

Capítulo 5

FILTRACIÓN LENTA



Introducción

La filtración lenta en arena (FLA) es el sistema de tratamiento de agua más antiguo del mundo. Copia el proceso de purificación que se produce en la naturaleza cuando el agua de lluvia atraviesa los estratos de la corteza terrestre y forma los acuíferos o ríos subterráneos. El filtro lento se utiliza principalmente para eliminar la turbiedad del agua, pero si se diseña y opera convenientemente puede ser considerado como un sistema de desinfección del agua.

A diferencia de la filtración rápida en arena, en la que los microorganismos se almacenan en los intersticios del filtro hasta que se vierten nuevamente en la fuente por medio del retrolavado, la FLA consiste en un conjunto de procesos físicos y biológicos que destruye los microorganismos patógenos del agua. Ello constituye una tecnología limpia que purifica el agua sin crear una fuente adicional de contaminación para el ambiente.

Básicamente, un filtro lento consta de una caja o tanque que contiene una capa sobrenadante del agua que se va a desinfectar, un lecho filtrante de arena, drenajes y un juego de dispositivos de regulación y control.



Filtro lento de arena en una zona rural

➤ *Propiedades y descripción de la desinfección mediante filtración lenta*

El filtro lento se caracteriza por ser un sistema sencillo, limpio y a la vez eficiente para el tratamiento de agua. Comparado con el filtro rápido, requiere de áreas más grandes para tratar el mismo caudal y, por lo tanto, tiene mayor costo inicial. Sin embargo, su simplicidad y bajo costo de operación y mantenimiento lo convierte en un sistema ideal para zonas rurales y pequeñas comunidades, teniendo en cuenta además que los costos por área de terreno son comparativamente menores en estas zonas.

La filtración lenta, como se ha mencionado, es un proceso que se desarrolla en forma natural, sin la aplicación de ninguna sustancia química, pero requiere un buen diseño, así como una apropiada operación y cuidadoso mantenimiento para no afectar el mecanismo biológico del filtro ni reducir la eficiencia de remoción microbiológica.

Huisman & Wood describieron en 1974 el método de desinfección por medio de la filtración lenta, como la circulación del agua cruda a baja velocidad a través de un manto poroso de arena. Durante el proceso, las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente procesos de degradación química y

biológica que reducen la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta un subsecuente retiro o limpieza.

El agua cruda que ingresa a la unidad permanece sobre el medio filtrante tres a doce horas, dependiendo de las velocidades de filtración adoptadas. En ese tiempo, las partículas más pesadas que se encuentran en suspensión se sedimentan y las partículas más ligeras se pueden aglutinar, lo que facilita su remoción posterior. Durante el día, bajo la influencia de la luz solar, se produce el crecimiento de algas, las cuales absorben bióxido de carbono, nitratos, fosfatos y otros nutrientes del agua para formar material celular y oxígeno. El oxígeno así formado se disuelve en el agua, entra en reacción química con las impurezas orgánicas y hace que éstas sean más asimilables por los microorganismos.

En la superficie del medio filtrante se forma una capa constituida por material de origen orgánico, conocida con el nombre de “schmutzdecke” o “piel de filtro”, a través de la cual tiene que pasar el agua antes de llegar al propio medio filtrante. El schmutzdecke o capa biológica está formado principalmente por algas y otras numerosas formas de vida, como plankton, diatomeas, protozoarios, rotíferas y bacterias. La acción intensiva de estos microorganismos atrapa, digiere y degrada la materia orgánica contenida en el agua. Las algas muertas, así como las bacterias vivas del agua cruda son también consumidas en este proceso. Al mismo tiempo que se degradan los compuestos nitrogenados se oxigena el nitrógeno. También se remueve algo de color y una considerable proporción de partículas inertes en suspensión es retenida por cernido.

Una vez que el agua pasa a través del schmutzdecke, entra al lecho filtrante y es forzada a atravesarlo en un proceso que normalmente toma varias horas y en el que se desarrollan diversos procesos físicos y biológicos que constituyen el proceso final de purificación.

