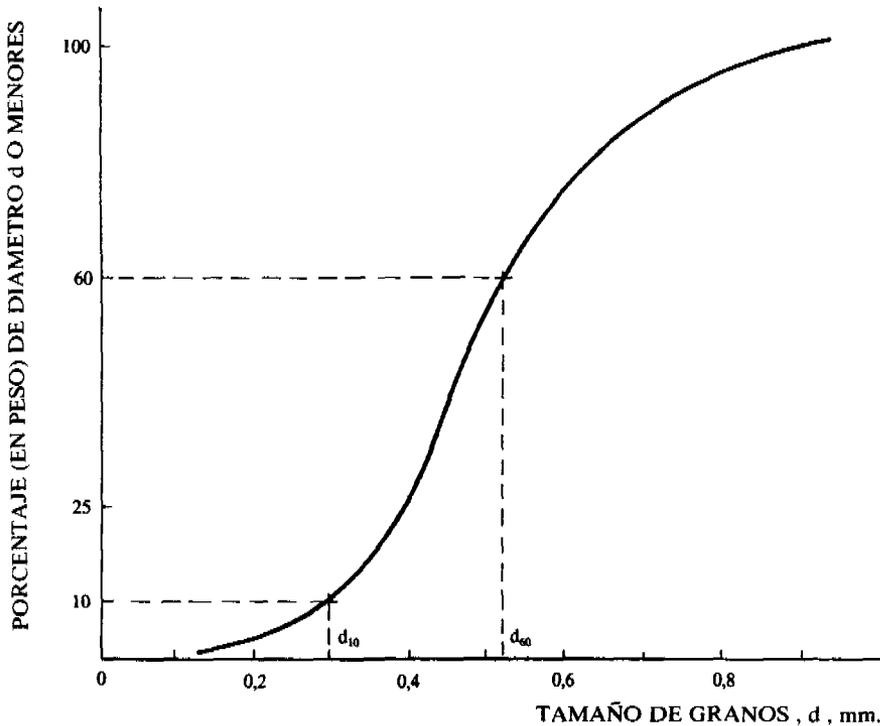


Figura 9.2: Ejemplo de distribución de los tamaños de granos de arena (Huisman y Wood, 1974).

Si no es posible el análisis de laboratorio durante el estudio del lugar, se puede tener una indicación del adecuado tamaño de la arena pasando una muestra por los tamices ASTM No. 18 (1,00 mm) y No. 70 (0,21 mm). Si la mayoría de las partículas de arena pasa por el No. 18, pero queda retenida en el No. 70, o sea que no pasa más de alrededor del 10% a través de él, entonces la arena es apropiada para usarla en un filtro lento. Si la arena no reúne esta especificación aproximada, sería preferible seleccionar otra fuente de arena. Sin embargo, si se retiene una proporción considerable en el tamiz No. 18, se puede utilizar la arena de esta fuente, si se tamiza primero. También se puede mezclar con arena de otro lugar para obtener las especificaciones requeridas.

Contenido de lodo

La arena que contiene lodo tiene que ser lavada intensamente antes de usarla. Una indicación del contenido de lodo puede obtenerse colocando 100 ml de agua limpia en un cilindro de medir, y agregando la muestra de arena para que el volumen alcance los 200 ml. Luego se agita la mezcla vigorosamente y se deja asentar la suspensión. La turbiedad del agua del cilindro, así como el sedimento, dan una buena indicación del contenido de lodo en la arena. Como guía, la arena tiene que ser lavada antes de colocarla en el filtro si el contenido de lodo es mayor del 1%.

Solubilidad en ácido

La arena del filtro no debe contener considerables cantidades de carbonato de calcio, porque éste puede disolverse gradualmente y aumentar la dureza del agua. En consecuencia, la solubilidad del ácido no debe exceder del 5% después de 30 minutos.

Debe observarse sin embargo que éste no es un requisito estricto, pues algunas veces una solubilidad mayor es una ventaja. Sólo el agua que contenga dióxido de carbono agresivo, por ejemplo, podrá disolver el carbonato de calcio, perdiendo así su efecto nocivo. De otro modo, el dióxido de carbono podría haber corroído la red de distribución.

La solubilidad en ácido puede determinarse sumergiendo una muestra de arena lavada de 10 g en 32 ml de ácido clorhídrico concentrado, diluido a razón de uno por uno con agua destilada. Esto se deja reposar a temperatura ambiente durante 30 minutos, revolviéndose ocasionalmente; luego se lava en agua destilada y se seca a 110°C durante una hora, y se pesa. El porcentaje de solubilidad en ácido se puede calcular dividiendo la pérdida de peso por el peso original, y multiplicando el cociente por 100.

10. Procedimientos de operación y mantenimiento

10.1 EL PAPEL DEL OPERADOR

La planeación, el diseño y la construcción de un sistema de tratamiento de agua son etapas muy importantes que si no se realizan adecuadamente llevan al fracaso a las obras; sin embargo, para cumplir con el propósito final de brindar agua de bajo riesgo sanitario y de manera continua a la comunidad, deberá garantizarse una correcta operación y mantenimiento. Dependiendo del tamaño del sistema de abastecimiento, la capacidad de pago y organización de la comunidad, esta función la cumplen una o varias personas conocidas como operadores.

La condición inicial para que el operador pueda desempeñar bien su trabajo es que la planta de tratamiento haya sido adecuadamente diseñada y construida. Debe recibir capacitación en aspectos técnicos de funcionamiento, poseer el material didáctico correspondiente y contar con asesoría oportuna y conveniente; debe estar dotado de las herramientas necesarias, disponer de una reserva de materiales para afrontar eficientemente las reparaciones a que haya lugar y recibir remuneración justa por su trabajo.

La supervisión preferiblemente debe ser responsabilidad de una autoridad regional o nacional, con la frecuencia que sea posible y sin previo aviso. También se requieren exámenes periódicos de la salud del operador u operadores para asegurar que no se empleen portadores de enfermedades entéricas para la limpieza de los filtros, ya que un portador de cólera, por ejemplo, puede excretar 10^6 vibriones de cólera por día y no obstante sentirse perfectamente bien (Feachem, 1983). Además, es necesario controlar los hábitos sanitarios de los trabajadores mientras laboran en el filtro.

En la mayoría de los casos, dentro de las funciones del operador también se incluirá el mantenimiento del sistema de distribución y la reparación de los grifos. Las consultas y discusiones regulares con la comunidad, por ejemplo al inspeccionar la red de distribución, ayudarán a establecer unas buenas relaciones y seguramente aumentarán su aprecio y voluntad para proporcionar apoyo.

Hay también un aspecto promocional en el trabajo del operador, porque éste necesita discutir con la comunidad la importancia del agua tratada y su almacenamiento adecuado. Si, por ejemplo, el agua purificada se recoge en un balde sucio o es recontaminada, los esfuerzos del operador habrán sido nulos. Una buena comunica-

ción con la comunidad brindará por ejemplo, la oportunidad de mantenerla informada con anticipación al respecto de cualquier desperfecto y reparación, lo que permitirá a los vecinos almacenar agua durante esos períodos.

Por todas estas circunstancias el operador no sólo debe tener los conocimientos y destrezas para realizar su trabajo, sino la actitud para comunicarse con la comunidad; es deseable entonces que pertenezca a la localidad y goce de respeto y credibilidad.

Adicionalmente, es importante que sepa leer y escribir y en lo posible que haya participado en la construcción de la obra.

Para ayudar al operador, deben detallarse las tareas más importantes y su frecuencia.

Las tareas incluidas en la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento que utilizan filtros lentos de arena, en general no difieren demasiado, su frecuencia depende mucho de la situación local, al igual que de otras tareas por realizar; en consecuencia, se debe preparar un calendario de trabajo para cada planta, tal como se presenta en la Tabla 10.1.

La Tabla 10.1 no incluye aquellas tareas que tienen que hacerse sólo una vez. En las siguientes secciones se establecen procedimientos detallados para todas las tareas técnicas asociadas con el proceso de filtración por medio de filtros lentos de arena, y se refieren al diagrama del filtro lento de arena regulado a la entrada presentado en la Figura 10.1. La operación de un filtro lento de arena regulado a la salida (Figura 10.2) difiere sólo un poco y esas diferencias serán explicadas.

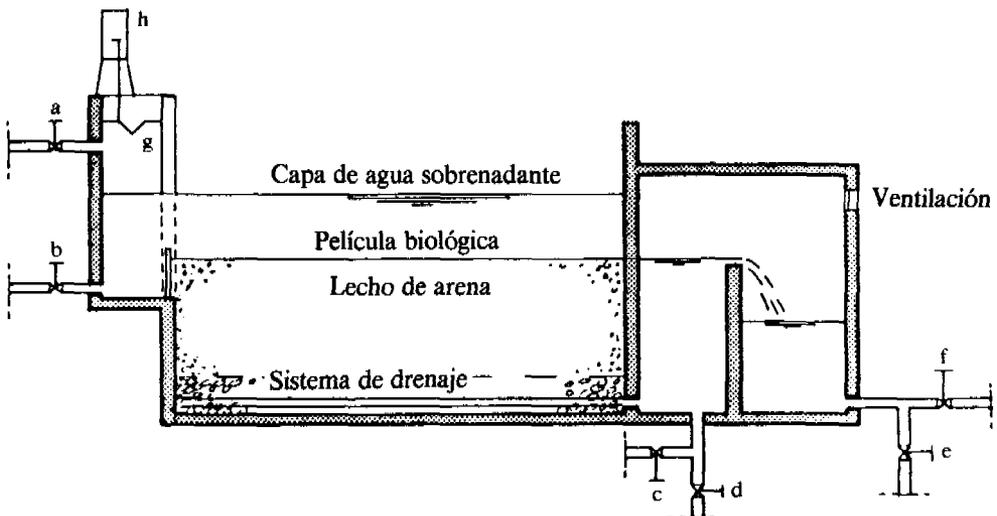


Figura 10.1: Válvulas y otros accesorios básicos en un filtro regulado a la entrada.

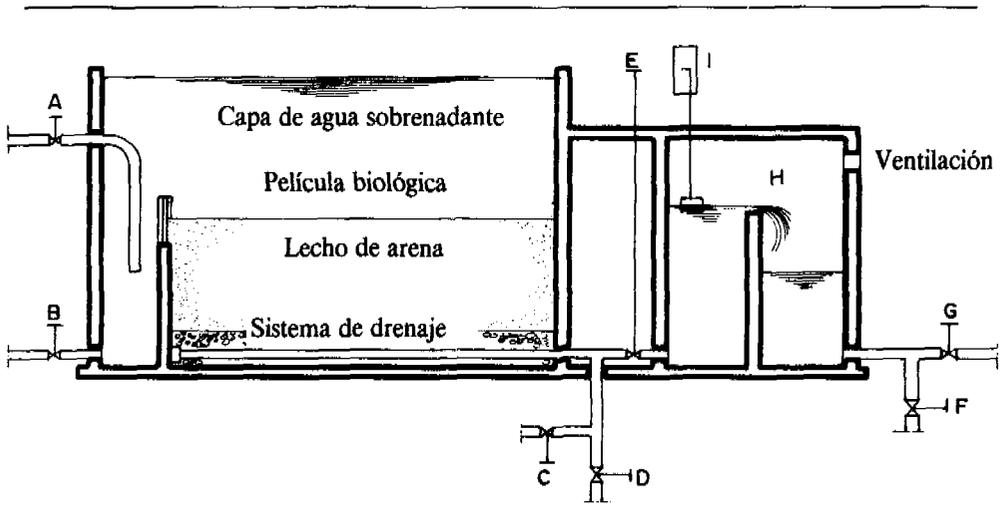


Figura 10.2: Válvulas básicas en un filtro regulado a la salida.

El trabajo del operador es más fácil con las herramientas y equipo adecuados. Sólo se necesitan herramientas simples, que a menudo pueden hacerse en la localidad; en la Figura 10.3 se muestran las más indispensables.

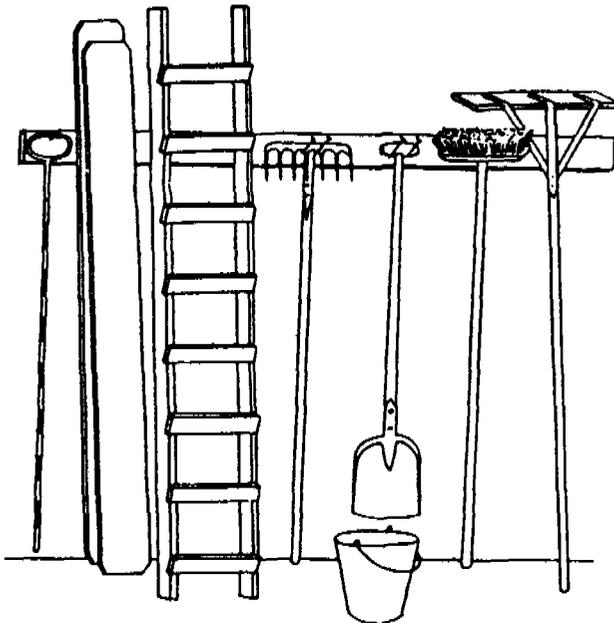


Figura 10.3: Herramientas usadas para la operación y mantenimiento.

Tabla 10.1 Calendario de actividades del operador en un sistema de tratamiento que incluye bombeo.

Frecuencia	Actividad
Diariamente	<ul style="list-style-type: none"> — Verificar la captación de agua cruda (algunas captaciones se pueden visitar con una frecuencia baja). — Revisar el filtro lento de arena: <ul style="list-style-type: none"> • Verificar y ajustar la velocidad de filtración. • Verificar el nivel del agua en el filtro. • Verificar el nivel del agua en la cámara de agua filtrada. • Retirar el material filtrante. • Tomar muestras de agua y determinar su calidad. — Revisar todas las bombas. — Llevar el diario de la planta de tratamiento.
Semanalmente	<ul style="list-style-type: none"> — Revisar y engrasar las bombas y partes móviles. — Verificar la existencia de combustible y solicitar más si es necesario. — Inspeccionar la red de distribución y grifos domiciliarios y reparar cuando sea necesario. — Comunicarse con los usuarios. — Limpiar el sitio de la planta.
Mensualmente o con menos frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> — Raspar el lecho filtrante o filtros. — Lavar la arena raspada y almacenarla.
Anualmente o con menos frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> — Lavar la cámara de agua filtrada. — Verificar que el filtro y la cámara de agua filtrada no tengan fugas.
Cada dos años o con menos frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> — Realizar rearenamiento de las unidades de filtración.

10.2 PUESTA EN SERVICIO DE UN FILTRO NUEVO

El procedimiento para poner en servicio un filtro nuevo lo lleva a cabo el operador, bajo supervisión. Con todas las válvulas cerradas, se abre parcialmente la conexión provisional (c) de llenado para dejar que el agua fluya lentamente hacia arriba desde el fondo, a través del sistema de drenaje, la grava y el lecho de arena. Cuando el nivel de agua alcanza 0,1 - 0,2 m sobre la superficie de arena, se cierra la conexión provisional c. Este método de llenado asegura que se expulse el aire acumulado en el sistema, especialmente de los vacíos entre granos de arena, siempre y cuando la velocidad de llenado sea lenta (de 0,1 - 0,2 m/h). Este procedimiento tomará varias horas.

