

## **CAPÍTULO 3**

### **PROCESOS UNITARIOS Y PLANTAS DE TRATAMIENTO**

*Ing. Lidia de Vargas*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las diversas actividades agrícolas, ganaderas, industriales y recreacionales del ser humano han traído como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales con sustancias químicas y microbiológicas, además del deterioro de sus características estéticas.

Para hacer frente a este problema, es necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios, a fin de purificarla o potabilizarla para que pueda ser consumida por los seres humanos.

Una operación unitaria es un proceso químico, físico o biológico mediante el cual las sustancias objetables que contiene el agua son removidas o transformadas en sustancias inocuas.

La mayor parte de los procesos originan cambios en la concentración o en el estado de una sustancia, la cual es desplazada o incorporada en la masa de agua. Este fenómeno recibe el nombre de *transferencia de fase*. Son ejemplos de ello la introducción de oxígeno al agua (transferencia de la fase gaseosa a la líquida) y la liberación de anhídrido carbónico contenido en el agua (transferencia de la fase líquida a la gaseosa) mediante el proceso de aereación.

## 2. PRINCIPALES OPERACIONES UNITARIAS EMPLEADAS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

Los principales procesos de transferencia utilizados en el tratamiento del agua para consumo humano son los siguientes:

- transferencia de sólidos;
- transferencia de iones;
- transferencia de gases, y
- transferencia molecular o de nutrientes.

## **2.1 Transferencia de sólidos**

Se consideran en esta clasificación los procesos de cribado, sedimentación, flotación y filtración.

- **Cribado o cernido**

Consiste en hacer pasar el agua a través de rejillas o tamices, los cuales retienen los sólidos de tamaño mayor a la separación de las barras, como ramas, palos y toda clase de residuos sólidos. También está considerado en esta clasificación el microcernido, que consiste básicamente en triturar las algas reduciendo su tamaño para que puedan ser removidas mediante sedimentación.

- **Sedimentación**

Consiste en promover condiciones de reposo en el agua, para remover, mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas. Este proceso se realiza en los desarenadores, presedimentadores, sedimentadores y decantadores; en estos últimos, con el auxilio de la coagulación.

- **Flotación**

El objetivo de este proceso es promover condiciones de reposo, para que los sólidos cuya densidad es menor que la del agua asciendan a la superficie de la unidad de donde son retirados por desnatado. Para mejorar la eficiencia del proceso, se emplean agentes de flotación.

Mediante este proceso se remueven especialmente grasas, aceites, turbiedad y color. Los agentes de flotación empleados son sustancias espumantes y microburbujas de aire.

- **Filtración**

Consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso, normalmente de arena, en el cual actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión (agua más partículas) y del medio poroso.

Este proceso se utiliza como único tratamiento cuando las aguas son muy claras o como proceso final de pulimento en el caso de aguas turbias.

Los medios porosos utilizados además de la arena —que es el más común— son la antracita, el granate, la magnetita, el carbón activado, la cáscara de arroz, la cáscara de coco quemada y molida y también el pelo de coco en el caso de los filtros rápidos. En los filtros lentos lo más efectivo es usar exclusivamente arena; no es recomendable el uso de materiales putrescibles.

## 2.2 Transferencia de iones

La transferencia de iones se efectúa mediante procesos de coagulación, precipitación química, absorción e intercambio iónico.

- **Coagulación química**

La coagulación química consiste en adicionar al agua una sustancia que tiene propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea remover, lo que neutraliza la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso.

Los coagulantes más efectivos son las sales trivalentes de aluminio y hierro. Las condiciones de pH y alcalinidad del agua influyen en la eficiencia de la coagulación. Este proceso se utiliza principalmente para remover la turbiedad y el color.

- **Precipitación química**

La precipitación química consiste en adicionar al agua una sustancia química soluble cuyos iones reaccionan con los de la sustancia que se desea remover, formando un precipitado. Tal es el caso de la remoción de hierro y de dureza carbonatada (ablandamiento), mediante la adición de cal.

- **Intercambio iónico**

Como su nombre lo indica, este proceso consiste en un intercambio de iones entre la sustancia que desea remover y un medio sólido a través del cual se hace pasar el flujo de agua. Este es el caso del ablandamiento del agua mediante resinas, en el cual se realiza un intercambio de iones de calcio y magnesio por iones de sodio, al pasar el agua a través de un medio poroso

constituido por zeolitas de sodio. Cuando la resina se satura de iones de calcio y magnesio, se regenera introduciéndola en un recipiente con una solución saturada de sal.

- **Absorción**

La absorción consiste en la remoción de iones y moléculas presentes en la solución, concentrándolos en la superficie de un medio adsorbente, mediante la acción de las fuerzas de interfaz. Este proceso se aplica en la remoción de olores y sabores, mediante la aplicación de carbón activado en polvo.

### 2.3 Transferencia de gases

Consiste en cambiar la concentración de un gas que se encuentra incorporado en el agua mediante procesos de aereación, desinfección y recarbonatación.

- **Aereación**

La aereación se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros y también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersión o burbujeo.

Se usa en la remoción de hierro y manganeso, así como también de anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles, para controlar la corrosión y olores.

- **Desinfección**

Consiste en la aplicación principalmente de gas cloro y ozono al agua tratada.

- **Recarbonatación**

Consiste en la aplicación de anhídrido carbónico para bajar el pH del agua, normalmente después del ablandamiento.

### 2.4 Transferencia molecular

En el proceso de purificación natural del agua. Las bacterias saprofitas degradan la materia orgánica y transforman sustancias complejas en material

celular vivo o en sustancias más simples y estables, incluidos los gases de descomposición.

También los organismos fotosintéticos convierten sustancias inorgánicas simples en material celular, utilizando la luz solar y el anhídrido carbónico producto de la actividad de las bacterias y, a la vez, generan el oxígeno necesario para la supervivencia de los microorganismos aeróbicos presentes en el agua.

Este tipo de transferencia se lleva a cabo en la filtración, en la cual los mecanismos de remoción más eficientes se deben a la actividad de los microorganismos.

## **2.5 Otros procesos utilizados**

Además de los procesos de transferencia expuestos, también se utilizan en el tratamiento del agua para consumo humano la estabilización de solutos, la desalinización y la fluoruración.

- **Estabilización de solutos**

La estabilización de solutos consiste en transformar un soluto objetable en una forma inocua, sin llegar a su remoción. Son ejemplos de este proceso la transformación del anhídrido carbónico contenido en el agua en bicarbonato soluble mediante la adición de cal o el pasar el agua a través de lechos de mármol. También se puede citar la transformación de ácido sulfhídrico en sulfato.

- **Desalinización**

Proceso mediante el cual se remueve el exceso de cloruros en el agua, transformando las aguas salobres en dulces. Este proceso se puede realizar mediante destilación, ósmosis inversa, etcétera.

- **Fluoruración**

Adición de fluoruros al agua para evitar las caries dentales, principalmente en los niños menores de 5 años.

### **3. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA O PLANTAS POTABILIZADORAS**

Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios, convenientemente seleccionados con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por las normas.

#### **3.1 Tipos de plantas de tratamiento de agua**

Las plantas de tratamiento de agua se pueden clasificar, de acuerdo con el tipo de procesos que las conforman, en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta.

También se pueden clasificar, de acuerdo con la tecnología usada en el proyecto, en plantas convencionales antiguas, plantas convencionales de tecnología apropiada y plantas de tecnología importada o de patente.

##### *3.1.1 Plantas de filtración rápida*

Estas plantas se denominan así porque los filtros que las integran operan con velocidades altas, entre 80 y 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, de acuerdo con las características del agua, del medio filtrante y de los recursos disponibles para operar y mantener estas instalaciones.

Como consecuencia de las altas velocidades con las que operan estos filtros, se colmatan en un lapso de 40 a 50 horas en promedio. En esta situación, se aplica el retrolavado o lavado ascensional de la unidad durante un lapso de 5 a 15 minutos (dependiendo del tipo de sistema de lavado) para descolmatar el medio filtrante devolviéndole su porosidad inicial y reanudar la operación de la unidad.

De acuerdo con la calidad del agua por tratar, se presentan dos soluciones dentro de este tipo de plantas: *plantas de filtración rápida completa* y *plantas de filtración directa*.

- **Planta de filtración rápida completa**

Una planta de filtración rápida completa normalmente está integrada por los procesos de coagulación, decantación, filtración y desinfección. El proceso de coagulación se realiza en dos etapas: una fuerte agitación del agua para obtener una dispersión instantánea de la sustancia coagulante en toda la masa de agua (*mezcla rápida*) seguida de una agitación lenta para promover la rápida aglomeración y crecimiento del floculo (*etapa de floculación*).