Mecanismos de la desinfección mediante filtración lenta

En el proceso de filtración lenta actúan varios fenómenos o mecanismos físicos similares a los de la filtración rápida previos al mecanismo biológico que desinfecta el agua, algunos de los cuales hemos mencionado líneas arriba. Estos mecanismos son muy importantes, dado que permiten la concentración y adherencia de las partículas orgánicas al lecho biológico para su biodegradación

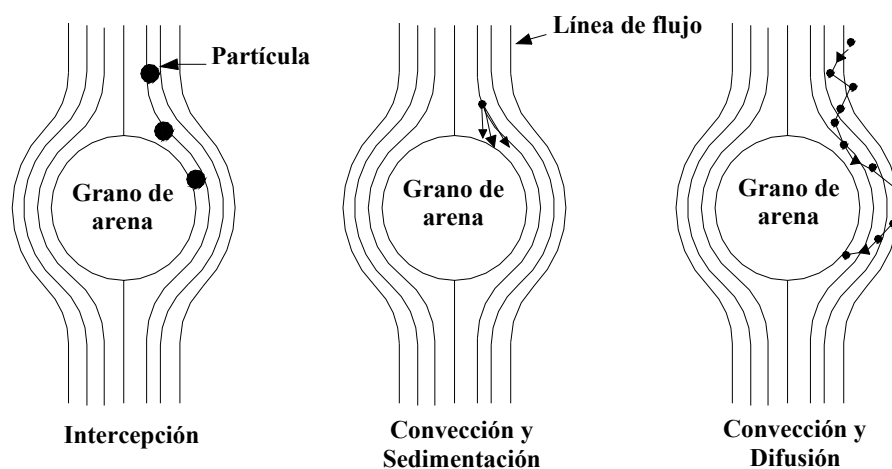
A continuación se describe brevemente la función de cada uno de los mecanismos físicos o de remoción que se producen en la filtración lenta, así como el mecanismo biológico responsable de la desinfección.

1. Mecanismos de transporte

Esta etapa de remoción básicamente hidráulica ilustra los mecanismos mediante los cuales ocurre la colisión entre las partículas y los granos de arena. Estos mecanismos son: cernido, intercepción, sedimentación, difusión y flujo intersticial.

- 1 Cernido: En este mecanismo, las partículas de mayor tamaño que los intersticios del material filtrante son atrapadas y retenidas en la superficie del medio filtrante.
- 1 Intercepción: Mediante este mecanismo las partículas pueden colisionar con los granos de arena.

- | Sedimentación: Este mecanismo permite que las partículas sean atraídas por la fuerza de gravedad hacia los granos de arena, lo que provoca su colisión. Este fenómeno se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas.
- | Difusión: Se produce cuando la trayectoria de la partícula es modificada por micro variaciones de energía térmica en el agua y los gases disueltos en ella, lo cual puede provocar su colisión con un grano de arena.
- | Flujo intersticial: Este mecanismo se refiere a las colisiones entre partículas debido a la unión y bifurcación de líneas de flujo que devienen de la tortuosidad de los intersticios del medio filtrante. Este cambio continuo de dirección del flujo crea mayor oportunidad de colisión.



Mecanismos de transporte

2. Mecanismo de adherencia

Este mecanismo es el que permite remover las partículas que, mediante los mecanismos arriba descritos, han colisionado con los granos de arena del medio filtrante. La propiedad adherente de los granos de arena es proporcionada por la acción de fuerzas eléctricas, acciones químicas y atracción de masas así como por película biológica que crece sobre ellos, y en la que se produce la depredación de los microorganismos patógenos por organismos de mayor tamaño tales como los protozoarios y rotíferas.

3. Mecanismo biológico de la desinfección

Como se indicó anteriormente, la remoción total de partículas en este proceso se debe al efecto conjunto del mecanismo de adherencia y el mecanismo biológico. Es necesario que para que el filtro opere como un verdadero “sistema de desinfección” se haya producido un schmutzdecke vigoroso y en cantidad suficiente. Solo cuando se ha llegado a ese punto, el FLA podrá operar correctamente. Entonces se dice que el filtro (o el manto) “está maduro”.

Al iniciarse el proceso, las bacterias depredadoras o benéficas transportadas por el agua utilizan como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica y pueden multiplicarse en forma selectiva, lo que contribuye a la formación de la película biológica del filtro. Estas bacterias

oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de ésta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta se convierten en materia viva. Los productos de la desasimilación son llevados por el agua a profundidades mayores y son utilizados por otros organismos.

El contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y es acompañado de un fenómeno de mortalidad concomitante, durante el cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas y así sucesivamente. De este modo, la materia orgánica degradable presente en el agua cruda se descompone gradualmente en agua, dióxido de carbono y sales relativamente inocuas, como sulfatos, nitratos y fosfatos (proceso de mineralización), los cuales son descargados en el efluente de los filtros.

La actividad bacteriológica descrita es más pronunciada en la parte superior del lecho filtrante y decrece gradualmente con la profundidad y la disponibilidad de alimento. Cuando se limpian las capas superiores del filtro se remueven las bacterias, siendo necesario un nuevo período de maduración del filtro hasta que se logre desarrollar la actividad bacteriológica necesaria. A partir de 0,30 a 0,50 m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula (dependiendo de la velocidad de filtración); en cambio, se producen reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación microbiológica (como aminoácidos) en amoníaco y a los nitritos en nitratos (nitrificación).



Como el rendimiento del filtro lento depende principalmente del proceso biológico, mientras la capa biológica está desarrollándose, la eficiencia es baja y no debe considerarse al FLA como un eliminador de materia orgánica, sino como un mejorador de la calidad del agua, sobretodo de la turbiedad.

La maduración de un FLA puede demorar de dos a cuatro semanas.

➤ **Subproductos de la desinfección mediante filtración lenta**

Los subproductos del proceso de filtración lenta son sustancias naturales de degradación biológica sin ningún riesgo para la salud, ya que el proceso no requiere sustancias químicas que reaccionen con la materia disuelta en el agua. En tal sentido, los subproductos de la filtración lenta son dióxido de carbono y sales relativamente inocuas, como sulfatos, nitratos y fosfatos, además de un contenido bajo de oxígeno disuelto. Estas condiciones pueden ser revertidas con un proceso de aireación.

➤ **Equipos e infraestructura**

Dada la sencillez de la filtración lenta, solo se requiere un equipo de bombeo cuando es necesario elevar la carga hidráulica para que el agua llegue hasta el filtro. Por otro lado, la calidad del agua cruda determina el uso de otras instalaciones adicionales al filtro lento a fin de adecuar la calidad del agua cruda a las condiciones de operación del filtro.

En el cuadro siguiente se muestra una síntesis de las alternativas de pretratamiento en función de las variaciones de calidad de la fuente para la instalación de un filtro lento de arena.

Criterios de selección de los procesos en función de la calidad de la fuente

ALTERNATIVAS	Límites de calidad del agua cruda aceptables		
	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtro lento de arena (FLA) solamente	To ≤ 50 UNT Co ≤ 50 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 20 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 100 UNT
FLA + prefiltro de grava (PG)	To ≤ 100 UNT Co ≤ 60 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 60 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 150 UNT
FLA + PG + sedimentador (S)	To ≤ 300 UNT Co ≤ 60 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 200 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 500 UNT
FLA + PG + S + presedimentador	To ≤ 500 UNT Co ≤ 60 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 200 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 1000 UNT

Co = Color del agua cruda To = Turbiedad del agua cruda
Cf = Coliformes fecales UC = Unidades de color cloro platinado de cobalto
UNT = Unidades nefelométricas de turbiedad

El parámetro de diseño más importante en un FLA es la velocidad de filtración (V_f). La misma debe tener un valor en el rango:

$$0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hora} - 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hora}$$

Se debe notar que $[\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ hora}] = [\text{m}/\text{hora}]$

Otros parámetros de diseño importantes en relación con el material filtrante son:

Lecho de soporte:

Camada	Tipo	Diámetro de partícula (mm)	Espesor de la camada (mm)
Superior	Arena gruesa	1 - 2	50
Segunda	Gravilla fina	2 - 5	50
Tercera	Gravilla	5 - 10	50
Inferior	Grava	10 - 25	150

Medio filtrante:

Tamaño efectivo, d_{10}	0,15 – 0,45 mm
Coefficiente de uniformidad CU	1,5 – 4,0
Altura del medio filtrante	0,5 – 0,7 m

Cuando el filtro lento es la única unidad de tratamiento, la velocidad será de 0,10 m/h. Se podrán considerar velocidades mayores en casos excepcionales cuando se consideren otros procesos preliminares, como se observa en el cuadro siguiente.