Cuando se trate de los llenados del filtro después de una limpieza debe emplearse agua tratada del filtro que está en operación. Sin embargo, con los filtros nuevos esto no es posible y debe realizarse la conexión temporal que se ha mencionado entre la salida de la unidad de pretratamiento o el agua cruda, y la cámara de salida de filtros lentos.

Si la arena no se ha nivelado correctamente, las irregularidades pueden detectarse cuando en el llenado ascendente, el nivel del agua alcanza la superficie de la misma. Entonces debe abrirse la válvula de vaciado (d), hasta que el agua baje a 0,1 m por debajo de la superficie de la arena. Estas irregularidades deben corregirse ya que al drenar el filtro para la limpieza, pueden surgir problemas como resultado de los charcos del agua que se acumulan en las depresiones. Si se presenta material flotante éste puede ser extraído usando el accesorio o válvula b.

Puesta en marcha de un filtro con control a la entrada

Cuando el agua ha alcanzado el nivel requerido de 0,1 - 0,2 m por encima de la superficie de arena, se puede iniciar el proceso de filtración. Esto se hace suspendiendo la conexión temporal (c) y abriendo gradualmente la válvula de entrada (a) para dejar que el agua pase al filtro a través de la caja de entrada. Al principio la velocidad de flujo debe ser de 0,02 m/h, y aumentarse gradualmente 0,02 m/h cada hora, hasta alcanzar la velocidad de filtración según diseño (generalmente 0,1 ó 0,15m/h). Si las velocidades del flujo durante el proceso de maduración son demasiado bajas, puede ocurrir un crecimiento excesivo de algas verdes unicelulares que pueden penetrar en el filtro.

El filtro ahora debe funcionar continuamente durante varias semanas para dejar que se "madure", lo que tomará de 1 a 3 semanas en las regiones tropicales y más tiempo en las más templadas. El tiempo depende también de la naturaleza del agua cruda, porque mientras menos microorganismos contenga, más durará el proceso de maduración.

A medida que prosigue la maduración, y que aumenta el número de microorganismos, ocurrirá un leve aumento en la pérdida de la carga hidráulica en el lecho filtrante y la capa biológica o "piel" del filtro gradualmente se irá haciendo visible. Estos son signos de que la maduración está progresando satisfactoriamente.

Durante el proceso de maduración el efluente no es bacteriológicamente seguro, por lo cual deberá clorarse, desecharse o pasarse por otro filtro. En la Figura 3.3 se ilustra la calidad bacteriológica del efluente de un filtro lento hasta alcanzar maduración completa.

La calidad del agua filtrada deberá juzgarse preferiblemente a través del análisis bacteriológico y pruebas de turbiedad semanales durante las primeras dos semanas, seguidas de muestras diarias hasta que los análisis indiquen que el agua no está contaminada. Entonces se puede pasar el agua al sistema de abastecimiento de agua,

para lo cual se cierra la válvula (e) y se abre la válvula (f). Si no se puede hacer un examen bacteriológico se puede usar la determinación de amoníaco como alternativa práctica, teniendo en cuenta que este no debe estar presente durante el día en el agua producida. Si no se puede hacer el examen bacteriológico ni el de amoníaco, se harán pruebas para evaluar la turbiedad, dejando pasar por lo menos tres semanas en el período de maduración después que el filtro comienza a dar agua clara. Cuando exista equipo de cloración, se puede usar el agua filtrada en el período de maduración, siempre y cuando sea clorada adecuadamente y se compruebe con regularidad el contenido de cloro residual. (Apéndice III). En la Tabla 10.2 se resumen los procedimientos para poner en servicio un filtro nuevo.

Tabla 10.2 Procedimientos para poner en servicio un filtro nuevo (*)

Procedimientos	Detalles
Llenar con agua por el fondo	— Realizar la conexión provisional (c) hasta que el agua aparezca sobre la superficie de arena.
Corregir la nivelación de la superficie de arena	— Abrir la válvula (d) para hacer descender el nivel de agua hasta 0,1 m debajo de la superficie de arena. — Nivelar las irregularidades en la superficie de arena.
Poner en marcha el filtro	— Realizar nuevamente la conexión provisional (c) hasta que el nivel del agua alcance 0,2 m sobre la superficie de arena. — Abrir la válvula (a) de regulación del filtro y mantener la velocidad de filtración en 0,02 m/h. — Abrir la válvula (e) de desagüe del agua filtrada — Aumentar la velocidad de filtración 0,02 m/h cada hora hasta alcanzar la velocidad de diseño (generalmente 0,10 ó 0,15 m/h)
Retirar el material flotante	— Utilizar el accesorio o válvula b
Revisar la calidad del agua	— Durante el período de maduración del filtro, comprobar a diario si el agua filtrada reúne los criterios de calidad acordados para suministrarla
Pasar el agua filtrada al sistema de abastecimiento	— Cuando la calidad el agua filtrada sea aceptable, cerrar la válvula (e) de desagüe del agua filtrada y abrir la válvula (f) de distribución

(*) En un filtro regulado a la salida la velocidad de filtración se mantiene con la válvula de regulación (E), que se manipula de la misma manera que la válvula (a). (Figuras 10.1 y 10.2).

Puesta en marcha de un filtro controlado a la salida

Cuando el agua ha alcanzado el nivel requerido de 0,1 - 0,2 m por encima de la superficie de arena, se deja de llenar cerrando la conexión provisional (C) y se abre gradualmente la válvula de entrada (A), la velocidad inicial de llenado debe ser lenta para no arrastrar la arena cercana a la entrada, pero puede aumentarse a medida que sube el nivel del agua, tal como se explicó para los filtros con control a la entrada.

Cuando este nivel corresponda al de trabajo del filtro, puede ponerse en funcionamiento.

10.3 OPERACION Y AJUSTES DIARIOS

En el numeral 10.2 se ha descrito el procedimiento de puesta en marcha de un filtro recién construido hasta el punto donde la velocidad de filtración ha alcanzado el valor de operación y el agua filtrada puede suministrarse para el consumo. El filtro ha alcanzado entonces su condición normal de trabajo. En esta sección se describirá el procedimiento de operación y los ajustes rutinarios para asegurar el trabajo eficiente del filtro hasta la etapa en la cual la superficie de la arena se ha colmatado y la velocidad de filtración ha disminuido en tal forma que se debe limpiar el filtro.

Esta descripción se refiere a filtros con nivel de agua variable y cuya velocidad de filtración se controla por medio de la válvula de entrada de agua cruda (filtros con control a la entrada); filtros con nivel de agua constante, con control de velocidad de filtración por medio de válvula de agua filtrada (filtros con control a la salida) y la filtración de velocidad declinante.

Para obtener los mejores resultados de filtración es necesario que el filtro se use continuamente, día y noche, con una velocidad de filtración constante. Solamente si es imposible mantenerla constante, por ejemplo por cortes regulares del servicio de energía, deberá emplearse el método de filtración de velocidad declinante, la cual sólo podrá utilizarse con filtros con control a la salida. De ahí que uno de los objetivos más importantes del operador sea evitar los cambios bruscos en la velocidad de filtración ya que estas variaciones influyen en el proceso de purificación reduciendo la calidad del agua filtrada.

10.3.1 Filtros con control a la entrada

En estos filtros se controla la cantidad de agua que entra al filtro mediante la válvula de entrada (a), ajustándola hasta que se alcance la velocidad de filtración deseada y dejando que el nivel de agua sobrenadante varíe.

Cuando el filtro está limpio, la altura del agua sobrenadante alcanzará unos pocos centímetros por encima del nivel de la arena, estando esta altura controlada por el nivel del vertedero de salida.

A medida que el filtro se ensucia, la capa sobrenadante aumentará poco a poco su altura para poder vencer la resistencia hidráulica que opone el filtro sucio.

Cuando el filtro está colmatado, esta altura crece rápidamente hasta alcanzar el nivel del vertedero de excesos. En este punto, o antes si es necesario, hay que limpiar el filtro.

Remoción del material flotante

Toda espuma y material flotante debe removerse mediante un cedazo o similar, acoplado a una vara larga.

Medición de la velocidad de filtración

La medición del caudal e indirectamente la velocidad de filtración puede realizarse instalando un vertedero triangular y una regla graduada en caudal de aproximación. (Figura 10.4)

Regulación de la velocidad de filtración

En un filtro con control a la entrada no es necesario regular la velocidad de filtración una vez éste ha alcanzado el nivel de operación, cuando el filtro ha madurado. De ahí en adelante, hasta cuando se saca de servicio para limpieza, la velocidad se mantiene constante a menos que haya problemas en el agua de entrada.

Carrera de filtración

Cuando el filtro está limpio, el nivel del agua sobrenadante se acerca a la superficie de la arena puesto que existe muy poca resistencia al paso del agua. Por esta razón es necesario construir el nivel del vertedero del agua filtrada unos 10 - 15 cm. por encima del nivel superior de la arena filtrante, asegurando así el nivel de una capa sobrenadante.

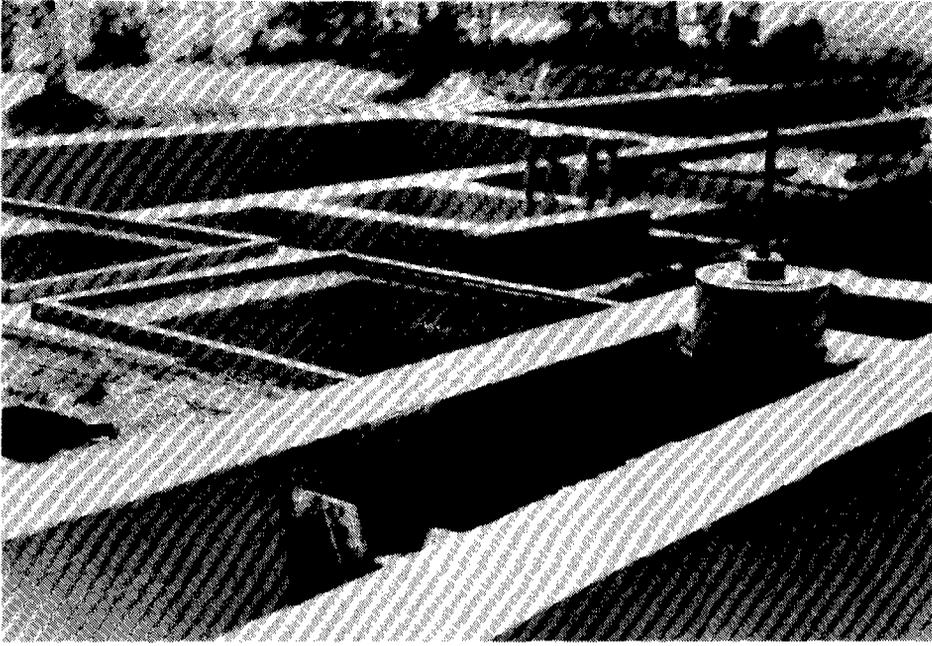


Figura 10.4: Sistema de medición y regulación del caudal de la planta de tratamiento del Colegio Colombo-Británico, Cali, Colombia.

A medida que la resistencia hidráulica crece, por colmatación del filtro, el nivel del agua aumenta, para poder vencer la resistencia. Este ascenso se hace poco a poco, pero a medida que el filtro se colmata se torna más rápido. Cuando el nivel del agua alcanza el nivel de la tubería de rebose, el filtro debe sacarse de servicio y proceder a su limpieza.

Como esta limpieza significa que el filtro estará unas horas o pocos días fuera de servicio, cada planta necesita tener dos unidades como mínimo, de forma que una pueda trabajar (si es necesario a una velocidad más elevada) mientras se efectúa la limpieza de la otra unidad.

Por esto el operador debe programar las limpiezas para evitar que los dos filtros estén colmatados a la vez. De ser así se interrumpiría la continuidad del servicio. Por lo tanto, algunas veces es necesario sacar de servicio un filtro para su limpieza antes de que alcance su pérdida máxima de carga. En lo posible debe mantenerse una situación donde si un filtro se saca de servicio, haya otro que esté relativamente limpio. En la Tabla 10.3 se resumen los procedimientos de operación normal.

Tabla 10.3 Procedimiento de operación normal y ajustes diarios. Filtros con control a la entrada.

Actividad	Acciones claves
Regular el nivel del agua sobrenadante	— No se requiere.
Remover el material flotante	— Es necesaria su remoción regular.
Medir la velocidad de filtración	— Revise su valor en la regla de aforo.
Regular la velocidad de filtración	— Manipule la válvula de entrada (a) para mantener la velocidad de filtración constante.
Decidir la limpieza del lecho	— Cuando la altura del agua alcance el nivel la tubería de rebose se debe sacar el filtro de servicio para limpieza. Programe las limpiezas para que nunca saque de servicio más de un filtro a la vez.

10.3.2 Filtros con control a la salida

En estos filtros se controla la cantidad de agua que pasa por el filtro mediante el manejo de la válvula (E). El nivel del agua sobrenadante se mantiene constante.

Cuando el filtro está limpio existe muy poca resistencia al paso del agua y ésta trata de filtrar a una velocidad mayor que la necesaria. En estas condiciones, se abre un poco la válvula (E) para crear una resistencia artificial que compense la limpieza del lecho de arena.

A medida que el filtro se ensucia, la resistencia de la capa de arena aumenta y es necesario abrir cada vez más la válvula (E).

Cuando el filtro está colmatado, no es posible recuperar la velocidad de filtración ni aun abriendo al máximo la válvula (E). En este momento o antes hay que limpiar el filtro. En la Tabla 10.4 se resumen los procedimientos de operación normal.

Tabla 10.4 Procedimientos de operación normal y ajustes rutinarios. Filtros con control a la salida

Actividad	Acciones claves
Regular el nivel del agua sobrenadante	— Manipule la válvula de entrada (A). — Mantenga el nivel constante.
Remover el material flotante	— Es necesario su remoción regular.
Medir la velocidad de filtración	— Revise el indicador en la escala del medidor
Regular la velocidad de filtración	— Manipule la válvula de agua filtrada (E) para mantener la velocidad de filtración constante.
Decidir la limpieza del lecho	— Si no es posible abrir más la válvula de agua filtrada (E), o se requieren grandes ajustes de ella, se debe sacar el filtro de servicio para su limpieza. — Programe las limpiezas para que nunca se saque de servicio más de un filtro a la vez.

Regulación del nivel del agua sobrenadante

El agua sobrenadante se debe mantener en el nivel de diseño por medio de la válvula de entrada (A). Esto necesitará, inicialmente, de una atención frecuente pero la experiencia le indicará al operador cuántas vueltas de la válvula se requieren para efectuar el cambio necesario en el caudal de entrada para mantener ese nivel de operación. Otra posibilidad es la de instalar una válvula de flotador que mantenga constante el nivel del agua o construir un vertedero para excesos.

Remoción de material sobrenadante

La espuma y todo material flotante deberá removerse constantemente, mediante un cedazo acoplado a una vara larga, o empujando los materiales hacia el vertedero de excesos.

Medición de la velocidad de filtración

La velocidad de filtración debe controlarse unas dos veces por día mirando la posición del indicador en la escala, con el fin de controlar que se mantenga constante el caudal

de operación determinado. Si no se tiene equipo de medición de caudal, la velocidad de filtración se puede medir cerrando temporalmente la válvula de entrada (A), por ejemplo durante una hora y midiendo el descenso del nivel del agua. La válvula de agua filtrada puede entonces operarse para obtener la velocidad deseada.