La coagulación tiene la finalidad de mejorar la eficiencia de remoción de partículas coloidales en el proceso de decantación (sedimentación de partículas floculentas). El proceso final de filtración desempeña una labor de acabado, le da el pulimento final al agua.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, el filtro debe producir un efluente con una turbiedad menor o igual a 0,10 UNT para garantizar que esté libre de huevos de parásitos (*Giardia*, *Cryptosporidium*, etcétera). Para lograr esta eficiencia en la filtración, es necesario que los decantadores produzcan un agua con 2 UNT como máximo.

Finalmente, se lleva a cabo la desinfección, proceso común a los dos tipos de plantas, las de filtración rápida completa y las de filtración directa. La función principal de este proceso es completar la remoción de microorganismos patógenos que no quedaron retenidos en el filtro y servir de protección contra la contaminación que el agua pueda encontrar en el sistema de distribución.

La desinfección, en la forma en que normalmente se aplica (esto es, con residual libre de 1 mg/L a la salida de la planta y tiempo de contacto mínimo de 30 minutos), solo tiene la capacidad de remover bacterias. Como se verá detalladamente en el capítulo sobre desinfección, para remover huevos de parásitos se necesitarían aplicar dosis altísimas y disponer de tiempos de contacto muy largos, que hacen impracticable el proceso. Como los huevos de parásitos son grandes, un filtro que opere eficientemente y reciba agua con no más de 2 UNT puede producir un efluente exento de huevos de parásitos.

Las altas tasas con las que operan estos sistemas, así como el empleo de la coagulación (proceso cuya operación requiere sumo cuidado), demandan recursos



humanos capacitados, por lo que debe estudiarse con detenimiento la posibilidad de utilizarlos fuera de la zona urbana, en zonas marginales, rurales o, en general, en zonas económicamente muy deprimidas.

En los casos en que las características del agua cruda o el terreno disponible para construir la planta obliguen a adoptar este tipo de sistema, se deberán desarrollar las condiciones locales necesarias para asegurar una buena eficiencia en calidad y cantidad.

En el cuadro 3-1 se indican los rangos de calidad del agua en los que puede considerarse esta alternativa de tratamiento.

**Cuadro 3-1. Límites de calidad del agua aceptables para el tratamiento mediante filtración rápida completa (I)**

Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Turbiedad (UNT)	< 1.000	< 800	< 1.500; si excede, considerar presedimentación
Color (UC)	< 150	< 70	
NMP de coliformes termotolerantes/100 mL	< 600		Si excede de 600, se debe considerar predesinfección

- **Filtración directa**

Es una alternativa a la filtración rápida, constituida por los procesos de mezcla rápida y filtración, apropiada solo para aguas claras.

Son ideales para este tipo de solución las aguas provenientes de embalses o represas, que operan como grandes presedimentadores y proporcionan aguas constantemente claras y poco contaminadas.

Cuando la fuente de abastecimiento es confiable —caso de una cuenca virgen o bien protegida—, en la que la turbiedad del agua no supera de 10 a 20 UNT el 80% del tiempo, y no supera 30 UNT ni 25 UC el 90% del tiempo, puede considerarse la alternativa de emplear *filtración directa descendente*.

Cuando el agua viene directamente del río y aunque clara la mayor parte del año, presenta frecuentes fluctuaciones de turbiedad, normalmente se considera una floculación corta, generalmente de no más de 6 a 8 minutos, para obtener un efluente de calidad constante, aunque con carreras de filtración más cortas. Esta es la alternativa más restringida de todas en cuanto a la calidad de agua que se va a tratar.

En el caso de aguas que el 90% del tiempo no sobrepasan los 100 UNT y las 60 UC y alcanzan esporádicamente hasta 200 UNT y 100 UC, podrían ser tratadas mediante *filtración directa ascendente*.

La tercera alternativa disponible para aguas relativamente claras es la *filtración directa ascendente–descendente*. Esta alternativa es aplicable a aguas que el 90% del tiempo no sobrepasan las 250 UNT ni las 60 UC, y alcanzan esporádicamente más de 400 UNT y 100 UC.

El cuadro 3-2 sintetiza los rangos de calidad de agua óptimos para cada alternativa de tratamiento mencionada. Este tipo de soluciones requieren un amplio estudio de la fuente, para estar bien seguros de su comportamiento estacional, sobre todo durante los ciclos lluviosos.

**Cuadro 3-2. Límites de calidad del agua para plantas de filtración directa (1)**

Alternativa	Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtración directa descendente	Turbiedad (UNT)	25 - 30	<20	< 50
	Color verdadero (UC)	< 25		
	NMP de coliformes totales/100 mL	< 2.500		
	Concentración de algas (unidades/mL)	< 200		
Filtración directa ascendente	Turbiedad (UNT)	< 100	< 50	< 200
	Color (UC)	< 60		< 100
Filtración directa ascendente–descendente	Turbiedad (UNT)	< 250	< 150	< 400
	Color (UC)	< 60		< 100

Además de las especificaciones de calidad de agua indicadas en el cuadro anterior, se deberán tener en cuenta otros parámetros de calidad de la fuente que se indican en el cuadro 3-3.

**Cuadro 3-3. Otros parámetros de calidad importantes para la filtración directa (2)**

Parámetros	Valores recomendables
Sólidos suspendidos (mg/L)	< 50
Carbono orgánico total (mg/L)	< 5
pH	5,5–6,5
Fósforo total (mg/L)	< 0,05
Nitrógeno total (mg/L)	< 5
Clorofila ( $\mu\text{g/L}$ )	< 10
Coliformes totales (colif./100)	< 2.500
Hierro (mg/L)	10
Manganeso (mg/L)	2

Tener en cuenta estas restricciones es más importante en el caso de la filtración dinámica descendente, en la que el agua tiene un tiempo de retención muy corto dentro de la planta, alrededor de 5 minutos mientras atraviesa el mezclador y el filtro, por lo que si se producen bruscos cambios en la calidad en la fuente, no hay tiempo suficiente para modificar la dosificación.

Sin embargo, la economía que se obtiene en estos casos en el costo inicial de las obras al considerar apenas dos procesos, así como en la operación y mantenimiento de la planta (ahorro de 40% a 50% de sustancias químicas) justifica ampliamente el mayor costo de los estudios.

### 3.1.2 Plantas de filtración lenta

Los filtros lentos operan con tasas que normalmente varían entre 0,10 y 0,30 m/h; esto es, con tasas como 100 veces menores que las tasas promedio empleadas en los filtros rápidos; de allí el nombre que tienen. También se les conoce como *filtros ingleses*, por su lugar de origen.

Los filtros lentos simulan los procesos de tratamiento que se efectúan en la naturaleza en forma espontánea, al percolar el agua proveniente de las lluvias,

ríos, lagunas, etcétera, a través de los estratos de la corteza terrestre, atravesando capas de grava, arena y arcilla hasta alcanzar los acuíferos o ríos subterráneos. Al igual que en la naturaleza, los procesos que emplean estos filtros son físicos y biológicos.

Una planta de filtración lenta puede estar constituida solo por filtros lentos, pero dependiendo de la calidad del agua, puede comprender los procesos de desarenado, presedimentación, sedimentación, filtración gruesa o filtración en grava y filtración lenta.

Los procesos previos al filtro lento tienen la función de acondicionar la calidad del agua cruda a los límites aceptables por el filtro lento. Con el tren de procesos indicados se puede remover hasta 500 UNT, teniendo en cuenta que el contenido de material coloidal no debe ser mayor de 50 UNT; es decir, que la mayor parte de las partículas deben estar en suspensión para que sean removidas mediante métodos físicos.

El cuadro 3-4 indica el número de procesos que debe tener la planta para diferentes rangos de turbiedad, color y contaminación microbiológica del agua cruda.

**Cuadro 3-4. Límites de calidad del agua para tratamiento mediante filtración lenta (I)**

Procesos	Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtro lento	Turbiedad (UNT)	< 20	< 10	< 50
	Color verdadero (UC)	< 15	< 5	
	Concentración de algas (UPA/mL)	250		
	DBO5 (mg/L)	5		
	NMP de coliformes totales/100 mL	1.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	500		
Filtro lento + prefiltro de grava	Turbiedad (UNT)	25		
	Color (UC)	15	< 5	< 25
	NMP de coliformes totales/100 mL	5.000		

**Cuadro 3-4. Límites de calidad del agua para tratamiento mediante filtración lenta (I) (continuación)**

Procesos	Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
	NMP de coliformes fecales/100 mL	1.000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1.000		
Filtro lento + Prefiltro de grava + sedimentador	Turbiedad (UNT)	100	< 50	< 500
	Color (UC)	< 15	< 5	< 25
	NMP de coliformes totales/100 mL	10.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	3.000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1.000		
Filtro lento + Prefiltro de grava + sedimentador + presedimentador	Turbiedad (UNT)	100	< 50	< 1.000
	Color (UC)	< 15	< 5	< 25
	NMP de coliformes totales/100 mL	10.000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	3.000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1.000		

#### 4. CLASIFICACIÓN DE LAS PLANTAS DE FILTRACIÓN RÁPIDA POR EL TIPO DE TECNOLOGÍA UTILIZADA

Las características tecnológicas del sistema deben de estar de acuerdo con los recursos económicos, humanos y materiales disponibles localmente para que se puedan cumplir los objetivos de tratamiento previstos.