Velocidad de filtración de acuerdo con el número de procesos preliminares

Procesos	V_f (m/h)
FLA	0,10 – 0,20
Sedimentación (S) + FLA	0,15 – 0,30
Prefiltración (PF) + FLA	0,15 – 0,30
S + PF + FLA	0,30 – 0,50

La velocidad de diseño también es importante al decidir el número de unidades con las que operará el filtro. Con velocidades mayores de 0,2 m/h deberá considerarse un mínimo de tres unidades.

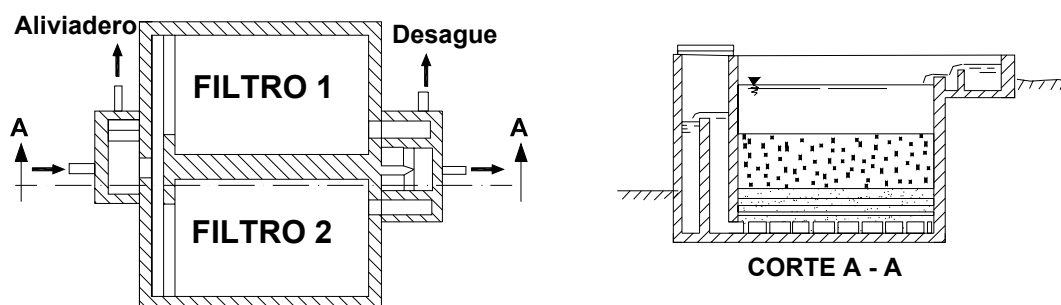
El área de cada unidad (A_s) es una función de la velocidad de filtración (V_f), del caudal (Q), del número de turnos de operación (C) y del número de unidades (N).

$$A_s = (Q \times C) / (N \times V_f)$$

Con operación continua el área de la unidad (en m^2) será igual a:

$$A_s = Q / (N \times V_f)$$

Los filtros lentos de arena pueden adoptar ser rectangulares o circulares, dependiendo del material con el que se elaboran: hormigón, ferrocemento o mampostería. La figura muestra un filtro lento modificado rectangular de hormigón.



Filtro lento modificado rectangular de hormigón

Requerimientos para la instalación

Para la instalación de la planta deben considerarse los siguientes aspectos:

a. Ubicación

- 1 Debe estar en una zona accesible, con vías de comunicación que faciliten su posterior construcción, operación y mantenimiento.
- 1 El agua subterránea debe estar ausente o muy profunda.
- 1 La zona debe ser segura y no estar expuesta a riesgos naturales o humanos.
- 1 De preferencia, la topografía de la zona seleccionada debe reunir los desniveles necesarios para que el sistema pueda operar totalmente por gravedad.

b. Aspectos relacionados con la comunidad

- 1 Efectuar estudios sociológicos para determinar las costumbres y creencias que puedan afectar la aceptación del sistema.
- 1 Comprobar la información demográfica disponible.
- 1 Determinar los recursos humanos y materiales disponibles para adecuar el diseño del sistema.
- 1 Estudiar la incidencia de enfermedades de origen hídrico y presencia de vectores.

c. Concepción del sistema

- 1 Para que la operación del sistema sea confiable, debe evitarse el uso de dispositivos para elevar el nivel del agua (bombas). De esta manera, la operación del sistema no dependerá del suministro de energía eléctrica ni de repuestos sofisticados que normalmente no están disponibles localmente y que incrementan el costo de mantenimiento del sistema.
- 1 Si tuviera que elevarse el nivel del agua por razones topográficas, se debería efectuar una sola etapa de bombeo que eleve el agua cruda hasta un nivel, desde el cual pueda distribuirse por gravedad al reservorio y a la red.
- 1 Preferentemente, el filtro lento debe operar en forma continua, esto permite unidades más pequeñas y abastecimiento continuo de nutrientes y oxígeno necesarios para mantener la capa biológica. Para garantizar esta situación, cuando se tiene una etapa de bombeo, es recomendable construir un tanque de almacenamiento de agua cruda para abastecer por gravedad la planta durante las 24 horas del día.