Este proceso es un poco dispendioso y por lo tanto debe evitarse, instalando un medidor de caudal a la salida.

Regulación de la velocidad de filtración

La velocidad de filtración puede variarse manipulando la válvula de agua filtrada (E).

Con un lecho limpio se requiere muy poco ajuste de esta válvula en dos o tres semanas después de que el lecho se ha puesto en servicio. Sin embargo a medida que avanza la carrera del filtro, la pérdida de carga aumenta y serán necesarios mayores ajustes en la apertura de la válvula. El ajuste correcto de la válvula puede determinarse midiendo de inmediato la velocidad de filtración.

Con este fin, debe recordarse que se requiere tiempo (5 minutos) para que el flujo se estabilice después de cada cambio de abertura de la válvula.

Carrera de filtración

Cuando para obtener la velocidad deseada, se requieren grandes ajustes de la válvula de agua filtrada o ya no es posible abrirla más. Es necesario poder sacar el filtro de operación y limpiarlo mediante la remoción de la capa superior de arena.

Las recomendaciones que se hicieron para los filtros con control a la entrada, sobre el número de filtros y la sobre la secuencia de los lavados son también válidas para este tipo de filtros, con control a la salida.

10.3.3 Filtración con velocidad declinante

La manera más efectiva para operar un filtro lento es dejándolo operar durante las 24 horas del día. De esta manera se asegura un efluente de excelente calidad higiénica. Sin embargo si eso no es posible, la única alternativa es la filtración a velocidad declinante. Este método específico de operación puede aplicarse para llenar el vacío entre suministros intermitentes de agua cruda.

Durante la interrupción del agua cruda el filtro trabajará filtrando el agua de la capa sobrenadante. No es necesario hacer ninguna operación de válvulas o tarea similar, a medida que la capa sobrenadante disminuye, la velocidad de filtración disminuye

hasta llegar a cero, si el agua sobrenadante alcanza el nivel del vertedero del agua filtrada, a la salida.

Por la anterior razón la filtración con velocidad declinante no puede utilizarse en filtros con control a la entrada.

Si la interrupción no es debida a cortes en el suministro de agua cruda sino que se debe a condiciones de trabajo del operador, se deben hacer las siguientes operaciones:

Cierre de la válvula de entrada

Al termino de un turno, el operador cierra la válvula de entrada (A) manteniendo en posición normal la válvula de regulación de filtración. El agua sobrenadante drenará a través del filtro a una velocidad que declina continuamente, produciéndose agua filtrada aun sin flujo de agua cruda al filtro.

Ajuste del nivel de agua sobrenadante

Tan pronto como es posible se reabre la válvula de entrada. Debe evitarse la perturbación de la película del filtro debido a caudales fuertes en el efluente, por lo que se recomienda abrir la válvula (A) poco a poco hasta su abertura inicial.

10.4 PUESTA FUERA DE SERVICIO

Después de que un filtro con control a la entrada, ha estado funcionando varias semanas o meses, según la turbiedad, el nivel de agua sobrenadante alcanza el rebose.

Se debe entonces proceder a sacar de servicio el filtro y limpiarlo realizando las siguientes acciones. (ver Tabla 10.5)

Remoción del material flotante

El material flotante, como hojas y algas, se debe extraer porque puede dificultar el desagüe del lecho y complicar el raspado. Para su remoción se puede usar el mismo accesorio usado para el drenaje del agua sobrenadante. (Figura 10.5)

Drenaje del agua sobrenadante

Durante el proceso de drenaje del agua sobrenadante se debe cerrar la válvula de entrada (a). El agua continuará filtrándose en el sistema y el nivel de agua en el lecho

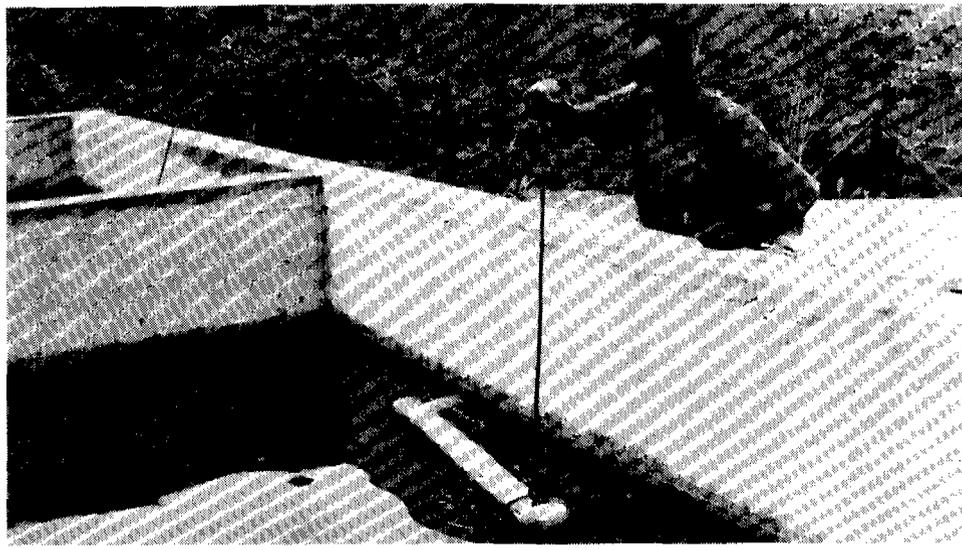


Figura 10.5: Accesorio móvil para rebose y drenaje de agua sobrenadante en unidades de filtración lenta en arena. Triana, Colombia.

descenderá gradualmente. Sin embargo, como baja el nivel de agua, la velocidad de filtración también disminuye. Si el nivel de agua desciende lentamente, el agua sobrenadante puede drenarse más rápidamente utilizando el accesorio (b) y abriendo la válvula (d). Mientras se está drenando el agua, se deben cepillar y limpiar las paredes del filtro.

Tabla 10.5 Puesta fuera de servicio de un filtro lento con control a la entrada (*)

Actividad	Acciones claves
1. Extraer el material flotante	— Utilice el accesorio móvil (b) y lleve hacia éste el material flotante.
2. Drenar el agua sobrenadante	— Cierre la válvula de entrada (a). — Continúe utilizando el accesorio (b) y abra la válvula (d). — Limpie las paredes del filtro con un cepillo largo. — Cierre la válvula (d) cuando el agua llegue a 0,2 m por debajo de la superficie del lecho filtrante.
3. Mantener la producción de agua de la planta	— Ajuste la velocidad de filtración en los otros filtros; no exceda la velocidad de 0,3 m/h.

(*) En un filtro regulado a la salida debe extraerse el material cerrando parcialmente la válvula de regulación (E) (Figuras 10.1 y 10.2).

Cuando el agua ha alcanzado el nivel requerido de cerca de 0,1 - 0,2 m por debajo de la superficie de la arena, se cierra la válvula (d). Así queda listo el lecho para la limpieza.

Mantenimiento de la producción de la planta

Cuando una unidad de filtración se encuentra en mantenimiento, las demás tienen que operar a una velocidad mayor para mantener constante la producción de agua tratada. En consecuencia, las válvulas de entrada de regulación de los filtros alternos deben abrirse ligeramente en dos o tres etapas, hasta que se alcance la producción total requerida de la planta de tratamiento. La velocidad de filtración máxima permisible, que se determina en la etapa de diseño, es generalmente de 0,3 m/h y no debe excederse en esta operación.

10.5 LIMPIEZA DEL LECHO DE ARENA

Cuando la superficie del lecho de arena está suficientemente seca, debe retirarse entre 1 y 2 cm de la capa superior (Figura 10.6). Este proceso de raspado debe hacerse lo más rápidamente posible a fin de minimizar la interferencia con la vida biológica en las capas más profundas del lecho, y el método que se emplee dependerá del área superficial del filtro. Generalmente, el material que se va a extraer no se puede tirar a un lado del filtro, por lo que se debe colocar en un recipiente para luego sacarlo del lecho y llevarlo al lugar donde se lava la arena. Como los obreros estarán en contacto con la arena deberán limpiar sus botas y todo el equipo antes de usarlo.

Si no hay escalones, se puede bajar al lecho usando una escalera corta, y deben ponerse tablas para evitar que el material superficial sucio se entierre en la arena.

Primero que nada, deberá rasparse un área apropiada al pie de la escalera o escalones y cubrirse con tablas, sobre las cuales se coloca el equipo. Se debe marcar el lecho en cuadros de 3 x 3 m aproximadamente, raspando en franjas estrechas del ancho de una tabla. Las tablas se colocan sobre estas franjas limpias y luego se puede terminar con cuidado el raspado en cada cuadro al espesor planeado. Cuando haya terminado el raspado y se haya extraído la arena sucia, se nivelará la superficie de arena.

Deben extraerse aproximadamente 1 - 2 cm de arena, aunque la cantidad exacta dependerá de la profundidad a la que haya penetrado el sedimento. Esto se puede determinar por el color de la arena, que generalmente queda manchada por el sedimento. Después de varios raspados, se debe comprobar la profundidad del lecho de arena para decidir si se requiere rearenar. A veces, el nivel al que se necesita reponer

la arena está marcado en la pared del filtro. Los procedimientos generales para la limpieza del lecho filtrante se resumen en la Tabla 10.6.

Tabla 10.6 Procedimiento para limpiar un lecho filtrante (*)

Actividad	Acciones claves
1. Limpiar el equipo	— Limpie todo el equipo, incluido botas.
2. Bajar al lecho filtrante	— Entre en la caja del filtro usando la escalera corta.
3. Proteger el lecho filtrante	— Raspe una pequeña área, cúbrala con tablas y coloque el equipo sobre ella.
4. Raspar la capa superior	— Marque áreas (3 x 3 m ²) raspando en franjas estrechas. Raspe 1 - 2 cm de la parte superior de cada área.
5. Retirar el material raspado del filtro	— Lleve el material raspado a la plataforma de lavado.
6. Retirar el equipo	— Retire todo el equipo.
7. Nivelar la superficie de arena	— Use una tabla de raspar o un rastrillo de dientes finos para nivelar la superficie de arena.
8. Comprobar la profundidad del lecho de arena	— Mida la altura desde el borde superior del muro hasta el lecho filtrante.
9. Llenar el filtro en forma ascendente	— Siga el procedimiento indicado en la Sección 10.2.
10. Dar tiempo para la maduración biológica	— La maduración generalmente toma de 1 a 2 días en zonas tropicales (siempre y cuando la limpieza no dure más de 1 día).
11. Pasar el agua al sistema de suministro	— Cierre la válvula (e) y abra la válvula (f) de suministro.
12. Ajustar los otros filtros	— Reduzca lentamente la velocidad de filtración de los otros filtros a la velocidad usual.

(*) ver Figura 10.1

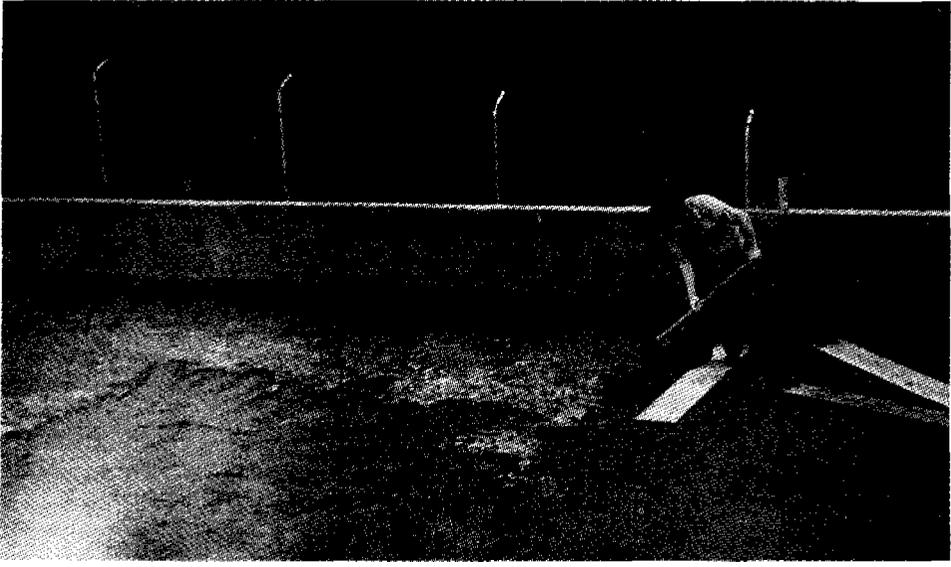


Figura 10.6: Procedimiento de raspado de un filtro lento. La Marina, Colombia.

Puesta en marcha después de la limpieza

La puesta en marcha debe seguir el procedimiento indicado en la Sección 10.2, y para afectar lo menos posible la población bacteriana en las capas más profundas del filtro, se debe comenzar inmediatamente después de que haya terminado la operación de limpieza. Preferiblemente, el llenado se debe hacer empleando el efluente de un filtro adyacente, y si esto va a generar una reducción temporal en la producción de la planta, se le debe comunicar a la comunidad con antelación.

Después de la limpieza del lecho de arena, la capa biológica también necesita madurar, pero éste es un proceso mucho más rápido y sólo debe tomar uno o dos días. Después de que termine la maduración, se puede pasar el efluente del filtro limpio al sistema de abastecimiento de agua, y se puede reducir gradualmente la velocidad de filtración de los otros filtros.

10.6 LAVADO DE LA ARENA CON MANGUERA

La arena removida en los raspados y en la mayoría de los casos también la arena nueva, se debe lavar para liberar las impurezas antes de colocarla en el filtro (Tabla 10.7). Generalmente resulta más barato lavar y almacenar la arena raspada que usar

arena fresca para llenar los filtros. La arena raspada se debe lavar inmediatamente después de extraerla del filtro, a fin de evitar olores desagradables. El lavado con una manguera es un método simple, para lo cual puede construirse una plataforma de aproximadamente 3,5 x 1,5 m con una inclinación de 5°. La plataforma debe estar rodeada de una pared que mida 60 cm de alto en la parte más alta y 30 cm en la parte más baja. Una parte del extremo más bajo debe estar cerrada por un vertedero removible de madera, de unos 10 cm de alto (Figura 10.7).

Se coloca entre 0,5 - 1,0 m³ de la arena raspada en la plataforma y el operador rocía agua con una manguera de presión sobre la masa de arena para quitarle las impurezas que se las lleva el agua que rebosa por el vertedero hacia el desagüe. Es esencial revolver la arena durante el lavado para asegurarse de que salgan todas las impurezas. Cuando la arena ha quedado bien limpia, lo que generalmente toma cerca de una hora, se retira el vertedero y también la arena después de que se ha drenado.

La arena lavada se debe poner esparcida a secar al sol, y luego se almacena en un lugar libre de contaminación y convenientemente ubicado para su transporte. La instalación de almacenamiento de arena puede ser una plataforma de hormigón, recubierta, a unos 15 cm sobre el nivel del suelo.