Por el tipo de tecnología utilizada en la Región, las plantas de filtración rápida se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Sistemas de tecnología convencional clásica o antigua.
- Sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS.
- Sistemas de tecnología patentada, normalmente importada de los países desarrollados.

## 4.1 Sistemas convencionales

### *Convencionales clásicos*

Este tipo de sistema es el más antiguo en nuestro medio. Se ha venido utilizando desde principios del siglo pasado (1910–1920). Se caracteriza por la gran extensión que ocupan las unidades, principalmente el decantador rectangular de flujo horizontal, el cual normalmente se diseña con tasas comprendidas entre 10 y 60  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ . Véase la figura 3-1.



**Figura 3-1.** Decantador rectangular de flujo horizontal (3)

Para mejorar el funcionamiento de los sistemas convencionales, se fueron agregando equipos mecánicos y actualmente la mayor parte de estos sistemas son mixtos, están constituidos por unidades hidráulicas y mecánicas.



**Figura 3-2.** Decantador de vuelta en U (3)

Inicialmente estas plantas carecían de mezcladores y se les agregó retromezcladores. Los floculadores pueden ser hidráulicos o mecánicos, los decantadores rectangulares de flujo horizontal y en algunos casos de vuelta en U, como el de la figura 3-2.

Los decantadores de vuelta en U tienen muchos problemas en su comportamiento, debido a que el giro del flujo dentro de la unidad ocasiona un camino oblicuo y en las zonas adyacentes se forman espacios muertos.

Los filtros son de tasa constante de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  y de nivel variable. Generalmente, el lecho filtrante es simple, solo de arena. Estas instalaciones se caracterizan por una gran galería de tubos a través de los cuales pasa el agua filtrada, el agua para el lavado de los filtros y el desagüe del retrolavado (figura 3-3). El agua y la carga para el retrolavado del lecho filtrante normalmente son proporcionadas por un tanque elevado, el cual es alimentado mediante una estación de bombeo desde la cisterna de aguas claras.



**Figura 3-3.** Galería de tubos convencional (3)

En la época en que estos sistemas fueron proyectados, el tratamiento de agua era más un arte que una ciencia. Las investigaciones más importantes en el campo del tratamiento del agua se realizaron a partir de la década de 1960. Antes de ello, los proyectistas aplicaban criterios y parámetros por intuición, con muy poco fundamento técnico. A esto se debe que estos sistemas presenten muchas deficiencias; sin embargo, debido al gran tamaño de las unidades, presentan un potencial enorme para convertirlos en sistemas convencionales de alta tasa. Su capacidad se puede incrementar por lo menos en tres o cuatro veces con muy poca inversión.

Los diseños de las figuras 3-4 y 3-5 muestran, en primer lugar, dos floculadores hidráulicos y dos decantadores convencionales de vuelta en U, con capacidad para tratar  $250 \text{ L/s}$ .

En el diseño de la figura 3-5, la misma planta, optimizada prácticamente sobre las mismas estructuras, está ahora compuesta por dos floculadores hidráulicos ampliados, cuatro decantadores de placas y una batería de cuatro filtros de tasa declinante y lavado mutuo, con canales intermedios de interconexión entre las unidades para darle mayor flexibilidad a la operación, algo que antes no tenía. De ese modo, se ha podido obtener una planta completa con capacidad para tratar  $550 \text{ L/s}$  a muy bajo costo.

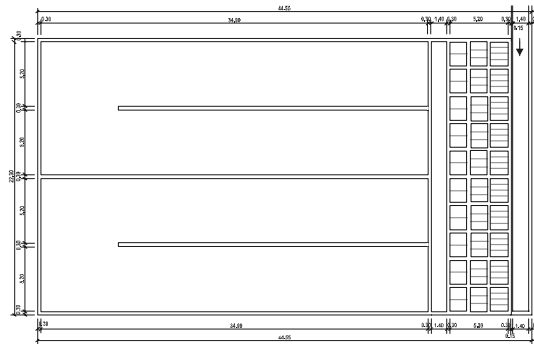


Figura 3-4. Sistema convencional antiguo

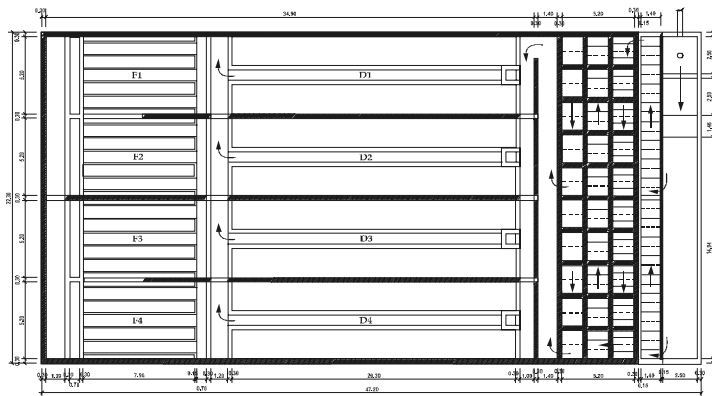


Figura 3-5. Sistema convencional optimizado

## 4.2 Sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS

Esta tecnología se empezó a desarrollar en la década de 1970 y se ha ido perfeccionando cada vez más a la luz de las últimas investigaciones realizadas en los países desarrollados. Las unidades son de alta tasa, ocupan una extensión que constituye el 25% ó 30% del área que ocupa un sistema convencional de la misma capacidad. La reducción del área se debe al empleo de floculadores verticales que por su mayor profundidad ocupan menos área que los horizontales y permiten compactar mejor el sistema. Véase la figura 3-6.

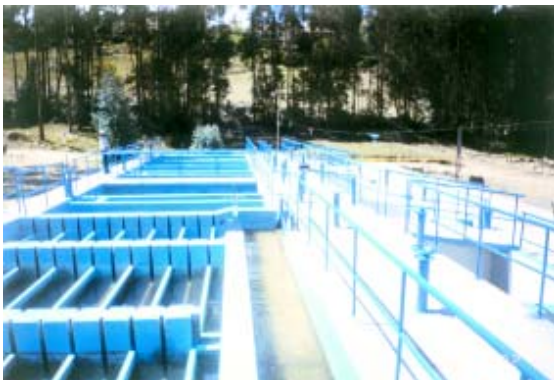
Los decantadores son de placas inclinadas a 60 °C, de tal modo que el área de decantación real es la suma de las proyecciones horizontales de todas las placas, lo que equivale a la superficie del fondo del decantador convencional.



Los filtros se proyectan en baterías para ser operados con altura variable y por el principio de tasa declinante, de acuerdo con el cual filtros operan con velocidades decrecientes, entre lavado y lavado, y se desfazan en la operación; de este modo, mientras unos están empezando las carreras los otros están a la mitad y el resto terminándola. Así, entre todos llegan a asumir la capacidad completa del sistema y el caudal permanece constante. El lavado de una unidad se efectúa



**Figura 3-6.** Floculadores hidráulicos de flujo vertical (3)



**Figura 3-7.** Planta de tecnología apropiada de 120 L/s (3)

mediante el caudal que producen los otros filtros en operación, por lo que no se precisa de sistema de bombeo ni de tanque elevado. En estos sistemas el agua decantada, filtrada, para el retrolavado y el desagüe del retrolavado se conducen mediante canales, no tienen galerías de tubos. Estas características hacen que este tipo de sistemas tengan un costo inicial muy bajo. El costo de operación también es mucho más bajo que el de otros sistemas, debido a que no requieren ener-

gía eléctrica para su funcionamiento, son muy compactos y se reduce también la cantidad de personal necesario para la operación.

Las principales ventajas de esta tecnología son las siguientes:

- **Es sumamente eficiente**

En su concepción se han empleado los resultados de las recientes investigaciones. Tiene el mérito de encerrar bajo su aspecto sencillo procesos

complejos y sumamente eficientes, por lo que realmente es una tecnología de avanzada.