d. Condiciones del agua cruda

Las condiciones del agua cruda que más afectan la eficiencia del filtro son la temperatura, la concentración de nutrientes y de sustancias tóxicas y los afluentes con turbiedad y color altos. A continuación se describe brevemente:

- 1 **Temperatura**: Dado que en el filtro se desarrolla un proceso biológico, se ve afectado por las variaciones de temperatura y puede reducir 50% de su eficiencia cuando se opera a menos de 5° C.
- 1 **Concentración de nutrientes**: La velocidad de desarrollo de la formación biológica en el filtro depende de la concentración de nutrientes en el agua, debido a que ésta es la fuente de alimentación de los microorganismos.

- 1 **Concentración de algas:** Las algas son importantes en la formación del schmutzdecke. Pero su crecimiento excesivo debido a la elevada disponibilidad de luz y nutrientes, como presencia de fosfatos y nitratos en el agua, puede crear serios problemas de operación y en la calidad de agua tratada. El control de la formación de algas es difícil, pero puede solucionarse mediante el control de nutrientes en la fuente y del efecto de la luz que cubre los reservorios de agua cruda.
- 1 **Concentraciones altas de turbiedad:** La capacidad de los filtros lentos para reducir la turbiedad cuando ésta es muy elevada es limitada. Ello se debe a que una alta turbiedad causa enlodamiento de la superficie del filtro, disminuye la capacidad de formación de la capa biológica y reduce drásticamente la duración de la carrera de filtración, lo cual además de afectar la calidad del agua producida, incrementa los costos de operación y mantenimiento.

e. Material filtrante

- 1 Es necesario considerar una plataforma colindante con los filtros para efectuar la operación de lavado y secado de la arena. Asimismo, se requiere un depósito techado para guardar la arena embolsada y las herramientas, y cercar las instalaciones de la planta para evitar el acceso a niños y animales.

Operación y mantenimiento

Las tareas rutinarias de operación comprenden los ajustes y medición del caudal; monitoreo de la calidad del agua producida; limpieza de la superficie de la arena, que se efectúa por “rascado” de la porción superior del filtro (aproximadamente 5 cm de arena); lavado y almacenamiento de la arena, y la posterior reconstrucción del lecho filtrante. Este periodo entre limpiezas, llamado “carrera”, es variable. A veces puede ser necesario realizarla cada tres o cuatro semanas y en otras circunstancias, pasados muchos meses.

La adecuada operación y mantenimiento determinan la eficiencia del filtro, principalmente en la etapa de puesta en marcha o inicio de la operación del filtro nuevo. Durante la operación normal, es importante el estado de maduración de la capa biológica, la frecuencia de los raspados, el periodo de duración de cada operación de limpieza y la forma en que se efectúe el rearenado del filtro.

Con relación a la puesta en marcha, es necesario tener presente que la arena nueva no reduce la contaminación bacteriológica y que es necesario desechar el efluente inicial hasta comprobar que se está obteniendo un grado de eficiencia aceptable. Sin embargo, este proceso puede acelerarse sembrando el filtro con arena madura proveniente de otros filtros en operación.

El raspado del lecho filtrante debe iniciarse cuando el nivel del agua en la caja del filtro llega al máximo y el agua empieza a rebosar por el aliviadero.

Para disminuir el impacto sobre la eficiencia del tratamiento durante la operación de raspado del filtro, es necesario que esta operación se ejecute en un solo día para evitar la mortandad de los microorganismos benéficos en la capa de arena que permanecerá en el filtro y acortar el periodo de remaduración. En la operación de rearenado, esto es, cuando la altura del lecho ha llegado al mínimo aceptable (0,30 m) y hay que restituir a la arena el espesor de diseño, es importante aplicar el método de trinchera. Para ello, la arena del fondo que está semicolmatada se colocará en la

superficie del filtro, sobre la arena nueva, a fin de acelerar el período de maduración del lecho de arena.

Por lo menos cada cinco años se realizará el lavado completo del filtro de la siguiente manera: se retira con mucho cuidado la arena y la grava para no mezclarlas; se lava la arena; se cepillan las paredes de la caja del filtro; se reacomoda el drenaje, y se vuelve a colocar el lecho de arena y la grava. Si ha habido pérdida de arena y grava, será necesario reponerla. Si hay grietas en las paredes o en el fondo, deberán resanarse antes de colocar el lecho filtrante.