Tabla 10.7 Procedimientos para el lavado de arena con manguera

Actividad	Acciones claves
1. Colocar la arena raspada o nueva sobre la plataforma de lavado	— Es preciso lavar inmediatamente los raspados para evitar olores desagradables
2. Lavar la arena	— Dirija el chorro de la manguera sobre la arena y remuévala; el procedimiento generalmente toma una hora
3. Comprobar que la arena está limpia	— Frote la arena entre las manos o haga la prueba con el recipiente de vidrio
4. Secar la arena	— Quite el vertedero para drenar el agua de la plataforma de lavado — Esparza la arena sobre la plataforma para secarla al sol
5. Guardar la arena lavada	— Guarde apropiadamente la arena lavada y seca para prevenir su contaminación

A menudo es más barato, especialmente en las plantas pequeñas, usar agua clara de la planta para lavar la arena, en lugar de disponer de un abastecimiento separado procedente de la fuente de agua cruda. El volumen promedio de agua requerida es

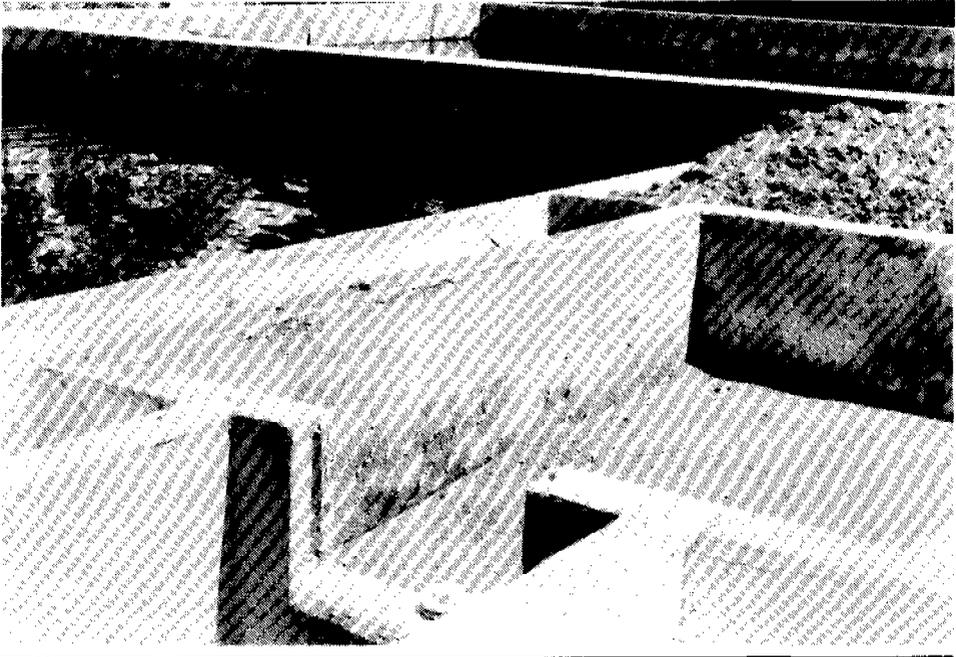


Figura 10.7: Cámara para el lavado de arena. Parcelación Cañasgordas, Cali, Colombia.

aproximadamente 5 - 10 veces el volumen de la arena raspada. Cerca del 20 - 30% de la arena se pierde en el proceso de lavado, pero debe prestarse cuidado de no extraer demasiada cantidad del material más fino, de lo contrario aumenta el tamaño promedio de las partículas de arena y las impurezas podrán penetrar más profundamente en el lecho de arena. Si la arena fresca contiene una cantidad excesiva de material fino, algunas veces puede emplearse el lavado para eliminar las partículas más finas antes de colocarla en la caja del filtro.

Las impurezas retiradas a la arena, junto con el agua de lavado, se pueden llevar al lugar de desecho o a una fosa de sedimentación, donde se pueden separar. Los sedimentos se deben extraer periódicamente de la fosa de sedimentación y se pueden eliminar esparciéndolos sobre la tierra.

Una manera sencilla de comprobar si la arena está limpia consiste en frotar un puñado entre los dedos; si queda algún rastro de tierra en la mano, la arena no está lo suficientemente limpia. Otro método es poner una cantidad pequeña de arena en un cilindro de vidrio, añadirle agua, agitarlo bien y dejar que se asiente. Si la arena está limpia, casi no aparecerá ningún sedimento sobre la superficie.

El lavado quizás no extraiga la capa de sustancia orgánica que se adhiere a los granos, pero esta se puede desintegrar durante el almacenamiento. La tierra y el polvo también pueden penetrar en la arena almacenada, por lo que se recomienda lavar la

arena nuevamente y pasarla por un cedazo de 6 mm para extraer el material grueso antes de usarla para reponer la arena del filtro.

10.7 REARENAMIENTO DE UN FILTRO

La reposición de la arena en el filtro es necesaria cuando los raspados sucesivos han reducido el espesor del lecho de arena a 50 - 60 cm. Afortunadamente, esta operación bastante prolongada sólo hay que hacerla cada dos o tres años. La decisión de reponer la arena debe tomarse con bastante antelación y planear el trabajo, de ser posible, para un período de poca demanda de agua. Por consiguiente, tal vez haya que reponer la arena antes de haber alcanzado el espesor mínimo del lecho de arena.

Para el rearenamiento se debe contratar a un grupo de personas que ayuden al operador ya que se trata de un trabajo arduo.

Antes de reponer la arena, se debe raspar la superficie del lecho filtrante (Secciones 10.5 y 10.6) y reducir el nivel del agua casi hasta la capa de grava, abriendo para ello la válvula de vaciado (d). La arena se puede reemplazar de dos maneras: el primer método se emplea en los filtros pequeños cuando se extrae la mayor parte de la arena vieja y se apila en un lugar próximo. Luego se coloca la arena nueva sobre la capa delgada restante (0,2 m), cubriendo la grava. Después de nivelar la parte superior de la nueva capa de arena, la arena vieja, que está enriquecida con microorganismos, se vuelve a colocar sobre la arena nueva. Esto le permite al filtro con arena nueva entrar en servicio dentro de un período mínimo de remaduración. La arena nueva está compuesta de la arena lavada de raspados anteriores, agregada a aproximadamente 30% de arena fresca para compensar las pérdidas en el proceso de lavado. Estos procedimientos se resumen en la Tabla 10.8.

El segundo método se emplea en los filtros más grandes. Se amontona en un lado del filtro la arena vieja, se coloca en su lugar la arena nueva y se vuelve a poner la arena vieja, pero ahora sobre la nueva (Figura 10.8). Este proceso se lleva a cabo en franjas extrayendo el material de la primera franja, amontonándolo en un lado y llenando la zanja con arena nueva lavada. Se excava la franja adyacente y el material extraído de la segunda zanja se usa para cubrir la arena nueva de la primera. Cuando se ha repuesto toda la arena de todo el lecho, se usa el material de la primera zanja para cubrir la arena nueva de la última franja.

Se reinicia el proceso de filtración tal como se describe en la Sección 10.2, pero la remaduración tomará menos tiempo, aproximadamente 3 - 7 días bajo condiciones tropicales y hasta dos semanas en zonas más templadas.

Tabla 10.8 Procedimientos para reponer la arena de un filtro(*)

Actividades	Acciones claves
1. Raspar la capa superior	— Siga los procedimientos indicados en las Secciones 10.5 y 10.6.
2. Drenar el agua del lecho filtrante	— Abra la válvula de vaciado (d).
3. Extraer la arena	— Extraiga la arena y colóquela junto al filtro, o amontónela a un lado de éste
4. Rellenar el lecho de arena	— Coloque una capa de arena fresca en el filtro — Coloque la arena vieja sobre la arena nueva
5. Nivelar la superficie de arena	— Alisar la superficie
6. Poner nuevamente en servicio el filtro	— Siga el procedimiento indicado en la Sección 10.2
7. Dejar madurar el lecho filtrante	— En condiciones tropicales, la maduración después de reponer la arena tomará de 3 a 7 días

(*) ver la Figura 10.1

En condiciones normales no debe haber necesidad de retirar toda la arena, a menos que el sedimento haya penetrado profundamente en ella debido por ejemplo, a una velocidad de filtración demasiado rápida. También habría que extraerla totalmente cuando el contenido de bicarbonato o de carbonato en el agua es alto, dando lugar a la deposición de carbonatos cristalinos alrededor de los granos de arena, uniéndolos para formar masas impermeables duras (Ellis, 1985).

10.8 REGISTROS

Los registros diarios proporcionan información valiosa sobre el funcionamiento de los filtros, el trabajo del personal de operación, los problemas corrientes que necesitan atención inmediata y las posibles acciones que se van a tomar en el futuro que pueden ayudar a prevenir problemas. Para que sea útil la información registrada debe incluir como mínimo:

- Los parámetros de calidad que se han verificado.
- Las interrupciones en la entrada de agua cruda.
- Las limpiezas de la entrada y el sumidero de salida.

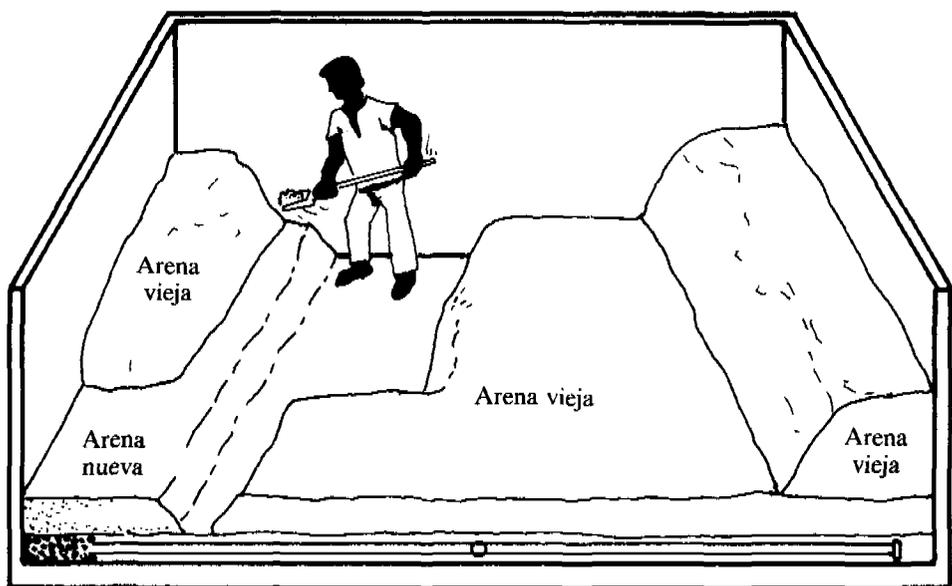


Figura 10.8: Rearenamiento de un filtro lento.

- Los cambios en el nivel del agua sobrenadante o en la velocidad de filtración.
- Las interrupciones en la operación del filtro.
- El registro de limpiezas (fecha y hora, altura de la arena, fecha y hora en que entró de nuevo al servicio).
- El registro de distribución (producción diaria cuando existe un medidor de agua, roturas y reparaciones).
- La limpieza de la red de distribución.

10.9 CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA

Limitaciones como la falta de instalaciones de laboratorio adecuadas y de funcionarios capacitados, largas distancias que producen retrasos inadmisibles entre el momento de recogida y el análisis de las muestras, y el alto costo de las pruebas, hacen imposible el examen diario de la mayoría de los parámetros de calidad del agua en los sistemas de abastecimiento de agua de zonas rurales. Sin embargo, con capacitación adecuada, los operadores pueden realizar pruebas simples de turbiedad y contenido de cloro residual. Siempre que sea posible, el operador debe hacer por lo menos las siguientes pruebas, aunque se necesita supervisión regular para asegurar la confiabilidad de los resultados:

- Turbiedad del agua a la entrada de la planta para verificar si ésta se debe suspender.

— Turbiedad a la entrada y la salida del filtro para determinar si el filtro está funcionando correctamente.

Cuando se aplica cloración, el operador también debe medir el cloro residual en el tanque de agua tratada y en los puntos terminales de la red, para comprobar si se está desinfectando suficientemente el agua. El organismo encargado de la vigilancia de la calidad del agua debe realizar periódicamente pruebas físico-químicas y bacteriológicas en el agua cruda y en la tratada.

Cuando no se cuenta con equipo para la medición de la turbiedad, la comparación visual de la misma entre agua cruda, a la entrada y la salida del filtro, proporcionará información útil. Esto puede hacerse comparando las muestras de agua en vasos uniformes, colocados uno al lado del otro. En el Apéndice VI se proporciona información adicional sobre la recolección de muestras.

Referencias y bibliografía seleccionadas

- ACI (1974). Manual of concrete practice. Detroit, USA, American Concrete Institute.
- Ballance, R. C., and Gunn, R. A. (1984). Drinking water and sanitation projects: Criteria for resource allocation. WHO Chronicle, **38**, 6, 243-248.
- Bellamy, W.D. Hendricks, D.W. and Logsdon, G.S. (1985). Slow Sand Filtration: influences of selected process variables, Journal American Water Works Association, **77**, 12, 62-66.
- Bellamy, W.D., Silverman, G.P., and Hendricks, D.W. (1985). Filtration of giardia cysts and other substances: Vol 2: Slow sand filtration, Cincinnati, Ohio, U.S.A. Environmental Protection Agency.
- Bingham, B. (1974). Ferrocement: design, techniques and application. Cambridge, UK, Carnell Maritime Press.
- Boot, M. (1984). Making the links: guidelines for health education in community water supply and sanitation (Occasional Paper). Traducido al español como: "Guía de educación en higiene para sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento ambiental comunitarios". The Hague, The Netherlands, IRC.
- Buaseemuang, S., and Chainarong, L. (1983). Report on slow sand filtration project in Thailand. Bangkok, Thailand, PWA.
- Cairncross, S., and Feachem, R. G. (1983). Environmental health engineering in the tropics: an introductory text. Bath, UK, John Wiley.
- Dancy, H. K. (1975). A manual on building construction. London, UK, Intermediate Technology Publications Ltd.
- Dijk, J. C. van, and Oomen, J.H.C.M. (1978). Slow sand filtration for community water supply in developing countries: design and construction manual (Technical Paper No. 11). The Hague, The Netherlands, IRC.

Ellis, K.V. (1985). Slow sand filtration, *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, **15**, 4, 315-354.

Feachem, R., McGarry, M., and Mara, D. (1977). *Water, wastes and health in hot climates*. London, UK, John Wiley.

Feachem, R. G. (1983). Infections related to water and excreta. In: B.J. Dangerfield (ed.), *Water supply and sanitation in developing countries*. London, UK, Institute of Water Engineers and Scientists.

Galvis, G., Fernandez, J., (1991). *Manual de Operación y Mantenimiento de Filtros Gruesos Dinámicos. Versión Preliminar*. CINARA, IRCWD. Cali, Colombia.

Galvis, G., Visscher, J. T., and Lloyd, B., (1991). *Overcoming Water Quality Limitations with the Multibarrier Concept. A Case Study from Colombia*. Slow Sand Filtration Workshop. AWWA University of New Hampshire, Durham.

Heijnen, H. A., and White, A.T. (1981). *Slow sand filtration for community water supply in developing countries: report of an international meeting, Nagpur, India (Bulletin Series, No. 16)*. The Hague, The Netherlands, IRC.

Hofkes, E.H. (ed.) (1981). *Small community water supply systems in developing countries (Technical Paper No. 18)*. The Hague, The Netherlands, IRC.