- **Es fácil de construir, operar y mantener**

El equipamiento ha sido reducido al mínimo imprescindible. Los procesos se generan mediante energía hidráulica; el 100% de las obras son civiles. Por lo tanto, son fáciles de construir con los recursos normalmente disponibles en los países en desarrollo. La operación es sencilla porque carecen de mecanismos complicados y, por consiguiente, el mantenimiento es económico, fácil y rápido de realizar. Por estas razones, se la denomina *tecnología apropiada para países en desarrollo*.

- **Es muy económica**

La sencillez y el alto grado de compactación logrado en las estructuras hace que normalmente se utilice alrededor de 1/3 del área que requiere una planta convencional; el costo inicial es 1/3 ó la mitad del costo de los otros tipos de tecnologías disponibles.

- **Es muy confiable**

No requiere energía eléctrica para su funcionamiento; por lo tanto, puede trabajar en forma continua a pesar de la escasez del recurso. De este modo, se pueden garantizar las metas de calidad y cantidad.

De cualquier forma, hay que tomar en cuenta que este tipo de planta no es fácil de diseñar. Demanda un gran esfuerzo del proyectista. La planta requiere ser diseñada hasta el mínimo detalle para que el comportamiento hidráulico sea casi perfecto y se obtenga la máxima eficiencia remocional. Debe compactarse el diseño para facilitar la labor del operador, economizar mano de obra, evitar errores humanos y negligencia operacional.

#### **4.3 Tecnología importada, de patente o plantas paquete**

Estas tecnologías están normalmente integradas por decantadores de manto de lodos de suspensión dinámica, unidades que integran la mezcla rápida, la floculación y la decantación en un solo equipo, o cuando menos la floculación y decantación. Véase la figura 3-8.

Los filtros son de tasa constante y altura constante, para lo cual se requiere gran cantidad de equipos e instrumentación ubicados en las galerías de tubos. Véase la figura 3-9.

Las válvulas de accionamiento neumático o eléctrico y la instrumentación para determinar la pérdida de carga, el caudal de lavado, etcétera, son accionados desde las consolas o mesas de operación. Véase la figura 3-10.

Esta tecnología es importada de los países desarrollados y se caracteriza por considerar gran cantidad de equipos y alto grado de complejidad en las soluciones.



**Figura 3-8.** Decantador de manto de lodos (3)



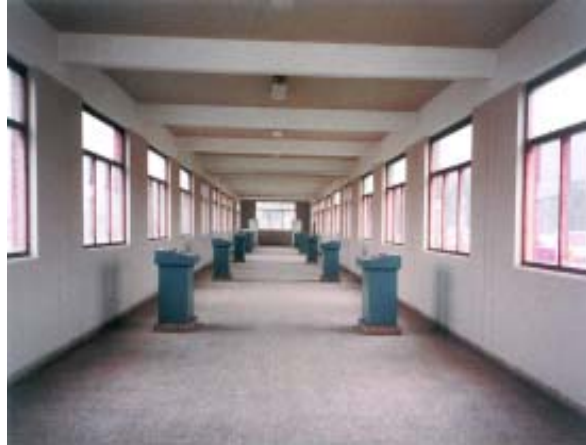
**Figura 3-9.** Galería de tubos de filtros de patente (3)

Son sistemas totalmente mecanizados, por lo que para cumplir con sus objetivos de calidad y cantidad, requieren por lo menos lo siguiente:

- Personal calificado para operación y mantenimiento.
- Programa de mantenimiento preventivo para los equipos y una existencia permanente de repuestos.
- Suministro confiable de energía eléctrica.

Estos recursos, que son corrientes en Europa y Estados Unidos, no son comunes en los países de América Latina.

La complejidad de estos sistemas va en aumento con el tiempo. Ahora los sistemas son más compactos porque el accionamiento es electrónico, lo cual dificulta aún más el mantenimiento y la calibración. A pesar de ello, estos sistemas son colocados de manera indiscriminada en localidades de escasos recursos.



**Figura 3-10.** Consolas para la operación de los filtros (3)

En nuestro medio es usual encontrar plantas de este tipo, con todos los equipos averiados debido a la mala operación y a la falta de recursos para darles mantenimiento. En la figura 3-11 se puede observar una unidad de manto de lodos que no funciona bien prácticamente desde que fue instalada, pero que por falta de recursos sigue pasando el agua, aunque el tratamiento es nulo.



**Figura 3-11.** Unidad de manto de lodos averiada (3)

La figura 3-12 muestra la galería de operación de una planta de patente donde no fue considerado el accionamiento manual de las válvulas y, como el sistema neumático está descompuesto, no es posible operar las válvulas y los filtros no se pueden lavar; sin embargo, la planta sigue funcionando así por falta de recursos.

## 5. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUA

La selección de la tecnología de producción y administración de un sistema de agua potable debería realizarse considerando los recursos, el grado de desarrollo socioeconómico y los patrones de cultura existentes. La experiencia en América Latina demuestra que el mayor problema no es la deficiencia tecnológica sino más bien la selección de la tecnología apropiada, la operación y el mantenimiento.



**Figura 3-12.** Galería de operación de los filtros (3)

La adopción de diseños basados únicamente en criterios de optimización técnica y soluciones tecnológicas importadas de países industrializados ha conducido a la elaboración de proyectos cuya operación y mantenimiento —por falta de sustancias químicas, repuestos y mano de obra calificada— resultan inadecuados.

Los factores básicos que caracterizan la selección de la tecnología apropiada para tratamiento de agua en los países en desarrollo y que deben ser considerados son los siguientes:

a) *Grado de complejidad*

La mayoría de los procesos unitarios utilizados en el tratamiento de agua pueden realizarse en reactores con diferente grado de complejidad y eficiencia. Afortunadamente, los más complejos no siempre resultan ser los más eficientes.

b) *La tecnología no opera por sí misma*

Plantas automatizadas necesitan personal de un alto nivel tecnológico para operar, mantener y reparar los controles y equipos. La selección tecnológica debe considerar la capacidad y los recursos de las instituciones e individuos

para operar y mantener los sistemas con la eficiencia y las especificaciones originales de diseño.

*c) Impacto indirecto en el área*

Debe considerarse una cadena de factores que se relacionan entre sí, tales como calidad de agua de las fuentes, grado de tratamiento, utilización de materiales y personal local, mejoras económicas indirectas, mejoramiento técnico de personal local, influencias indirectas en la economía y su repercusión directa e indirecta en la salud.

*d) Participación local*

El aprovechamiento y tratamiento de agua incluyen actividades técnicas, administrativas, financieras y legales que involucran a una serie de agencias locales.

## **5.1 Criterios de selección de una solución tecnológica**

A continuación se presenta una lista de carácter subjetivo, que no se debe considerar ni completa ni exhaustiva, con el objeto de que sirva como base de análisis.

*a) Grado de complejidad*

La solución seleccionada debe ser de simple construcción, operación, mantenimiento y reparación.

*b) Confiabilidad*

El sistema debe tener un grado de confiabilidad adecuado para cada componente del sistema. Si se establece un alto grado de confiabilidad con recursos limitados, se obtendrán soluciones muy costosas que solo pocos usuarios podrán afrontar.

*c) Flexibilidad*

La propuesta tecnológica debe producir agua de calidad óptima en forma continua, con un mínimo de operación y de fácil mantenimiento.

d) *Tiempo y plazo*

El proceso de construcción debe ser simple y efectuarse en un plazo corto.

e) *Disponibilidad de mano de obra*

La construcción, operación y mantenimiento deben considerar la capacidad local existente para ejecutar y dirigir las obras.

f) *Costo*

La tecnología seleccionada debe garantizar un agua potable óptima al menor costo posible.

g) *Accesibilidad*

El grado de accesibilidad al servicio de agua potable está directamente relacionado con la eficiencia de la selección tecnológica.

h) *Recursos necesarios*

Las alternativas tecnológicas para el tratamiento de agua requieren un grado o nivel de desarrollo de la comunidad o del sector para construir, operar y mantener la planta. Deben determinarse y analizarse los recursos necesarios para cada alternativa.

i) *Uso de materiales locales*

Siempre que sea posible, deben utilizarse materiales locales, de tal manera que se logren soluciones de alta tecnología a bajo costo.

j) *Relación con otros proyectos*

La tecnología seleccionada debe tener relación con otros proyectos locales, a fin de lograr una mayor flexibilidad.

k) *Organización administrativa*

Se debe contar con una organización adecuada para construir, operar, supervisar y mantener la planta de tratamiento, complementada con una estructura que provea los recursos económicos necesarios.

l) *Exactitud de las estimaciones*

Debe tenerse especial cuidado en la elaboración del presupuesto, sobre todo cuando la solución tecnológica seleccionada necesita equipos y materiales de importación que elevan los costos.

m) *Consideraciones políticas*

Debe considerarse la conveniencia de integrar el proyecto a los programas políticos existentes y su impacto en las acciones gubernamentales y en la comunidad.