Cuando los sistemas están bien diseñados, operados y mantenidos, el efluente de las plantas de filtración lenta requiere de dosis muy bajas de cloro como última barrera; prácticamente sólo para asegurar que el agua conserve su calidad bacteriológica hasta ser consumida. Es un agua con muy bajo riesgo sanitario.

Criterios para el monitoreo y evaluación

La turbiedad y la contaminación bacteriológica del agua son los principales parámetros para la caracterización del agua superficial en las áreas rurales. Cuando el tratamiento se combina con un prefiltro o sedimentador, el objetivo específico de estas unidades es reducir la turbiedad, mientras que el del filtro lento es reducir la contaminación. Cuando sólo se cuenta con un filtro lento, éste debe cumplir los dos objetivos.

Un programa de monitoreo mínimo para controlar una planta de filtros lentos debería considerar la toma de muestras de agua cruda y tratada para constatar la calidad de la materia prima que está ingresando al sistema y la del producto final obtenido.

Las mediciones de turbiedad son simples y pueden ser efectuadas por un operador capacitado. Las mediciones diarias durante la época de lluvias permiten:

- a) Evaluar la calidad del agua cruda.
- b) Establecer y supervisar el rendimiento de la planta.
- c) Desarrollar criterios para adecuar la operación de la planta.
- d) Optimizar las características de las unidades.

Ventajas y desventajas de la filtración lenta

Ventajas	Desventajas
• La mayor ventaja de esta unidad reside en su simplicidad. El filtro lento sin controlador de velocidad y con controles de nivel mediante vertederos es muy sencillo y confiable de operar con los recursos disponibles en el medio rural de los países en desarrollo. • No hay cambios organolépticos en la calidad del agua • Las comunidades aceptan el agua tratada por la FLA	▮ El filtro lento sin pretratamiento, no debe operar con aguas con turbiedad mayor de 20 ó 30 UNT; esporádicamente se pueden aceptar picos de 50 a 100 UNT. ▮ La eficiencia de esta unidad se reduce con la temperatura baja. ▮ La presencia de biocidas o plaguicidas en el afluente pueden modificar o destruir el proceso microbiológico en el que se basa la filtración lenta.

Costos de equipos y de la operación y mantenimiento

Los costos de inversión de los filtros lentos están determinados, principalmente, por los costos del cemento, grava, acero de refuerzo, arena de filtro, tuberías, válvulas y demás. Los precios de estos materiales varían, dependiendo de diversas circunstancias regionales y locales. Por lo tanto, lo que se presenta a continuación es una estimación de costos de materiales por unidad de producción para cuatro diseños típicos. Debe tenerse en cuenta que este cuadro está basado en información recogida de un proyecto de filtración lenta; no incluye costos de mano de obra ni honorarios de los contratistas.

DESCRIPCIÓN	Costos de Capital en \$ por unidad de producción (m ³ /h)	Costo de Operación y Mantenimiento al año
▪ Filtro con taludes protegidos	\$ 1.000 – \$ 4.000	10% del total de los costos de capital
▪ Filtro circular de ferrocemento	\$ 1.500 – \$ 3.000	
▪ Filtro circular de mampostería	\$ 1.500 – \$ 6.000	
▪ Filtro de hormigón	\$ 3.000 – \$ 12.000	

Fuentes de información

Cánepa de Vargas, L.; Pérez Carrión, J. *Manual I, II y III. Teoría y evaluación. Diseño. Operación, mantenimiento y control*. Lima, OPS/CEPIS (1992).

Rojas, R.; Guevara, S. *Construcción, operación y mantenimiento del filtro de arena*. Hoja de Divulgación Técnica, 76. Lima, OPS/CEPIS, UNATSABAR (2000).

Solsona, F. *Filtração dinâmica*. Publicación OPS/Brasil. Serie Brasil Saúde e Ambiente, Documento Técnico S-2 (disponible en la OPS/CEPIS) (1995).

Van Dijk, J.C.; Oomen, J. *Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo*. IRC/OMS/CEPIS. Serie Documentos Técnicos No. 11 (1978).