Huisman, L., and Wood, W.E. (1974). *Slow sand filtration*. Geneva, Switzerland, World Health Organization.

IRC (1977). *Slow and filtration for community water supply in developing countries: a selected and annotated bibliography (Bulletin Series No. 9)*. The Hague, The Netherlands, IRC.

Lloyd, B., and Helmer, R., (1991), *Surveillance of drinking water quality in rural areas*. New York, Longman Scientific and Technological.

Mann, H.T., and Williamson, D.L. (1976). *Water treatment and sanitation, simple methods for rural areas*. London, UK, Intermediate Technology Publications Ltd.

McJunkin, E.F. (1982). *Water and human health*. Washington, DC, USA, USAID.

Morgan, W. (1976). *Students' structural handbook*. Newnes Butterworths.

Naninga, N. (1972)., *Foundation engineering*. Delft, The Netherlands, Delft University of Technology.

OPS (1985). *Guías para la calidad del agua potable*. Vol. I: Recomendaciones, Washington, D.C., Organización Panamericana de la Salud. (Publicación Científica No. 481).

OPS (1987). *Guías para la calidad del agua potable*. Vol. II: Criterios relativos a la salud y otra información de base, Washington, D.C., Organización Panamericana de la Salud. (Publicación Científica No. 506).

OPS (1988). *Guías para la calidad del agua potable*. Vol. III: Control de calidad del agua potable en sistemas de abastecimiento para pequeñas comunidades, Washington, D.C., Organización Panamericana de la Salud. (Publicación Científica No. 508).

Paramasivam, P., Nathan, G.K. and Lee, S.L. (1979). Analysis, design and construction of ferrocement water tanks. *Journal of Ferrocement*, 9, 3.

Paramasivam, R., Mhaisalkar, V.A., and Sundaresan, B.B. (1984). Slow sand filtration and appropriate technology. 10 WEDC Conference: water and sanitation in Asia and the Pacific, 1983, Singapore.

Paramasivam, R. et al (1980). Effect of intermittent operation of slow sand filters on filtered water quality. *Indian Journal of Environmental Health*, 22, 136-150.

Pardon, M., Wheeler, D., and Lloyd, B. (1983). Process aids for slow sand filtration. *Waterline*, 2, 2, 24-28.

Pardon, M., (1989). Treatment of turbid surface water for small community supplies, Ph. D. Thesis Report. Robens Institute, University of Surrey.

Reynolds, C.E., and Steedman, J.C.C. (1975). *Reinforced concrete designer's handbook*. London, UK, Cement and Concrete Association.

Salazar, L.G. (1980). *Agua potable para la zona rural Colombiana*. Acodal, 96.

Santacruz, M., Visscher, J.T., and White, A.T. (1983). Informe del seminario internacional sobre filtración lenta de arena para abastecimiento público de agua en países en

desarrollo, 13-16 julio 1982, Neiva, Colombia (Serie Boletín No. 18). The Hague, The Netherlands, IRC.

Saunders, R.J., and Warford, J.J. (1976). Village water supply. New York, USA, World Bank; John Hopkins University Press.

Sharma, P.C., and Gopalaratnam, V.S. (1980). Ferrocement water tank. Bangkok, Thailand, IFIC/AIT.

Slezak, L.A., and Sims, R.C. (1984). The application and effectiveness of slow sand filtration in the United States. *Journal American Water Works Association*, 76, 12,38-44.

Sundaresan, B.B., and Paramasivam, R. (1982). Slow sand filtration research and demonstration project, India (final report). Nagpur, India, National Environmental Engineering Research Institute.

Swiss Centre for Appropriate Technology. Manual for rural water supply (Publication No. 8). St. Gallen, Switzerland.

Thanh, N.C., and Ouano, E.A.R. (1977). Horizontal flow coarse material prefiltration. Bangkok, Thailand, Asian Institute of Technology.

Vigneswarant et al (1983). Water filtration technologies for developing countries. Bangkok, Thailand, ENSIC.

Visscher, J.T., and Veenstra, S. (1985). Manual for caretakers of slow sand filters. The Hague, The Netherlands, IRC.

Watt, S.B. (1978). Ferrocement water tanks and their construction. London, UK, Intermediate Technology Publications Ltd.

Wegelin, M., and Mbwette, T.S.A. (1982). Slow sand filter research project report (Research report, CWS 82.3). Dar es Salaam, Tanzania, University of Dar es Salaam.

Wegelin, M. (1986). Horizontal flow-roughing filtration: a design, construction and operation manual (Report No. 6). Dübendorf, Switzerland, IRCWD.

White, A.T. (1982). Community participation in water supply and sanitation: concepts, strategies and methods (Technical Paper No. 17). The Hague, The Netherlands, IRC.

Wijk-Sijbesma, C. van (1981). Participation and education in community water supply and sanitation programmes: a literature review (Technical Paper No. 12). The Hague, The Netherlands, IRC.

Wijk-Sijbesma, C. van (1981). Participation of women in water supply and sanitation: roles and realities (Technical Paper No. 22). The Hague, The Netherlands, IRC.

Wijk-Sijbesma, C. van, and Heijnen, H. A. (1984). Report on the slow sand filtration demonstration project in Colombia. The Hague, The Netherlands, IRC.

WHO. Community water supply and sewage disposal in developing countries. World Health Statistics Report, 26, 11.

WHO (1976). Surveillance of drinking-water quality (WHO Monograph Series No. 63). Geneva, Switzerland, World Health Organization.

WHO (1983). Maximizing benefits to health. Geneva, Switzerland, World Health Organization.

Apéndices

I. RESUMEN DE LAS GUIAS DE LA OMS PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE

Las Guías de la OMS para la calidad del agua potable aspiran a brindar una base para la elaboración de normas que, si se ponen en práctica adecuadamente, aseguran que los abastecimientos de agua potable sean seguros y apropiados para el consumo humano. Sin embargo, estas normas mínimas no eximen a las autoridades de la necesidad de esforzarse por obtener un suministro de agua de la mejor calidad posible.

Los consumidores juzgan la calidad del agua esencialmente por su apariencia, olor y sabor, y por esta razón en la Tabla 1.1 se muestran las guías para estos parámetros.

La ausencia de efectos sensoriales adversos no garantiza una buena calidad del agua ya que también se deben tener en cuenta otros parámetros.

Tabla 1.1 Guías para la apariencia, olor y sabor del agua potable

Parámetro	Nivel tolerable recomendado
Turbiedad	5 UNT 1 UNT cuando se practica la desinfección
Color	15 Unidades de color verdadero (TCU)
Sabor y olor	Inofensivos para la mayoría de los consumidores

Fuente: OPS (1988)

I.1 Guías para la calidad bacteriológica del agua en las redes de abastecimiento de agua

La situación ideal es que el agua para consumo humano no contenga microorganismos transmisores de enfermedades. Como no es factible aislar microorganismos individuales en el agua, se emplean dos grupos de organismos indicadores: los coliformes y los coliformes fecales. La detección de los coliformes fecales (termo-tolerantes), en particular *Escherichia coli*, proporciona pruebas definitivas de contaminación fecal.

La Tabla I.2 define los criterios de calidad bacteriológica del agua tanto al entrar a la red de distribución como dentro de ella.

En la Tabla I.3 se indican las frecuencias recomendadas del muestreo para el análisis de los parámetros bacteriológicos. En lo que se refiere a la calidad virológica, se recomienda que el agua para consumo humano está exenta de todos los virus infecciosos para el hombre, utilizando para ello una fuente libre de contaminación fecal y de agua residual, o mediante el tratamiento adecuado. La OMS no ha establecido ninguna guía para la contaminación biológica, por ejemplo, por protozoarios, helmintos, algas u otros organismos de vida libre.

Tabla I.2 Guías para la calidad bacteriológica del agua en los sistemas de abastecimiento por tuberías

Características	Agua que entra al sistema de distribución	Agua en el sistema de distribución
Porcentaje de muestras sin coliformes/100 ml	98%	95%
Número máximo de organismos coliformes/100 ml	3*	3*
Número de muestras con coliformes fecales	0	0

* En muestras ocasionales solamente, pero no en muestras consecutivas.

Fuente: OPS (1988)

Tabla I.3 Frecuencias de muestreo recomendadas para los parámetros bacteriológicos

Población servida	Número mínimo de muestras por mes
Menos de 5 000	
5 000 a 100 000	1 por 5 000 habitantes
Más de 100 000	1 por 10 000 habitantes

I.2 Guías para los contaminantes físicos y químicos

Estas guías se indican tanto para los constituyentes inorgánicos que pueden afectar la salud (Tabla I.4), como para aquellos con consecuencias estéticas (Tabla I.5).

Los constituyentes orgánicos señalados en las Guías de la OMS no han sido incluidos en la Tabla I.4 porque en general no son importantes para las áreas rurales. Sin embargo, estos elementos constitutivos también deben controlarse en las zonas donde se utilicen extensamente los plaguicidas e insecticidas o haya considerable actividad industrial.

Tabla I.4 Guías para constituyentes inorgánicos seleccionados de importancia para la salud

Parámetro	Nivel tolerable recomendado (mg/l)
Arsénico	0,05
Cadmio	0,005
Cromo	0,05
Cianuro	0,1
Fluoruro*	1,5
Plomo	0,05
Mercurio	0,001
Nitrato**	10,0
Selenio	0,01

* Debe adaptarse a las condiciones locales o climáticas

** Medio en mg N/l

Fuente: OPS (1988)

Tabla I.5 Guías para los elementos constitutivos que afectan a la calidad estética.

Parámetro	Nivel tolerable recomendado (mg/l)
Aluminio	0,2
Cloruro	250
Cobre	1,0
Dureza*	500
Acido Sulfídrico**	
Hierro	0,3
Manganeso	0,1
pH	6,5 - 8,5
Sodio	200
Total de sólidos disueltos	1 000
Sulfato	400
Zinc	5

* Expresado como CaCO₃

** No detectable por los consumidores

Fuente: OPS (1988)

II. CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA SISTEMAS SIMPLES DE PRETRATAMIENTO

II.1 Sedimentación simple

El factor básico en el diseño de un tanque de sedimentación simple es el tiempo de retención requerido que debe ser suficientemente prolongado como para permitir el asentamiento o decantación de los sólidos en suspensión. Esto debe basarse en la información obtenida de una serie de muestras tomadas bajo diversas condiciones de flujo de la fuente de abastecimiento, tanto en la estación seca como en la lluviosa. El patrón de velocidad de asentamiento de las partículas de la muestra de agua analizada se puede establecer en el laboratorio y con base en esto, se puede determinar el tiempo de detención.

Aunque menos exacto, el siguiente método práctico también puede emplearse directamente en el campo. Se colocan muestras iguales del agua cruda en diez cilindros o conos de vidrio idénticos y al cabo de diez minutos se mide la altura de la columna de agua en el primer cilindro, se drena el sobrenadante y se mide su turbiedad. Debe tenerse cuidado de no resuspender las partículas sedimentadas. La turbiedad en el segundo cilindro se debe medir 20 minutos después que el primero, y las mediciones posteriores se deben hacer a intervalos cada vez mayores. El registro de estos valores proporciona un gráfico de la turbiedad residual frente al asentamiento a través de la profundidad del cilindro de prueba (Figura II.1).

El tiempo de retención requerido puede determinarse multiplicando el valor seleccionado en el gráfico por un factor equivalente a la profundidad propuesta del tanque de sedimentación, dividido por la profundidad del cilindro de prueba. Por ejemplo, la Figura II.1 indica que la turbiedad en el cilindro de 0,5 m de alto usado para la prueba se redujo a 14 UNT después de 2 horas. Para obtener el mismo resultado en un tanque de sedimentación de 1,5 m de profundidad, se necesitaría un tiempo de retención de dos horas multiplicado por la altura del tanque (1,5 m) dividido por la altura de la columna de agua en el cilindro de prueba (0,5 m), lo que equivale a 6 horas. Del ejemplo puede deducirse que un tiempo de detención mayor produce una disminución adicional en la turbiedad, pero esto requerirá un tanque más grande, lo que implica costos de construcción más elevados. Por otro lado, si se pasan cantidades más grandes de agua turbia al filtro hay que limpiar éste con mayor frecuencia. Como regla general, es preferible reducir la turbiedad por debajo de 10 UNT, siempre y cuando ello no exija un tiempo de retención de más de 12 a 24 horas.

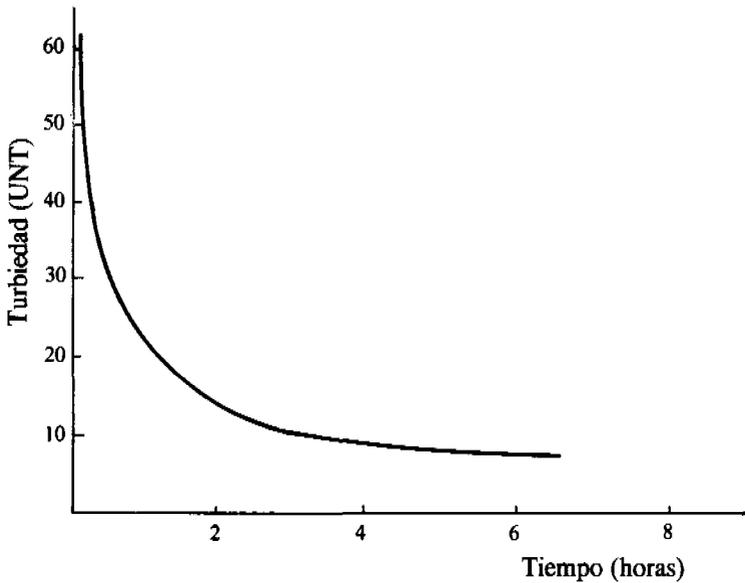


Figura II.1: Ejemplo de curva de sedimentación de agua de río, empleando una profundidad de columna de sedimentación de 0,5 m.

La mayoría de los tanques de sedimentación operan continuamente y consisten en una caja rectangular de hormigón o mampostería, o un depósito excavado con paredes inclinadas protegidas. También se emplean tanques circulares con flujo radial del interior al exterior. En los tanques rectangulares, la entrada del agua cruda se encuentra en uno de los lados cortos del tanque, y la salida en el otro lado corto. Las estructuras de entrada y salida (Figura II.2) son esenciales para el funcionamiento adecuado del tanque. El afluente se debe distribuir de la manera más uniforme posible sobre el ancho total del depósito para reducir corrientes y cortocircuitos. La estructura de salida generalmente consta de uno o más vertederos a través del ancho total del depósito.

Los criterios para el diseño de los tanques de sedimentación rectangulares, resumidos en la Tabla II.1, no son de aplicación universal, pero pueden servir de guía.

Estanques de almacenamiento

Debido al largo tiempo de retención (generalmente de varias semanas a unos pocos meses), la sedimentación será muy eficaz en un estanque de almacenamiento. Tal vez

Tabla II.1 Criterios para el diseño de tanques de sedimentación rectangulares.