## **5.2 Selección de procesos de tratamiento considerando las condiciones socioeconómicas de la comunidad**

El objetivo de este capítulo es seleccionar proyectos de una tecnología apropiada para la capacidad de los recursos locales, de tal manera que puedan ser construidos, operados, reparados y mantenidos eficientemente.

Considerando los factores intrínsecos del lugar y los indicadores socioeconómicos y tecnológicos, se efectúan comparaciones con las posibles alternativas de tratamiento, en función de los recursos humanos y materiales necesarios para cada caso. El uso de un sistema matricial permite la identificación del o de los procesos adecuados para las capacidades existentes en la localidad o país (figura 3-13).

El proceso total se esquematiza en la figura 3-14, dividida en dos fases: predictiva y evaluativa.

La metodología que se expone a continuación fue adaptada por el ingeniero José Pérez Carrión (4), tomando como base el procedimiento desarrollado por la Universidad de Oklahoma con el auspicio de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos y contó con la colaboración de diversos



organismos internacionales, tales como el CEPIS/OPS en América Latina, el Centro Internacional de Referencia/OMS de Holanda y las Universidades de Delft, Nairobi y Beirut, entre otras.

Sucintamente, el proceso consiste en considerar inicialmente toda la gama de procesos y soluciones posibles. Teniendo en cuenta las restricciones socioeconómicas, los recursos locales disponibles y la calidad del agua cruda, se seleccionan las alternativas que se adaptan a las condiciones existentes, las cuales son sometidas a un estudio económico para determinar finalmente la solución más satisfactoria (figura 3-13).

### 5.2.1 Fase predictiva

Considera el análisis de las condiciones involucradas en el proceso de selección.

#### a) Socioeconómicas

Se detallan en el cuadro 3-5. Cada parámetro está definido por un factor de peso que sirve para clasificar a las comunidades en un nivel de desarrollo conforme al criterio indicado en el cuadro 3-6.

**Cuadro 3-5 . Parámetros que permiten determinar el nivel tecnológico-social para comunidades en países en desarrollo (4)**

Número	Factores técnico-sociales	Selecciones posibles	Factor de peso
1	Nivel de educación	1	0
		2	5
		3	10
		4	15
2	Distribución de fuerza laboral	1	0
		2	5
		3	10
		4	15
3	Características de ingresos	1	0
		2	4
		3	8
		4	12
		5	15
4	Porcentaje de trabajadores foráneos	1	4
		2	3
		3	2
		4	1
		5	0
5	Escolaridad	1	0
		2	5
6	Más alto grado de enseñanza	0	0
		1 – 6	2
		7 – 10	4
		11 – 12	7
		12+	10
7	Distancia al colegio más cercano	1	3
		2	2
		3	1
		4	0
8	Disponibilidad de programas de entrenamiento y vocacionales	1	5
		2	0
9	Educación primaria obligatoria	1	10
		2	5
10	Disponibilidad de programas de entrenamiento en servicio	1	5
		2	5
11	Existencia de universidades	1	10
		2	0
12	Especialidad de química a nivel universitario	1	3
		2	0
13	Porcentaje de desempleo	1	0
		2	5

**Cuadro 3-5 . Parámetros que permiten determinar el nivel tecnológico-social para comunidades en países en desarrollo (4) (continuación)**

Número	Factores técnico-sociales	Selecciones posibles	Factor de peso
14	Disponibilidad de servicios de extensión	1	3
		2	0
15	Disponibilidad de estudiantes universitarios	1	0
		2	3
16	Nivel de tecnología disponible	1	0
		2	5
		3	10
		4	15
17	Gobierno como usuario de mano de obra	1	0
		2	5
18	Disponibilidad de cargos públicos	1	5
		2	0
19	Capacidad de financiamiento	1	0
		2	5
		3	10

**Cuadro 3-6. Clasificación de comunidades de acuerdo con el nivel de desarrollo (4)**

Nivel tecnológico-social	Puntaje
1. Elemental o básico	1 – 23
2. Medio	24 – 51
3. Relativamente avanzado	52 – 93
4. Avanzado	94 – 133

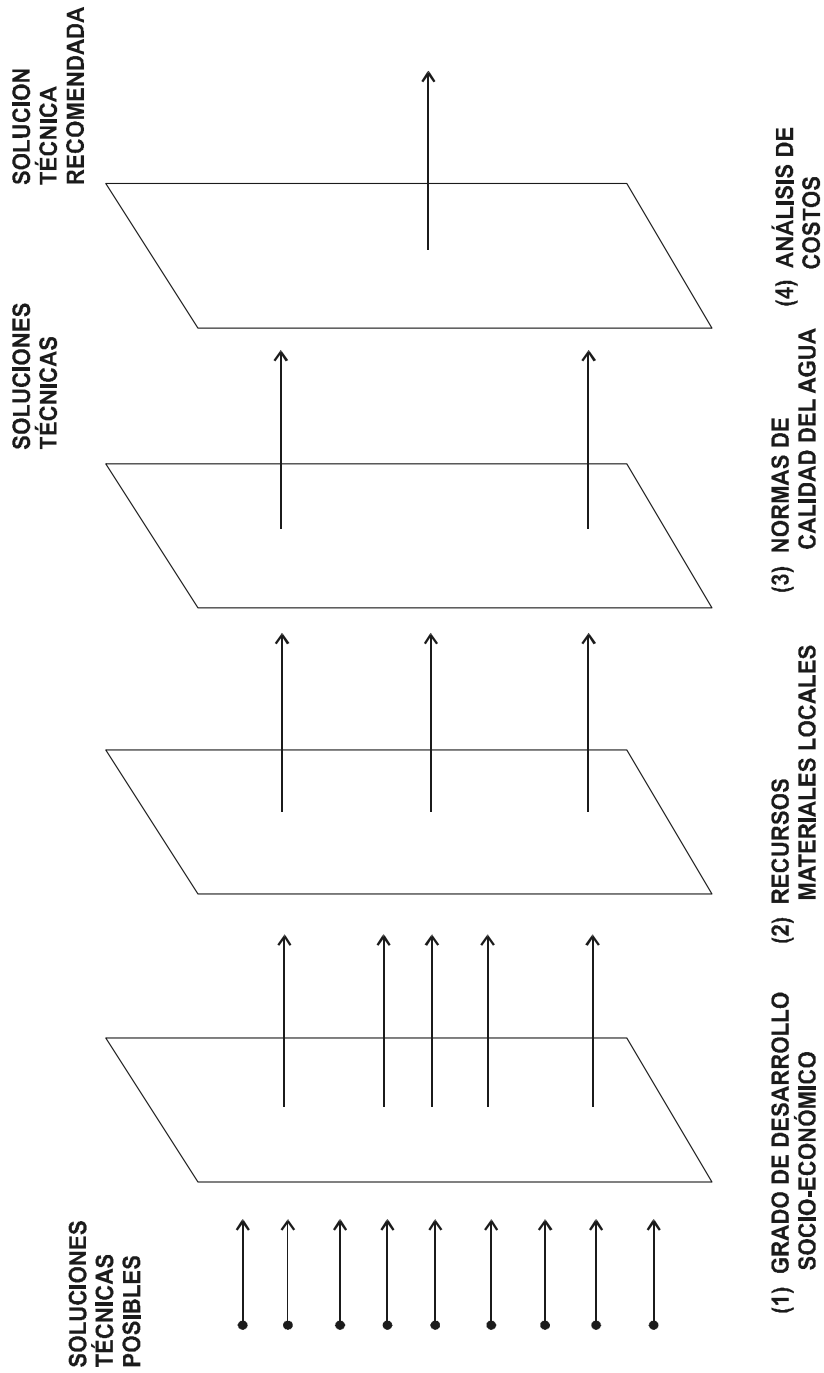


Figura 3-13. Esquema de metodología de selección del proceso de tratamiento de agua (4)