Parámetros	Cálculo*	Intervalo de valores
Tiempo de retención	V/Q	4 - 12 h
Carga de superficie	Q/A	2 - 10 m ³ /d
Profundidad de depósito	H	1,5 - 2,5 m
Tasa de derrame del vertedero	Q/R	3 - 10 m ³ /h
Relación largo/ancho	L/W	4:1 a 6:1
Relación largo/profundidad		
Depósitos grandes		25:1 a 35:1
Depósitos pequeños		5:1 a 20:1

- * H = profundidad (m)
- L = longitud (m)
- W = ancho (m)
- R = longitud total del vertedero de salida (m)
- V = volumen del tanque: L x W x H (m³)
- Q = caudal de alimentación del agua cruda (m³/h)
- A = área superficial del tanque: L x W (m²)

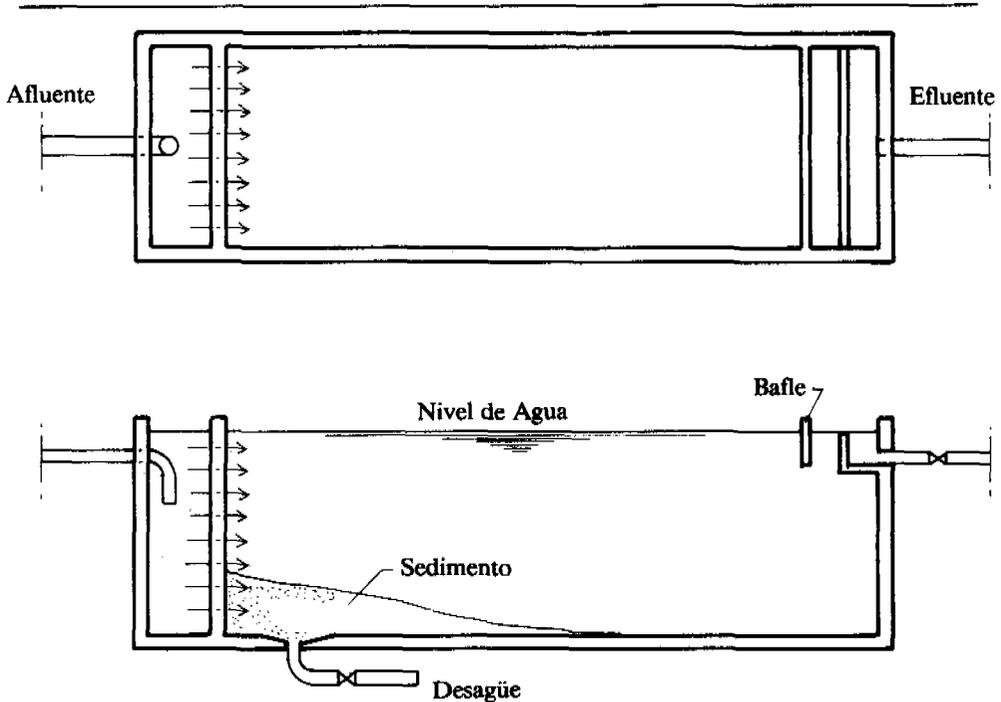


Figura II.2: Tanque de sedimentación simple.

se requiera de un 40% a 80% de capacidad de almacenamiento adicional para compensar las pérdidas debidas a la evaporación y percolación y para tener en cuenta el almacenamiento del sedimento depositado.

Se puede construir un estanque de almacenamiento levantando una presa sencilla de tierra de hasta unos 6 m de altura. Para reducir la percolación, las paredes de estanques pequeños se pueden cubrir con tierra estabilizada, hormigón o mampostería. El sedimento se puede extraer por medio de la propia fuente de agua cruda con el caudal de la creciente o a mano. No se requieren estructuras adicionales en el primer caso, mientras que en el segundo caso deben instalarse drenajes en el fondo para mejorar la extracción del lodo del agua. El acceso al estanque de almacenamiento se debe restringir al máximo para prevenir la contaminación del agua. El mantenimiento debe incluir la extracción de vegetación y malezas.

II.2 Filtración gruesa

La filtración es un efectivo proceso con una gran área superficial disponible para sedimentación, adsorción y el desarrollo de actividad química y biológica.

El proceso de filtración por multietapas es muy apropiado para el tratamiento de agua con contenido de partículas de diferentes tamaños y características; así mismo, cuando los niveles de concentración son variables.

La primera etapa de filtración está orientada a la remoción de material grueso y las etapas siguientes a la remoción de partículas finas y microorganismos.

Una combinación de dos etapas de filtración gruesa con filtración lenta en arena está siendo desarrollada en Colombia por el Centro Inter Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua, CINARA. La primera etapa corresponde al filtro grueso dinámico, diseñado para trabajar filtración superficial. La segunda etapa es la llamada filtración gruesa, diseñada para trabajar filtración a profundidad.

Diferentes tipos de filtros gruesos con filtración a profundidad son usados de acuerdo con la dirección del flujo, siendo clasificados como horizontales, ascendentes y descendentes.

II.2.1 FILTRACION SUPERFICIAL

Filtro grueso dinámico (FGD)

A partir de las experiencias obtenidas con las galerías de infiltración y las bocatomas de lecho filtrante (Salazar, 1980), se vienen desarrollando en Colombia los filtros gruesos dinámicos (Galvis y Fernández, 1991). Estos consisten en una delgada capa (0,2 m) de grava fina (3 - 6 mm) ubicada sobre un lecho de soporte (0,2 - 0,4 m) de grava gruesa

(12 - 25 mm) dentro de la cual se instala el sistema de drenaje consistente en tubería perforada.

De la fuente se deriva entre 2 y 3 veces el caudal requerido para el suministro; al llegar a la unidad, parte de éste (el caudal de diseño de la planta) fluirá a través del medio filtrante mientras el resto correrá sobre la superficie del lecho, retornando al río.

Durante la operación normal, la capa de grava fina gradualmente va obstruyéndose.

La rapidez con que esto se realiza depende de la velocidad de filtración (1 - 5 m/h) y de la cantidad de sólidos presentes en el agua. Así, con las velocidades más altas o con la presencia de picos de sólidos suspendidos la obstrucción ocurre rápidamente, reduciendo el flujo a través del lecho, protegiendo de esta manera las etapas siguientes con cargas altas de sólidos suspendidos.

Periódicamente o cuando ocurra una obstrucción, se debe realizar la limpieza del lecho filtrante grueso dinámico por lo que se debe interrumpir el flujo hacia las próximas unidades de tratamiento y rastrillar la capa de grava fina, resuspendiendo y evacuando los sólidos retenidos en ella. Esta operación ocupa solamente unos 30 minutos.

La velocidad de filtración recomendada para estos sistemas está entre 1 - 5 m/h.

Debido a que las limpiezas periódicas se realizan sólo superficialmente, el lodo acumulado en el resto del lecho debe ser removido, extrayendo y lavando todo el material filtrante. Esta operación se realiza cada 6 a 12 meses, dependiendo del contenido y tipo de sólidos en el agua cruda.

II.2.2 FILTRACION A PROFUNDIDAD

Filtración gruesa horizontal

La filtración gruesa horizontal es un proceso de tratamiento basado principalmente en la sedimentación (Wegelin, 1986) aunque la actividad biológica también puede desempeñar una función. Un filtro grueso horizontal consta de la caja rectangular, generalmente de 1,0 - 1,5 m de profundidad, con la entrada de agua cruda en un lado y la salida en el otro. Generalmente la caja está dividida en tres compartimientos empacados con piedras trituradas de tamaños gradadas, de grueso a fino en el sentido del flujo. Los criterios de diseño y la disposición de un filtro de este tipo, aparecen en la Tabla II.2. Aunque la eliminación de la turbiedad dependerá de las condiciones locales, y en particular del tipo de turbiedad, en general la remoción estará entre el 50% y el 70% (Galvis et al, 1991). Los sólidos suspendidos removidos del agua cruda se acumularán lentamente en el filtro, lo cual requerirá lavados hidráulicos periódicos consistentes en drenajes rápidos, para evitar su obstrucción. Sin embargo, no todos los sólidos son evacuados durante el drenaje, lo que implica que después de algún tiempo

(meses o años, dependiendo de la calidad del agua cruda y el mantenimiento) deberá extraerse todo el material filtrante para su lavado.

Tabla II.2 Guías preliminares para el diseño de filtros gruesos horizontales

Parámetro	Concentración media de sólidos suspendidos en el agua cruda	
	Alta (15 mg/l)	Media (100 mg/l)
Flujo horizontal (m/h)	0,5 - 0,75	0,75 - 1,5
Profundidad (m)	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5
Ancho (m)	1,0 - 1,5	1,0 - 5,0
Longitud del material filtrante (m):		
1er. compartimiento (15 - 25 mm)	3,5 - 5,0	3,0 - 4,0
2o. compartimiento (8 - 15 mm)	2,0 - 4,0	2,0 - 3,0
3er. compartimiento (4 - 8 mm)	1,0 - 3,0	1,0 - 2,0

Fuente: Wegelin (1986)

Se han realizado investigaciones en el Instituto Asiático de Tecnología en Bangkok y en la Universidad de Dar es Salaam, Tanzania. Actualmente se están llevando a cabo en el IRCWD, Dübendorf, Suiza, en el marco de un proyecto de demostración en varios países sobre la filtración gruesa horizontal, y del Proyecto del IRC sobre la promoción de la filtración lenta en arena.

En Colombia se viene adelantando una evaluación comparativa de alternativas de pretratamiento en las que se incluye la filtración gruesa horizontal en el marco del "Proyecto Integrado de Investigación y Demostración de Métodos de Pretratamiento para Sistemas de Abastecimiento de Agua" realizado por el Centro Inter Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua, CINARA y el IRC. Para mayor información, véase el manual de diseño y construcción para la filtración gruesa horizontal, publicado por el IRCWD.

Filtración gruesa ascendente (FGA)

La FGA tiene una baja capacidad de almacenamiento de lodos, requiriéndose por consiguiente lavados hidráulicos periódicos. Estos lavados se llevan a cabo mediante una válvula de apertura rápida conectada a un sistema de drenaje, consistente en tuberías perforadas ubicadas en el fondo de la unidad. Actualmente se trabajan dos tipos de filtros gruesos:

1) Filtro grueso ascendente en capas (FGAC), consistente en una sola unidad que contiene gravas de diferentes tamaños colocadas de mayor a menor diámetro en el sentido del flujo y 2) Filtro grueso ascendente en serie (FGAS), que consiste en dos o tres módulos cada uno con un solo tamaño de grava, que disminuye de unidad a unidad. En los filtros gruesos cada módulo posee una capa de grava gruesa en el fondo, en donde se deposita la mayor cantidad de lodo, para facilitar su remoción mediante un drenaje rápido operando la válvula arriba mencionada. (Figura II.3)

Filtros gruesos descendentes en serie (FGDS)

Similarmente a los FGAS esta alternativa comprende dos o tres unidades, que contienen gravas del mismo tamaño en cada una pero decreciendo en el sentido del flujo. Esta alternativa se está evaluando en CINARA (G. Galvis et al, 1992) tomando como base resultados prometedores de estudios a nivel piloto y escala real aportados por Pardon (M. Pardon, 1989) en Perú. Los FGDS también requieren un lavado periódico, el cual se hace de manera similar a los de flujo ascendente. Sin embargo, el lodo se retiene principalmente en la superficie del filtro lo que requiere un mayor esfuerzo por parte del operador y una mayor cantidad de agua para el lavado.

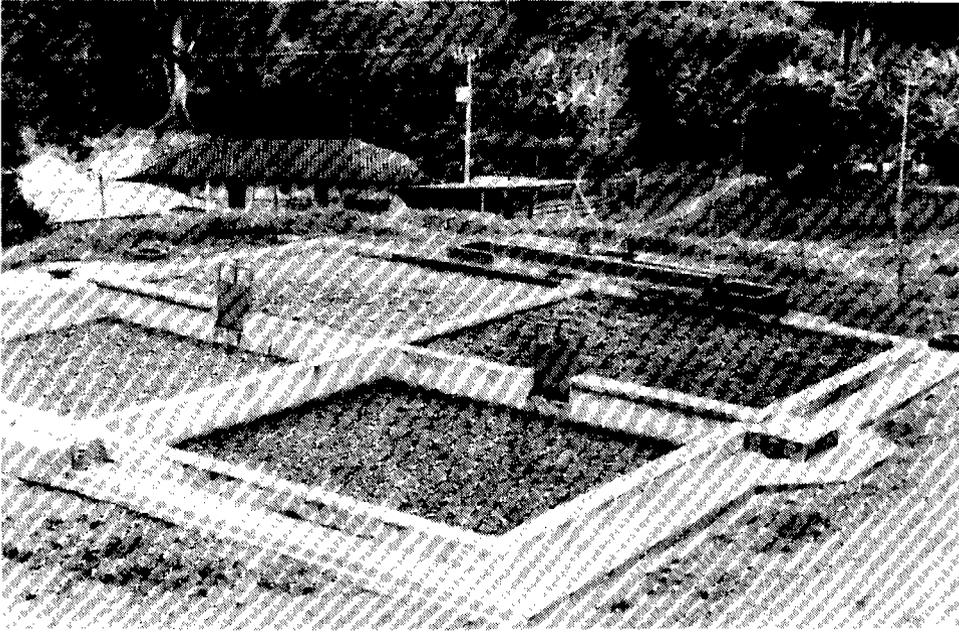


Figura II.3: Filtro grueso de flujo ascendente, en dos fases, Salónica, Colombia.

Experiencias recientes con filtración gruesa ascendente

Estas tecnologías vienen siendo desarrolladas en Colombia en el marco del proyecto integrado de Investigación y demostración de Métodos de Pretratamiento para sistemas de abastecimiento de agua, tanto en planta piloto como en planta a escala real.

El lecho filtrante presenta tamaños de grava entre 18 y 3 mm, decreciendo en tamaño en el sentido del flujo. La mayor acumulación de lodo en el lecho se presenta en las capas inferiores cerca del sistema de drenaje. Esto favorece la operación de limpieza, ya que así los sólidos pueden ser arrastrados fácilmente hacia el sistema de drenaje. Adicionalmente se cuenta con mayor volumen de agua para realizar el arrastre. La velocidad de filtración utilizada varía entre 0,3 y 1,0 m/h, siendo la más conveniente recomendada 0,6 m/h.

Dependiendo de la calidad del agua, pueden ser usados dos tipos de filtros:

1) Filtración gruesa ascendente en serie (FGAS)

Consiste en dos o tres unidades instaladas en serie, cada una de ellas con una longitud de lecho filtrante de 1,5 m y con un diámetro predominante de grava.

Esta tecnología se recomienda para aguas con concentraciones de sólidos suspendidos de hasta 300 mg/l.

2) Filtración gruesa ascendente en capas (FGAC)

En esta alternativa el lecho filtrante se encuentra empacado en una sola unidad y con una longitud de lecho de 1,5 m. El potencial de aplicación de esta alternativa está en aguas con concentraciones de sólidos suspendidos por debajo de 150 mg/l.

III. CLORACION

Aunque los filtros lentos en arena bien operados producen agua de calidad bacteriológica buena, es mejor incluir la cloración, cada vez que sea posible, como una barrera adicional contra la transmisión de enfermedades por el agua. El cloro puede matar microorganismos, como las bacterias, haciendo el agua aún más segura para el consumo humano. Si se aplica como último paso, proporciona alguna protección contra los posibles defectos en los procesos de tratamiento anteriores. A menudo esto último es de menor importancia en los suministros rurales porque las redes de distribución generalmente son pequeñas. Aunque en la mayoría de los países es común incluir cloración en el proceso de tratamiento, los compuestos de cloro no siempre se

obtienen fácilmente en las áreas rurales de los países en desarrollo y el equipo de cloración con frecuencia está fuera de servicio.

La cantidad de cloro que se agrega en el proceso de tratamiento debe controlarse cuidadosamente. Si hay exceso se modifica el gusto, dando lugar a que los consumidores rechacen el agua potable. Cuando se agrega cloro al agua, parte de éste reacciona con las impurezas y sólo una parte seguirá estando disponible para reaccionar libremente como cloro residual. La cantidad de cloro residual libre dependerá de la dosis agregada, la calidad y la naturaleza de las impurezas, y el tiempo de contacto, o sea, el tiempo transcurrido después de haber agregado el cloro al agua. La dosis de cloro debe ser suficiente como para proporcionar un residuo libre de 0,5 mg/l después de 30 minutos de contacto, cuando el pH está por debajo de 8 (OPS, 1985, 1987 y 1988). No se debe distribuir el agua antes de que haya transcurrido este tiempo. Además, la experiencia sugiere que debe agregarse cloro suficiente para mantener un nivel de cloro residual de por lo menos 0,2 mg/l en la red de distribución.

El hipoclorito de sodio se consigue comercialmente en soluciones con concentraciones de 5 - 13% de cloro disponible.

El hipoclorito de calcio puede conseguirse en concentraciones del 60 - 70% de cloro disponible y es soluble en agua. Comercialmente se encuentra granulado en polvo o en tabletas. Es higroscópico y con la humedad puede formar cloro gaseoso, por lo que debe tenerse cuidado con su almacenamiento y manipulación.

La pérdida del cloro disponible en la solución de cloro puede ser considerable y depende mucho de la temperatura y el tiempo (Figura III.1). La luz solar y los metales pesados en el agua también pueden reducir considerablemente el contenido de cloro disponible. Tanto el cloro granulado como la solución deben almacenarse en un lugar oscuro, bien ventilado, fresco y seco y en un envase cerrado que sea resistente a la corrosión.

III.1 Equipo de dosificación

La solución de cloro se agrega al agua de una manera controlada. En los sistemas pequeños se puede usar un clorador de goteo. Con este dispositivo, la entrada del tubo de vidrio está fija debajo de un flotador y permite que la solución gotee constantemente al punto de dosificación independientemente del nivel del líquido que haya en el envase.

Este método es útil para añadir solución de cloro a un sistema de abastecimiento de agua a un régimen constante, que se puede regular por una válvula o llave. Por consiguiente, se puede utilizar en combinación con un filtro lento en arena porque éstos también operan a un régimen constante. Es necesario verificar y limpiar con regularidad la salida del gotero para evitar que se obstruya. Para prevenir la pérdida de cloro, el

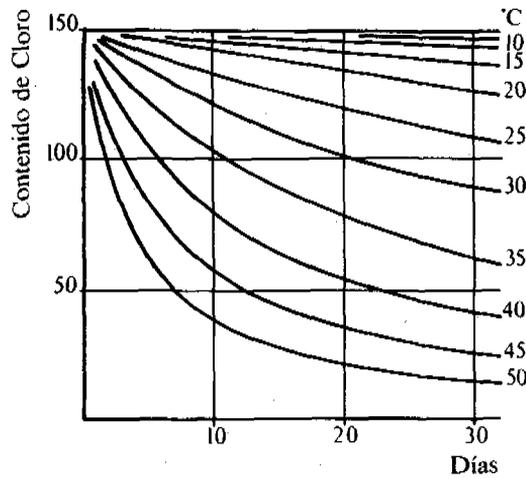


Figura III.1: Pérdida de cloro disponible en la solución de cloro en función de la temperatura y el tiempo (Ref: Ministerio de Asuntos Sociales, Países Bajos).

recipiente no debe contener más solución de cloro que la necesaria para la operación durante 3 a 5 días.

Para una desinfección óptima, debe asegurarse una mezcla completa y rápida de la solución de hipoclorito aplicada con el agua que se vaya a tratar. Esto se facilita colocando el punto de dosificación de la solución de cloro encima del vertedero de rebose en la cámara de salida de los filtros lentos.

IV. ESTUDIO DE LOS SUELOS

El comportamiento de los suelos naturales es complejo e incluso los análisis avanzados de laboratorio pueden no suministrar información completa sobre la reacción del suelo a la carga de la estructura propuesta. Por lo tanto, se requiere buen criterio y un factor de seguridad adecuado en el diseño. Además, dentro del alcance de un programa rural de abastecimiento de agua sólo se justifican pruebas simples de bajo costo. La investigación del sitio para una planta de tratamiento generalmente incluye la recopilación de información existente sobre los suelos de la zona, lo cual es complementado con perforaciones exploratorias (tipo Auger o apique) y sondeos con ensayos de campo (equipo de percusión).

IV.1 Recopilación de información

La información sobre las condiciones geológicas y del subsuelo en el área seleccionada puede obtenerse de organismos del gobierno y otras entidades, así como de particulares, como por ejemplo, contratistas locales que hayan participado en la exploración del subsuelo en esa zona. Una inspección visual de los edificios vecinos también puede proporcionar información útil. Por ejemplo, las grietas en las paredes y el asentamiento indican la presencia de capas de suelo de alta compresibilidad.

IV.2 Perforaciones exploratorias

Se pueden obtener muestras del subsuelo para la observación directa mediante perforaciones en el área seleccionada. Las perforaciones poco profundas entre 5 - 10 m, generalmente se hacen con barrenos espirales de mano y para los más profundos se utilizan taladros mecánicos. Los taladros y los barrenos de mano son fáciles de construir y operar, especialmente para perforar en arena y arcilla. Las capas más duras, como laterita y calcita, requieren el uso de un trípode. En los suelos menos cohesivos y en perforaciones por debajo del nivel de aguas subterráneas, se requiere una camisa o tubería de recubrimiento para evitar que la perforación se derrumbe. También se necesitan muestradores o cucharas especiales para tomar muestras del subsuelo. En los suelos cohesivos, las muestras del subsuelo pueden tomarse del contenido de la barrena. Estas ofrecen una indicación de las propiedades mecánicas del suelo, que básicamente dependen del tamaño y la estructura de las partículas.

Tamaño y distribución de las partículas

Pueden emplearse tres métodos para identificar el tamaño y la distribución de las partículas que componen el suelo:

- La medición con ayuda de un microscopio: este método es supremamente lento, ya que se requiere el conteo de partículas. Debe usarse únicamente para verificar los resultados obtenidos con otras técnicas.
- Análisis con tamices: esta técnica es apropiada para las fracciones más grandes, o sea, aquellas que pueden verse a simple vista (mayores que 0,06 mm).

- Sedimentación: los granos menores que 0,06 mm se pueden separar de las fracciones más grandes por medio del lavado. La distribución del tamaño de la fracción más pequeña se obtiene de una prueba de sedimentación.

En la Tabla IV.1 se presenta una clasificación de fracciones de partículas basada en el tamaño de éstos. Como se ha indicado, las fracciones más pequeñas se dividen en limo y arcilla. Una prueba sencilla para distinguir entre limo y arcilla consiste en colocar una parte entre los dientes, si existe una sensación granulosa es limo y si es pastosa se trata de arcilla.

Tabla IV.1 Clasificación de fracciones de partículas

Fracciones	Tamaño de partículas (mm)
Arcilla	< 0,002
Limo	0,0020 - 0,06
Arena	0,06 - 2,0
Grava	2,0 - 20
Cantos rodados	> 20

Fuente: Naninga (1972)

Los nombres de estas fracciones también se emplean para los tipos de suelo. Esto puede ser confuso porque la mayoría de éstos contienen diversas fracciones, por lo que es preferible emplear un diagrama de distribución de tamaños de partículas. En general, los suelos de arena no están compactados, son de elevada porosidad y bajos en compresibilidad, mientras que los suelos de arcilla son compactos, de baja porosidad y compresibilidad elevada.

Consistencia

La consistencia es también un factor importante en la determinación de la estabilidad del suelo. Los términos empleados para describir el grado de cohesión entre las partículas de suelo y la resistencia a la deformación son: duro, plástico y blando. En los suelos que tienen una gran fracción de partículas finas, la consistencia depende considerablemente del contenido de agua. Si ésta aumenta, los suelos pueden volverse inestables. La descripción de la prueba de consistencia del suelo está fuera del alcance de esta publicación.

IV.3 Sondeos del subsuelo

La información obtenida de las perforaciones exploratorias a menudo no es suficiente. Puede ser necesario hacer sondeos para disponer de información adicional con la cual se tome la decisión adecuada sobre el tipo de cimientos que se van a utilizar y si se requiere consolidar el subsuelo. Los sondeos también se emplean para identificar los puntos blandos en el subsuelo entre perforaciones. Una combinación de sondeos y perforaciones es esencial para obtener información confiable, en particular en aquellos lugares que el investigador no conozca bien. Dos métodos de sondeo son:

- El penetrómetro estático de suelos: con este método se hace penetrar un cono en el suelo a una velocidad estándar y se mide la resistencia al cono. La resistencia será mayor en los suelos firmes.
- La prueba estándar de penetración: en su forma más simple, esta prueba consiste en una varilla o tubo que se entierra en el suelo con un martinete. El registro de la penetración con cada golpe indica la densidad relativa del suelo y su capacidad de sustentación.

V. MEDICION DE FLUJO EN LOS FILTROS LENTOS DE ARENA

En las plantas de filtración lenta en arena, es necesario medir el flujo a través de los filtros y ajustar la velocidad de filtración a un valor fijado previamente. Las mediciones del flujo pueden realizarse en tuberías cerradas con medidores de Venturi u otros dispositivos, pero en los sistemas a menudo resulta más económico emplear vertederos de medición abierta. La medición del flujo se basa entonces en el principio de que el caudal sobre el vertedero, en un canal abierto está relacionado con la profundidad del agua que pasa sobre la cresta del vertedero. En la Figura V.1 se muestran tres tipos de vertederos y sus respectivas ecuaciones de descarga.

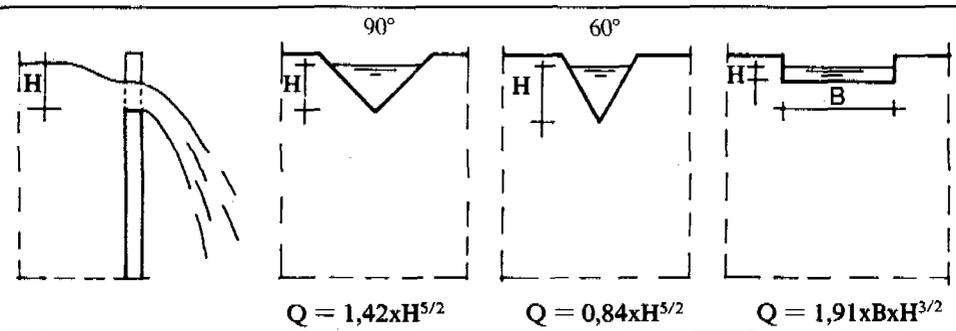


Figura V.1: Vertederos y ecuaciones de descarga.

En la Figura V.2 se muestra la relación entre la descarga (Q) y la profundidad del agua sobre el vertedero (H) en el caso de vertederos rectangulares y vertederos triangulares de 90° y de 60° . Con la ayuda de estas ecuaciones, se puede calcular la descarga en el vertedero. Luego se le puede indicar al operador la descarga que corresponde a la velocidad de filtración según diseño. La medición no es muy exacta, en particular con un vertedero de madera, pero uno de hormigón con una placa de acero proporciona lecturas más exactas. La medición del flujo puede facilitarse instalando un indicador de flujo aproximadamente 0,3 m aguas arriba del vertedero.

Este debe consistir en un flotador al que se le conecta un puntero que indica la velocidad de filtración sobre una escala calibrada. Con este indicador de flujo, el operador puede ver fácilmente si ha fijado la velocidad correcta de filtración.

La exactitud de las mediciones del flujo siempre es limitada, por lo que se requiere calibrar con regularidad el indicador de flujo. Esto puede hacerse midiendo la descarga efectiva con la ayuda de un vaso o balde de volumen conocido y un cronómetro y ajustando en consecuencia el indicador de flujo.

Al igual que la medición del caudal, en zonas rurales su regulación debe hacerse de la manera más sencilla posible. Normalmente se utiliza una compuerta en lámina de

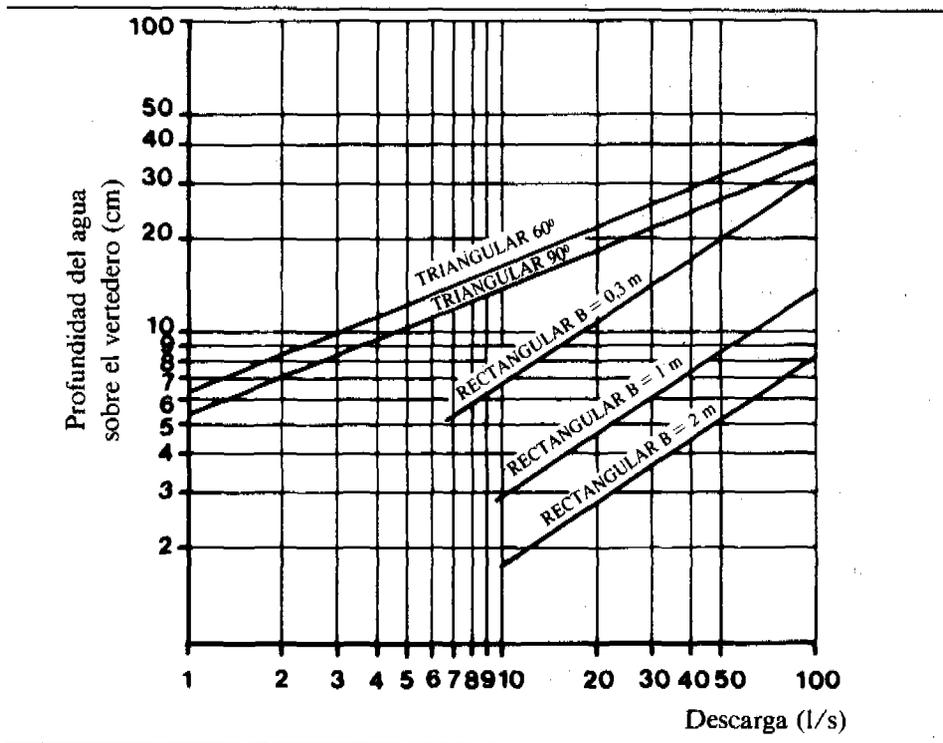


Figura V.2: Curvas de descarga para tres tipos de vertederos.

hierro protegida con anticorrosivo y regulada con un tornillo sin fin (Figura 7.17); estos accesorios presentan básicamente dos problemas: requieren de una protección periódica contra la corrosión, y por su relación área de flujo versus altura, poseen poca sensibilidad como elemento regulador para caudales pequeños.