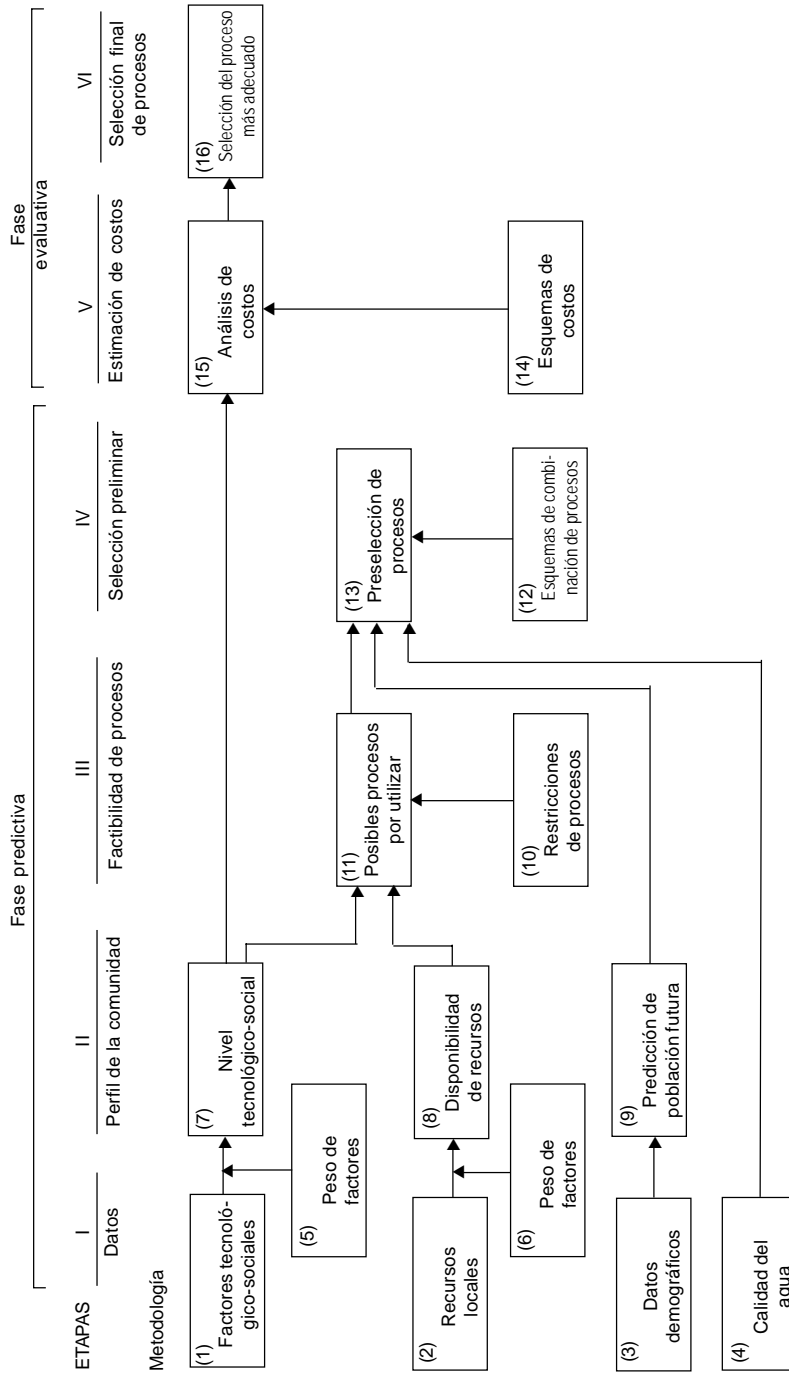


Figura 3-14. Selección de procesos de tratamiento de agua (4)

b) *Recursos locales*

Un esquema de los recursos locales se presenta en el cuadro 3-7; los diferentes elementos integrados allí permiten clasificar a la comunidad de acuerdo con sus recursos (véase el cuadro 3-8).

**Cuadro 3-7. Procesos de tratamiento de agua en componentes operacionales (4)**

Recursos Métodos de tratamiento	Humanos		Materiales				
	Capacitado	Profesional	Operación	Mantenim. equipos	Sustancias químicas	Disponibilidad de agua subterránea	Materiales
Sin tratamiento	X					X	X
Pretratamiento	X			X			
Filtración lenta	X			X			
Filtración rápida convencional	X	X	X	X	X		X
Filtración rápida avanzada	X	X	X	X	X		X
Ablandamiento	X	X	X	X	X		X
Desinfección	X		X	X	X		X
Sabor-olor-Fe, Mn	X		X	X	X		X
Desalinización (1)	X	X	X	X	X		X
Desalinización (2)	X	X	X	X	X		X
Filtros elementales	X			X			

**Cuadro 3-8. Clasificación de localidades por categorías según recursos (4)**

Categoría	Disponibilidad de recurso
1	Equipo de operación
2	Materiales elaborados
3	Materiales básicos
4	Sustancias químicas
5	Disponibilidad de agua subterránea

c) *Posibles procesos de tratamiento*

En el cuadro 3-9 se analizan los métodos de tratamiento más usuales y se los correlaciona con sus requerimientos de construcción y operación, lo cual permite establecer restricciones de uso de los procesos, de acuerdo con el nivel de desarrollo de la comunidad.

**Cuadro 3-9. Restricciones al uso de procesos de tratamiento de agua en función del grado de desarrollo de las localidades (4)**

Proceso	Nivel de desarrollo mínimo requerido	Observaciones
1. Sin tratamiento	I a II	Limitado por la calidad y capacidad de la fuente de agua
2. Pretratamiento		
2.1 Desarenadores	I	
2.2 Sedimentación simple	I	
2.3 Prefiltración gruesa	I	
2.4 Prefiltración rápida	III	
2.5 Microcernido	III	
2.6 Control de algas	IV	
2.7 Coagulación	III	
2.8 Floculación	III	
2.9 Sedimentación	III	
3. Filtración lenta		
3.1 Filtros convencionales	I	
3.2 Filtros modificados	I	
3.3 Filtros de flujo ascendente	II	
3.4 Filtros de medios compuestos	II	
3.5 Filtros dinámicos	I	
3.6 Filtros elementales	I	
4. Filtración rápida		
4.1 Convencional	III	En casos simples, hasta nivel II
4.2 Modificada	III	
4.3 Filtración directa	IV	
4.4 Filtración doble	IV	
5. Desinfección		Preferible II
5.1 Hipoclorito	I	
5.2 Cloro	III	
5.3 Yodo	IV	
5.4 Ozono	IV	
6. Otros procesos		
6.1 Control de olores y sabores	III	
6.2 Control de corrosión	III	
6.3 Control de algas	III	II en casos muy simples
6.4 Fluoruración	II	
6.5 Remoción de fluoruros	IV	III en casos simples
6.6 Remoción de contaminantes inorgánicos	IV	
6.7 Remoción de contaminantes orgánicos	IV	III en soluciones simples
6.8 Desalinización		
6.9 Disposición y tratamiento de lodos	IV	
6.10 Técnicas avanzadas de remoción de sólidos en suspensión	IV	
6.11 Ablandamiento	IV	III en casos simples
6.12 Aereación	II	IV en casos complicados

d) *Capacidad del sistema*

Siguiendo procedimientos convencionales o los detallados en este módulo, se puede realizar el análisis de población de consumo y establecer un periodo adecuado de diseño, en función del análisis económico correspondiente.

e) *Calidad del agua*

Se determinan las principales características físicas, químicas y bacteriológicas exigidas por las normas nacionales o, en ausencia de estas, por las Guías de Calidad de Agua Potable de la OMS, tomando en cuenta el tipo de análisis y la frecuencia.

f) *Preselección de procesos*

Una vez definidos los factores y las restricciones que influyen en la selección de procesos, el último paso de la fase predictiva consiste en realizar la selección y la combinación de los procesos unitarios más adecuados.

El cuadro 3-9 detalla la metodología adoptada por el CEPIS/OPS para seleccionar procesos de tratamiento de agua, así como diferentes soluciones tecnológicas para clarificar aguas, considerando el grado de desarrollo de la comunidad. Se supone que el agua cruda cumple con los límites permisibles del resto de características fisicoquímicas y bacteriológicas. En los procesos de componentes de filtración lenta se ha considerado la turbiedad originada principalmente por partículas en suspensión, con un tamaño mayor a un micrómetro. Aguas crudas con turbiedades originadas por partículas en estado coloidal requerirán procesos correctivos de plantas de filtración rápida con ayuda de coagulación.

### 5.2.2 *Fase evaluativa*

Consta de dos etapas: análisis de costos y selección final de los procesos.

a) *Análisis de costos*

En los “estudios de factibilidad” se deben determinar los costos de construcción, operación y mantenimiento, con un grado de confiabilidad que permita un orden adecuado de comparación. Se deben utilizar datos



del país o la región. En caso de no contar con datos propios, se puede recurrir a los siguientes criterios:

- $C$  =  $K Q^n$  (ecuación general de costos)  
 $c$  = Costo inicial en miles de dólares americanos  
 $Q$  = Capacidad de la planta en  $m^3/s$   
 $K$  y  $n$  = Constantes que dependen de la solución tecnológica y de los valores nacionales

El cuadro 3-10 detalla los valores de  $K$  y  $n$  para América Latina, referidos a 1977.

**Cuadro 3-10. Valores de  $K$  y  $n$  para América Latina (4)**

Solución	$K$	$n$
Filtración rápida convencional	1,656	0,66
Filtración rápida modificada	1,194	0,60
Filtración ascendente-descendente	1,074	0,59
Filtración ascendente	0,950	0,59

El método siguiente se usa para realizar estimaciones comparativas de costos. Consiste en correlacionar los costos de materiales y mano de obra locales con los de Estados Unidos para obtener el costo total, utilizando los criterios detallados en el cuadro 3-11.

**Cuadro 3-11. Criterios de selección de procesos de tratamiento de agua (4)**

		Turbiedades UN (normal-media-máxima) y tamaño de partículas >10 micrómetros					
		5-10-20	30-50-100	100-150-250	250-750-1200	250-750-1.000	10.000
Urbana	Sin capacidad de operación	Filtración lenta	Filtración lenta	Sedimentación laminar y filtración lenta	Prefiltración/ sedimentación laminar simple filtración lenta	Predimentación/ sedimentación laminar y filtración lenta	Uso de otras fuentes
	Con capacidad de operación	Filtración directa descendente	Filtración lenta ascendente	Filtración directa ascendente/ descendente	Filtración rápida	Filtración rápida con o sin predimentación	Filtración rápida + predimentación
Rural	Con capacidad de operación	Filtración directa descendente	Filtración directa ascendente	Filtración directa ascendente	Filtración rápida	Filtración rápida con o sin predimentación	Filtración rápida + predimentación
	Sin capacidad de operación	Desinfección	Filtración lenta	Prefiltración y filtración lenta	Sedimentación laminar/ prefiltración y filtración lenta	Predimentación/ sedimentación laminar/ prefiltración y filtración lenta	Uso de otras fuentes

$$C_4 = C_2 + nC_3, \text{ siendo :}$$

$$C_2 = C_1(P) \frac{X_7 \cdot X_9}{X_{10}} + \frac{X_8 \cdot X_{11}}{X_{12}} + X_{13} \cdot X_{15} + X_{14} \cdot X_{10}$$

$$C_3 = C_5(P) \frac{X_7 \cdot X_9}{X_{10}} + \frac{X_8 \cdot X_{11}}{X_{12}} + X_{13} \cdot X_{15} + X_{14} \cdot X_{16}$$

Siendo:

$C_1$	=	Costo total de construcción en dólares americanos por habitante servido
$C_2$	=	Costo total de construcción para el proceso
$C_3$	=	Costo de mantenimiento para el proceso por año
$C_4$	=	Costo total del proceso en $n$ años
$C_5$	=	Costo de mantenimiento per cápita en dólares americanos
$P$	=	Población servida
$X_7$	=	Porcentaje de mano de obra no especializada (local)
$X_8$	=	Porcentaje de mano de obra especializada (local)
$X_9$	=	Jornal no especializado (local)
$X_{10}$	=	Jornal no especializado (Estados Unidos)
$X_{11}$	=	Jornal especializado (local)
$X_{12}$	=	Jornal especializado (Estados Unidos)
$X_{13}$	=	Porcentaje de materiales manufacturados (local)
$X_{14}$	=	Porcentaje de materiales manufacturados (exportados)
$X_{15}$	=	Costo de materiales manufacturados (local/Estados Unidos) en el lugar
$X_{16}$	=	Costo de materiales manufacturados (local/Estados Unidos) fuera del lugar
$n$	=	Periodo de diseño en años

Dependiendo también el costo de la capacidad de la planta, se sugiere la siguiente subclasificación (cuadro 3-12), basada en el tamaño de la población:

**Cuadro 3-12. Clasificación basada en el tamaño de la población (4)**

Tamaño	Población/hab
1	800 – 2.499
2	2.500 – 14.999
3	15.000 – 49.999
4	50.000 – 100.000

Para facilitar el cálculo se incluyen en los cuadros 3-13 y 3-14 los porcentajes de costo de mano de obra y materiales para los procesos más usuales, que servirán tanto para la determinación de costos de construcción como de operación y mantenimiento. Estos datos servirán como valores de referencia únicamente, ya que dependen del grado de desarrollo socioeconómico del país o región, así como de las condiciones locales imperantes.

**Cuadro 3-13. Porcentaje de costos de construcción para los sistemas de tratamiento más comunes (4)**

Cloración	Mano de obra			Materiales		
	No especializada	Especializada	% del costo del proyecto	Nacionales	Importados	% del costo del proyecto
Cloración	30	10	30	20	50	70
Sedimentación y filtración	50	20	70	20	10	30
Filtración lenta	40	20	60	30	10	40
Filtración rápida	5	35	40	20	40	60

**Cuadro 3-14. Porcentaje de costos de operación para sistemas de tratamiento más comunes (4)**

Cloración	Mano de obra			Materiales		
	No especializada	Especializada	% del costo del proyecto	Nacionales	Importados	% del costo del proyecto
Cloración	10	4	50	10	40	50
Sedimentación y filtración	90	5	95	5	0	5
Filtración lenta	80	1	90	10	0	10
Filtración rápida	60	20	80	15	5	20

A continuación se indican las ecuaciones de costo promedio para América Latina, para realizar estimaciones específicas de costos de plantas.

1. *Filtros lentos:*

$$\begin{aligned} \text{Ln } Cc &= 2,541 + 0,0096 \text{ Ln } X_4 - 0,3628 \text{ Ln } X_5 \\ \text{Ln } Com &= 0,3559 - 0,1511 \text{ Ln } X_5 \\ \text{Ln } C'c &= 3,7997 - 0,0799 \text{ Ln } X \\ \text{Ln } C'om &= 1,6751 + 0,0016 \text{ Ln } X_4 - 0,6316 \text{ Ln } X_6 \end{aligned}$$

2. *Filtros rápidos:*

$$\begin{aligned} \text{Ln } Cc &= 3,4597 + 0,0021 \text{ Ln } X_4 - 0,0901 \text{ Ln } X_6 \\ \text{Ln } Cop &= 6,1328 - 0,0027 \text{ Ln } X_5 - 0,0230 \text{ Ln } X_6 \\ \text{Ln } C'c &= 2,0127 - 0,0238 \text{ Ln } X_4 - 0,3007 \text{ Ln } X_6 \\ \text{Ln } C'om &= 4,7829 + 0,0448 \text{ Ln } X_4 - 0,0530 \text{ Ln } X_6 \end{aligned}$$

Siendo:

$X_4$	=	Costo de materiales importados en % del total
$X_5$	=	Población de diseño (miles)
$X_6$	=	Capacidad de la planta MGD
$Cc$	=	Costos de construcción (US\$/cápita)
$Com$	=	Costos de operación y mantenimiento (US\$/año/cápita)
$C'c$	=	Costos de construcciones (US\$/MGD)
$C'om$	=	Costos de operación y mantenimiento (US\$/año/MGD)

b) *Selección final de los procesos*

La etapa final consistiría en estudiar las diferentes alternativas planteadas y seleccionar la más ventajosa, considerando los factores técnicos y socioeconómicos.

### 5.2.3 Aplicación

Se presenta un ejemplo tomado del Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Control de Calidad de Agua para Consumo Humano, Módulo 2.8, preparado por el ingeniero José M. Pérez Carrión, para seleccionar los procesos unitarios integrantes de la planta de tratamiento de agua para Cochabamba, Bolivia.

## Etapa predictiva

### i. Información general

- a. Ubicación de la comunidad
- |                     |                   |
|---------------------|-------------------|
| Nombre de la ciudad | <u>Cochabamba</u> |
| Estado o provincia  | <u>Cochabamba</u> |
| País                | <u>Bolivia</u>    |
- b. Grupo o dependencia de planificación
- |  |               |
|--|---------------|
|  | <u>SEMAPA</u> |
|--|---------------|

### ii. Información demográfica

El modelo requiere algunos datos básicos sobre la población para poder hacer planes de capacidad. Se necesitan dos elementos. Si no se pueden obtener datos locales, se debe utilizar un estimado nacional e indicar si es de fuente local o nacional.

Responder la A o la B.

- A. 1. *Población actual.* La cifra o estimación de la población actual debe reflejar el número de habitantes que serán servidos por la instalación de tratamiento de aguas negras o agua potable propuesta.