VI. ANALISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA

Para seleccionar la fuente de agua cruda y comprobar la calidad del agua en el tiempo, se requiere realizar unas pruebas completas por lo menos una vez al año, pero preferiblemente con mayor frecuencia. A menudo sólo pueden tomarse unas pocas muestras que quizá no sean representativas, por lo que es preciso combinar el análisis de calidad del agua con inspecciones sanitarias. Estas inspecciones permiten efectuar evaluación general y proporcionan un método directo de identificar fuentes de contaminación.

En la etapa de planificación se deben recopilar datos sobre las variaciones en la calidad de la fuente de agua cruda, durante las estaciones seca y lluviosa. El grado de turbiedad del agua cruda es un parámetro muy importante para la filtración lenta en arena. El nivel de turbiedad puede ser alto, especialmente durante las primeras etapas de la estación lluviosa, cuando el agua de escorrentía probablemente arrastra residuos y sedimentos de la cuenca y del lecho del río. Si no se dispone de datos de las autoridades del sector de agua, es necesario que el personal capacitado tome muestras y se analicen en un laboratorio. Sin embargo, como en muchos países puede ser difícil tener esta posibilidad y es preciso realizar varias pruebas físicas, químicas y bacteriológicas de rutina para comprobar el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua, el operador debe tomar las muestras y enviarlas al laboratorio lo más rápido que sea posible. En las Guías de la OMS para Calidad del Agua Potable, Tomo 3 (1985, Ref: OPS 1988), se puede encontrar información útil sobre el examen de calidad del agua, así como en la publicación de L. G. Hutton titulada "Pruebas de Agua en el Campo en Países en Desarrollo", WRC (1983).

VI.1 Recolección de una muestra de agua

Para obtener resultados confiables, es esencial seguir ciertos procedimientos básicos.

Al recoger las muestras para el análisis físico y químico, el dispositivo de muestreo debe lavarse por lo menos tres veces con una cantidad pequeña de agua que se va a recoger, y luego se llena y rotula de inmediato con la hora, la fecha y el lugar de muestreo. Las muestras no deben ser de menos de dos litros y deben enviarse al laboratorio sin demora.

Las muestras de un río, arroyo, lago o estanque deben representar la calidad media del agua. En consecuencia, no se deben tomar las muestras demasiado cerca de la orilla, demasiado lejos de la captación del agua, ni a demasiada profundidad.

También deben evitarse áreas estancadas, así como materiales sueltos sobre la superficie del agua. En la planta, la muestra se debe tomar en lugares donde el agua esté mezclada, como en la cámara de entrada de agua, o de un grifo en donde se haya dejado correr durante un mínimo de cinco minutos.

VI.2 Examen bacteriológico

Un parámetro que requiere exámenes regulares, una vez al mes cuando menos, es la calidad bacteriológica del agua cruda y la tratada, debido al riesgo de epidemias de enfermedades transmitidas por el agua. Dos métodos básicos desarrollados para la detección de organismos indicadores son:

- El método de los tubos múltiples: en esta técnica, se agregan diferentes cantidades de agua a varios tubos que contienen un medio de cultivo. Las bacterias presentes en el agua se reproducen y de acuerdo con el número de tubos inoculados, la gama de diluciones realizadas y el número de tubos con reacción positiva, se permite determinar estadísticamente el número más probable (NMP) de bacterias presentes en el agua. Este método se puede emplear tanto en muestras de agua cruda y de agua tratada, pero los resultados no se pueden conocer, sino hasta después de 48 a 96 horas.
- El método de filtración por membrana: en esta técnica se filtra un volumen determinado de agua a través de una membrana que retiene las bacterias en su superficie. Para el análisis del agua, el diámetro de los poros de la membrana es generalmente de 0,45 micrómetros. La membrana es luego incubada en un medio selectivo apropiado, permitiendo que las bacterias se reproduzcan y formen colonias. El número de colonias contadas se relaciona directamente con el contenido bacteriológico de la muestra de agua. Este método no es apropiado para aguas turbias y no siempre resulta fácil conseguir las membranas, pero es una técnica simple y proporciona resultados en 24 horas. Las muestras para el análisis bacteriológico tienen que ser procesadas en un laboratorio en el término de 24 horas, y si no es posible garantizar transporte adecuado dentro de ese plazo, se requiere un equipo portátil para el análisis en campo.

Recolección de una muestra para la investigación bacteriológica

Generalmente, para el análisis bacteriológico se necesitan muestras más pequeñas, pero su recolección requiere atención especial. Además de ser representativa, la muestra debe estar exenta de contaminación con otras fuentes. En consecuencia, los recipientes en donde se recogen las muestras para el análisis bacteriológico se deben esterilizar antes de usarlos; estos se obtienen normalmente en el laboratorio.

Las botellas no se deben abrir hasta cuando se va a tomar la muestra y el tapón se debe sacar y sujetar apuntando hacia abajo. No deben lavarse las botellas, y mientras sea posible, las muestras se deben tomar de un grifo. El grifo se debe enjuagar y esterilizar (con calor) antes de recoger la muestra. Cuando los lugares de muestreo no son de fácil acceso, un pozo, por ejemplo, se puede utilizar un recipiente esterilizado y una cadena para sacar el agua, que luego se pasa a la botella. La esterilización es posible hacerla quemando un poco de alcohol dentro del recipiente.

La muestra se recoge después de enfriarse la vasija.

Las botellas con las muestras después de la recolección se deben rotular con la siguiente información, inmediatamente, de modo que se puedan identificar:

- Nombre y dirección del laboratorio que realiza el análisis.
- Origen de la muestra.
- Tipo de análisis.
- Fecha y hora en que se tomó la muestra.

La muestra debe ser empacada en hielo o refrigerada para evitar que las bacterias se multipliquen o mueran. Debe ser enviada al laboratorio lo más rápido posible, pues el análisis debe comenzar dentro de las 24 horas siguientes a la recolección.

Cuando se toma una muestra bacteriológica después de la etapa de cloración, se debe declorar. Si no se hace esto, cualquier cantidad de cloro residual que se encuentre presente en la muestra continuará ejerciendo su acción desinfectante y los resultados del análisis no guardarán ninguna relación con la calidad del agua en el momento del muestreo. La decloración debe hacerse siguiendo las instrucciones de los técnicos del laboratorio, que muy bien pueden hacerlo agregando un cristal de tiosulfato de sodio a la botella de la muestra antes de esterilizarla. En esta publicación no se hace una discusión más detallada de los diversos métodos para hacer la prueba bacteriológica.

(Para más información, véanse las Guías de la OMS para la Calidad del Agua Potable, Tomo 3, 1985, Ref: OPS, 1988).

VII. INSTITUCIONES PARTICIPANTES EN EL PROYECTO DE FILTRACION LENTA EN ARENA Y CENTROS DE DOCUMENTACION

VII.1 Instituciones participantes:

Instituto Nacional de Salud
División de Saneamiento Básico Rural
A.A. 80080
Bogotá, Colombia

CINARA
Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería.
A.A. 25157
Cali, Colombia

University of Science and Technology
Faculty of Engineering
Civil Engineering Department
Kumasi, Ghana

National Environmental Engineering Research Institute
Nehru Marg
Nagpur 440020, India

National Water Commission
P.O. Box 65
Kingston, Jamaica

Ministry of Health
Public Health Department
P.O. Box 30017
Nairobi, Kenya

University of Nairobi
Civil Engineering Department
P.O. Box 310097
Nairobi, Kenya

National Administration for Water
P.O. Box 381
Khartoum, Sudan

University of Khartoum
P.O. Box 321
Khartoum, Sudan

Asian Institute of Technology
P.O. Box 2754
Bangkok 10501, Thailand

Provincial Waterworks Authority
72 Jang Wattana Rd.
Laksi Bagkhen
Bangkok 10210, Thailand

VII.2 Centros de documentación:

AIT
Asian Institute of Technology
P.O. Box 2754
Bangkok 10501, Thailand

Banco Mundial
1818 H. Street, N. W.
Washington, DC 20433, USA

CIEH
Comité Inter Africain d'Etudes Hydrauliques
B.P. 369
Ouagadougou, Alto Volta

GRET
34, Rue Dumont d'Urville
75116 Paris, France

IFFIC/AIT
P.O. Box 2754
Bangkok 10501, Thailand

IRC
P.O. Box 93190
2509 AD The Hague, The Netherlands

IRCWD
Ueberlandstrasse 133
CH-8600 Duebendorf
Switzerland

ITDG
Intermediate Technology Development Group
9 King Street
London WC2E 8HN, UK

OPS
525 Twenty-third Street N.W.
Washington DC 20037, USA

WHO
Distribution and Sales Service
1211 Geneva 27, Switzerland

VIII. Glosario

Acción Bioquímica	Cambio químico resultante de la acción de organismos vivos.
Aeración	Un proceso para aumentar el contenido de oxígeno en el agua, por ejemplo rociándola en el aire.
Afluente	Agua sin tratamiento, o parcialmente tratada, que entra a una sección de la planta de tratamiento.
Año Hidrológico	Un año en la vida de un río que cubre todas las variaciones en sus características hidrológicas debidas a precipitación, escorrentías, evaporación, descargas o extracciones artificiales (hechas por el hombre), etc.

Bacteria	Micro-organismo de estructura simple y tamaño pequeño. La mayoría están compuestas por sólo una célula, y algunas son capaces de movimiento. Algunas causan enfermedades, pero muchas otras son útiles.
Borde Libre	La distancia vertical entre el nivel máximo de agua en un tanque y el borde superior de las paredes laterales, previsto para evitar que el agua se derrame o sea arrastrada por el viento.
Capacidad de Diseño	La capacidad (en m^3/h) de un sistema de suministro de agua recién diseñado.
Características de Flujo	Los datos que definen la naturaleza de un río, como por ejemplo, su velocidad y caudal.
Carga Superficial	La máxima tasa de flujo que va a ser tratada diariamente por unidad de área $m^3/m^2/d$. (También puede expresarse como $m^3/m^2/h$).
Cloro	Un elemento químico que es tóxico para bacterias y virus.
Cloración	Adición de cloro para la eliminación de bacterias y virus, los cuales pueden haber traspasado el proceso previo de tratamiento de agua, para asegurar que el agua es segura para beber.
Coagulación	Un proceso químico dirigido a la desestabilización y a la agregación inicial de partículas coloidales y finamente divididas en suspensión mediante la adición de un agente químico que forma flóculos, o por un proceso biológico.
Coliformes Fecales	Organismos indicadores de contaminación fecal, particularmente <i>Escherichia coli</i> , una bacteria que vive en los intestinos del hombre y otros mamíferos. Como son excretados en las heces en grandes cantidades, su presencia en el agua es indicativa del grado de contaminación fecal y por ende de la posible presencia de organismos patógenos.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)	La cantidad de oxígeno consumida por un agente oxidante especificado en la oxidación de la materia presente en una muestra (de agua). La DQO aproxima la cantidad de oxígeno teóricamente requerida para la oxidación completa del material carbonáceo a bióxido de carbono y agua. Este término está restringido a la prueba de oxidación estándar empleando una solución de dicromato de potasio en ebullición.
Depreciación	Un período estimado (basado en la experiencia) después del cual un equipo debe ser reemplazado debido al desgaste.
Descarga de la Bomba	Cantidad de agua que sale de la bomba por unidad de tiempo.
Descarga Sobre Vertedero	El volumen de líquido que pasa sobre la cresta de un vertedero, por unidad de longitud del vertedero, al flujo máximo.
Descomposición	La rotura de una sustancia compleja para producir una sustancia más simple.
Diámetro Efectivo	El tamaño de la apertura de la malla a través de la cual alcanza a pasar justamente el 10% (por peso) de los granos de arena (símbolo: d_{10}). También llamado tamaño efectivo.
Dosificador Hidráulico	Equipo de dosificación de agentes químicos que consta de partes que no son mecánicas.
Efluente	Agua parcial o totalmente tratada que sale de una planta de tratamiento.
Factor de Crecimiento de la Población	El aumento total de población por unidad de población actual, durante un cierto número de años.
Factor Pico	La razón entre la máxima cantidad probable de agua que se utilice en un período de tiempo y la tasa promedio de uso.
Filtración a Tasa Declinante	Un método específico de operación de filtros lentos de arena en el cual, periódicamente, el nivel del agua sobrenadante decrece gradualmente y el agua es filtrada a una velocidad continuamente declinante.

Floculación	Una técnica de mezclado lento en la cual se inducen las partículas desestabilizadas a juntarse, poniéndose en contacto y formando aglomerados mayores.
Flujo por Gravedad	Flujo causado por la fuerza de la gravedad.
Gradiente Hidráulico	Una gráfica que muestra las pérdidas consecutivas de energía hidráulica en los diversos componentes de una unidad de tratamiento a las que es sometida el agua que va a ser tratada.
Infiltración	La pérdida de agua de un canal o reservorio por percolación en la tierra.
Material Flotante	Una capa de grasas, aceites y otras partículas flotantes que suben a la superficie del agua.
NMP	Número Más Probable: Un estimativo estadístico obtenido del análisis bacteriológico sobre el número de bacterias viables en una muestra (de agua).
N , kN	Newton, kiloNewton: la unidad de medición de la fuerza; un Newton es aproximadamente $9,8 \text{ kg ms}^{-2}$; $1 \text{ kN} = 9\ 800 \text{ kg ms}^{-2}$.
Patógeno	Un patógeno u organismo patogénico es un organismo que causa enfermedad.
Período de Diseño	El período de tiempo para el cual se diseña un sistema de suministro de agua, sin que sea necesario ampliarlo.
Pozo de Succión	Un tanque u hoyo que es drenado por una línea de succión o una bomba.
Presión Negativa	Cuando el nivel de la cresta del vertedero a la salida del filtro es más baja que la superficie de la arena (un defecto de construcción muy común en muchas plantas), y la pérdida de energía en la membrana biológica es mayor que la energía debida al agua sobrenadante, creando así una presión por debajo de la atmosférica, ocasionando la liberación de gases disueltos en el agua. Los gases liberados en la región de baja presión debajo de la membrana forman burbujas en los poros del lecho filtrante.

Resistencia a la Compresión del Concreto	La máxima fuerza permisible por unidad de área sin que ocurra cizallamiento o deformación.
Resistencia a la Tensión	Resistencia de un material o componente a una fuerza que trata de elongarlo.
Sistema de Distribución	Red de tuberías por medio de la cual se transporta el agua a los consumidores.
Tasa Anual de Crecimiento	La tasa anual de multiplicación, expresada como la tasa de aumento de la población por unidad de población actual (como porcentaje).
Tubería de Transmisión	Una tubería de conducción por medio de la cual se transporta agua sobre distancias grandes.
Turbiedad	Falta de transparencia del agua causada por la presencia de materia en suspensión.
Uniformidad	El Coeficiente de Uniformidad (CU) de material granulado es la razón d_{60}/d_{10} (Ver diámetro efectivo).
UNT	Unidad Nefelométrica de Turbiedad: unidad de turbiedad basada en una solución estándar acordada internacionalmente. La medición de la turbiedad está basada en la cantidad de luz dispersada por las partículas en suspensión (un UNT es aproximadamente igual a un UFT, Unidad Formazin de Turbiedad).
Vertedero	Aparato para la medición del flujo de líquido en un canal abierto. El caudal es proporcional a la carga sobre el vertedero.
Vertedero Triangular	Un vertedero en forma de V usado para aforar la descarga.