Población real 180.000 o estimar lo siguiente:

- \_\_\_\_\_ (1) entre 500 y 2.500 personas
- \_\_\_\_\_ (2) 2.500 – 15.000
- \_\_\_\_\_ (3) 15.000 – 50.000
- \_\_\_\_\_ (4) 50.000 – 100.000
- \_\_\_\_\_ (5) > 100.000

2. Tasa anual de crecimiento demográfico 3% o la siguiente estimación:

- \_\_\_\_\_ (1) Menos de 1%
- \_\_\_\_\_ (2) 1% – 1,5%

- \_\_\_\_\_ (3) 1,5% – 2,0%
- \_\_\_\_\_ (4) 2,0% – 2,5%
- \_\_\_\_\_ (5) 2,5% – 3,0%
- \_\_\_x\_\_\_ (6) 3,0% – 3,5%
- \_\_\_\_\_ (7) 3,5% – 4,0%
- \_\_\_\_\_ (8) Más de 4%
- \_\_\_\_\_ (9) Fuente \_\_\_\_\_

B. Estimado de la población según el último censo \_\_\_\_\_

Fecha del censo: 1972 Fuente del censo: \_\_\_\_\_

iii 1. **Datos sociotecnológicos.** Nivel promedio de escolaridad de los habitantes en esa comunidad.

**Cuadro 3-15. Niveles de escolaridad (4)**

Nivel	Nulo	Primaria	Secundaria	Técnica	Universidad
(1)	95%	4%	1%	0%	0%
(2)	70%	19%	7%	3%	1%
(3) X	55%	22%	14%	6%	3%
(4)	9%	34%	42%	8%	7%
(5) X	Otro				

2. Distribución promedio de la fuerza de trabajo en la comunidad

**Cuadro 3-16. Distribución promedio de la fuerza laboral (4)**

Nivel	No calificado	Semicalificado	Profesional
(1)	97%	2%	1%
(2)	80%	16%	4%
(3) X	61%	27%	12%
(4)	45%	30%	25%

3. Ingreso promedio anual por familia en dólares.

<u>1 .470</u>	<u>US\$</u>
Cantidad	Unidades

4. ¿Qué porcentaje de los trabajadores técnicos y altamente calificados (p. ej., químicos, ingenieros, etcétera) no son del lugar o del país?

(1) Menos de 10%

(2) 10% – 25%

(3) 25% – 50%

(4) 50% – 70%

(5) 75% – 100%

5. ¿Existen escuelas primarias o secundarias de organismos voluntarios o de misioneros en lugar de gubernamentales?

(1) Sí                       (2) No

6. ¿Hasta qué año o curso llegan las escuelas locales en forma regular? (marcar con un círculo).

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 12+

7. Si la respuesta indicada en la pregunta anterior es menos de 12, ¿a qué distancia queda la escuela más cercana que ofrece hasta el 12.º curso?

(1) Menos de 16 km (o menos de 10 millas)

(2) 16 – 48 km (o 10 – 30 millas)

(3) 48 – 80 km (o 30 – 50 millas)

(4) Más de 80 km (o más de 50 millas)

(5) Otros (especificar) \_\_\_\_\_





16. En general, se puede clasificar el nivel de tecnología como:
- \_\_\_\_\_ (1) herramientas manuales solamente
- x   (2) herramientas mecánicas (p. ej., equipo movido por gasolina)
- \_\_\_\_\_ (3) productos químicos (fertilizantes, cloro)
- \_\_\_\_\_ (4) tecnología electrónica
17. ¿Está dominado el mercado de trabajo por el gobierno?
- \_\_\_\_\_ (1) Sí                      x   (2) No
18. ¿Existen servicios públicos de colocación de empleados fácilmente disponibles?
- \_\_\_\_\_ (2) Sí                      x   (2) No

## Recursos locales

19. *Equipo de operación.* ¿Cuáles de los siguientes elementos no se encuentran generalmente en la localidad?
- x   (1) Medidores de agua
- \_\_\_\_\_ (2) Equipo para soldadura
- \_\_\_\_\_ (3) Sopletes de acetileno
- x   (4) Dispositivos de registro como termostatos
- \_\_\_\_\_ (5) Equipo de laboratorio como tubos de ensayo
- \_\_\_\_\_ (6) Plantas de electricidad portátiles como generadores de gas
- \_\_\_\_\_ (7) Motores como, por ejemplo, motores eléctricos de 1-3 caballos

\_\_\_\_\_ (8) Bombas de agua

20. *Materiales procesados.* ¿Cuáles de los siguientes materiales generalmente no se encuentran en la localidad?

\_\_\_\_\_ (1) Tubería (arcilla, acero, cemento, plástico, cobre, etcétera)

  x   (2) Conexiones para tubería

\_\_\_\_\_ (3) Pintura

  x   (4) Válvulas

\_\_\_\_\_ (5) Tanques

\_\_\_\_\_ (6) Medidores de vacío

  x   (7) Intercambiadores de calor

21. *Suministros para operación y mantenimiento.* ¿Cuáles de los siguientes no se encuentran generalmente en la localidad?

\_\_\_\_\_ (1) Arena de sílice

\_\_\_\_\_ (2) Grava graduada

\_\_\_\_\_ (3) Agua limpia

\_\_\_\_\_ (4) Gasolina

22. *Suministros químicos.* ¿Cuáles de los siguientes no se encuentran generalmente en la localidad?

  x   (1)  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (sulfato de aluminio)

  x   (2)  $\text{FeCl}_3$  (cloruro férrico)

- (3) Carbón activado
- (4) CaO (cal)
- (5) NaCO<sub>3</sub> (sosa)
- (6) Cl<sub>2</sub> (cloro)
- (7) O<sub>3</sub> (ozono)
- (8) Productos químicos para laboratorio

23. Principal fuente de agua (marcar la categoría apropiada)

- (1) Río o arroyo
- (2) Lago o presa
- (3) Pozos
- (4) Mar o agua salobre

24. Características de las aguas

**Cuadro 3-17. Características de las aguas (4)**

Características	Parámetro	Valor		Unidad
		Mínimo	Máximo	
Físicas	Turbiedad	8	650	UJ
	Color	5	20	UC
Químicas	pH	6,7	9,1	
	Alcalinidad	10	65	mg/L
	Dureza	12	139	mg/L
	Hierro	0,0	0,02	mg/L
Bacteriológicas	NMP	100	1.000	x 100 mL

Datos que, analizados de acuerdo con lo detallado en el cuadro 3-6, dan el siguiente resultado, que permite calificar a Cochabamba con un grado de desarrollo relativamente avanzado, pero con recursos limitados para operación y mantenimiento de sistemas de agua potable.

**Cuadro 3-18. Nivel de desarrollo (4)**

N.º	Factores técnico-sociales	Factor de peso
1	Nivel de educación	10
2	Distribución de fuerza laboral	10
3	Ingresos	4
4	Trabajadores foráneos	4
5	Escolaridad	5
6	Grado de enseñanza	10
7	Distancia a colegios	3
8	Programa de entrenamiento técnico	5
9	Educación primaria obligatoria	10
10	Adiestramiento en servicio	5
11	Existencia de universidades	5
12	Especialidad de química	3
13	Desempleo	0
14	Servicios de extensión	3
15	Disponibilidad de estudiantes universitarios	0
16	Nivel de tecnología	5
17	Gobierno como usuario de mano de obra	5
18	Disponibilidad de cargos públicos	0
19	Capacidad de financiamiento	5
<b>Total</b>		92

De acuerdo con la calidad del agua cruda y el grado de desarrollo de la comunidad, los procesos de tratamiento de aguas pueden ser los que se señalan en el cuadro 3-19:

**Cuadro 3-19. Posibles procesos de tratamiento (4)**

	Primera alternativa	Segunda alternativa
1	Coagulación mecánica	Coagulación hidráulica
2	Floculación mecánica	Floculación hidráulica
3	Sedimentación convencional	Sedimentación laminar
4	Filtración rápida convencional	Filtración rápida modificada
5	Desinfección	Desinfección

Si la población de diseño es de 260.000 habitantes y el consumo máximo diario de 250 litros/hab/día, el caudal de diseño será:

$$Q.d = \frac{260.000 \times 0,250}{86.400} = 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$$

### **Etapas evaluativa**

Con las alternativas planteadas, tenemos los siguientes costos:

$$C_1 = 1.656 Q^{0,66} = 1.656 \times 0,75^{0,66} = 1.369 \times 1.000 \text{ US\$}$$

$$C_2 = 1.194 Q^{0,60} = 1.194 \times 0,75^{0,60} = 1.004 \times 1.000 \text{ US\$}$$

Se justifica así la segunda alternativa, desde el punto de vista técnico y económico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Pérez Carrión, J. M. y Vargas, L. *El agua. Calidad y tratamiento para consumo humano*. Manual I, Serie Filtración Rápida. Programa Regional HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua.
- (2) Di Bernardo, L. *Métodos y técnicas de tratamiento de agua*. Volumen II. Rio de Janeiro, ABES, 1993.
- (3) Vargas, L. Fotos de archivo. Lima, CEPIS.
- (4) Pérez Carrión, J. M. *Selección de procesos en función del grado de desarrollo de las comunidades*. Lima, CEPIS.