

## Capítulo 2

# DESINFECCIÓN SOLAR



## **Introducción**

Uno de los métodos de desinfección más simples y menos costosos para suministrar agua de calidad aceptable para el consumo humano es la radiación solar, que algunos técnicos han dado en llamar SODIS (del inglés “solar disinfection”). Este método es ideal cuando las condiciones económicas y socioculturales de la comunidad ponen en riesgo la sostenibilidad de otras alternativas de tratamiento y desinfección, como la filtración o el uso de cloro, aún cuando éstas también sean reconocidas como simples y económicas.

En este capítulo se analizan algunas alternativas de bajo costo para la desinfección del agua mediante energía solar, principalmente aquellas factibles en comunidades rurales. Según el mecanismo de desinfección, estas alternativas pueden ser clasificadas en procesos en tanda (“batch”) y continuos.

Es necesario aclarar que la técnica es más adecuada para el tratamiento del agua en el ámbito familiar o para grupos de viviendas, antes que para sistemas convencionales o más complejos. Obviamente, solo es viable en aquellos lugares donde exista conveniente radiación solar.

## **Propiedades de la desinfección solar y descripción del método**

El proceso de desinfección solar es un proceso térmico que consiste en elevar la temperatura del agua por un espacio suficiente de tiempo en contenedores acondicionados para lograr la absorción del calor proveniente de la radiación solar. Estos contenedores pueden ser de diversos materiales conductores del calor; en todos los casos se busca que sean de color negro porque absorben mejor el calor en oposición a los colores claros, que por sus propiedades reflectoras acopian menos calor. El color oscuro permite un aumento acelerado de la temperatura del agua y la conservación del calor por más tiempo.

A pesar de lo interesante del método y de sus escasos requerimientos, la SODIS no ha alcanzado popularidad extendida. La razón es que hay demasiadas variables que condicionan su eficiencia y la eventual seguridad del agua tratada. La latitud y la altitud geográfica, la estación, el número de horas de exposición, la hora, las nubes, la temperatura; el tipo, el volumen y el material de los envases que contienen el agua; la turbiedad de agua y el color; son, entre otros, los parámetros que podrían interferir en una desinfección perfecta.

La Organización Mundial de la Salud considera a la SODIS una opción válida, pero solo como un “método menor y experimental”. Aun así, en áreas donde no hay otro medio disponible para desinfectar el agua, puede mejorar sustancialmente la calidad bacteriológica de la misma y representa un ejemplo más de lo que se expresó en el primer capítulo: que en ocasiones, si no se puede lograr la perfección, un paso hacia el “mejoramiento” es mejor que nada. Debe hacerse notar que en las comunidades en las que se ha promocionado este método de desinfección, se han obtenido mejores resultados cuando la medida fue promovida y vigilada por funcionarios de salud o por personal capacitado y dedicado (por ejemplo, voluntarios de alguna ONG ubicada en la comunidad).

La tecnología de la SODIS usa equipos como el calentador solar (de producción continua) y los sistemas en tanda, entre los que figuran la cocina solar, el concentrador solar y una gama de destiladores, los que más adelante serán descritos en detalle. También se hará referencia a la propuesta suiza de la desinfección en botellas y recipientes de menor volumen.

Todos esos equipos son sencillos, económicos y fáciles de operar. La aceptación que han tenido en varias regiones del mundo ha confirmado que representan una solución atractiva y apropiada.

### **Mecanismos de la desinfección solar**

Existe un par de trabajos que postulan que buena parte del poder de desinfección de la SODIS se debe a la acción fotoquímica. Tal como se verá en un capítulo posterior, la radiación ultravioleta tiene el poder de aniquilar microorganismos y por ello se ha argumentado que la porción ultravioleta que acompaña a la porción visible cuando se expone agua a la luz del sol sería la responsable de la acción bactericida. Pero lo cierto es que la porción realmente bactericida del componente ultravioleta, que corresponde al rango del UV-C (100-280 nm), es la que menos está presente en la radiación solar y aun suponiendo que fuera suficiente para tener algún poder de desinfección, se ha comprobado científicamente que la mayoría de los materiales, incluso los transparentes a la luz solar, como el vidrio y el plástico, son casi totalmente opacos a la radiación ultravioleta. Esta es la razón por la cual, tal como se verá en el capítulo correspondiente, los tubos ultravioletas que se utilizan para la desinfección están encerrados en camisas protectoras de cuarzo, único material que es verdaderamente transparente a ese tipo de radiación (el teflón, que se utiliza en algunos equipos es el único plástico parcialmente transparente). El resultado de este simple análisis es que si se expone agua a una radiación escasa y además se interpone un filtro prácticamente opaco a la misma, entonces la capacidad desinfectante de esa radiación es necesariamente nula o, en el mejor de los casos, despreciable. Decididamente, la SODIS no opera bajo el pretendido mecanismo de la fotoquímica. El funcionamiento de la SODIS se basa en la pasteurización, que es un proceso térmico.

Las altas temperaturas tienen un marcado efecto sobre todos los microorganismos; las células vegetativas mueren debido a la desnaturalización de las proteínas y la hidrólisis de otros componentes. En el agua, si bien hay algunas bacterias con capacidad de esporular, lo que las hace particularmente resistentes al calor, en general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100° C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60° C.

La desinfección por ebullición consiste en elevar la temperatura del agua a 100° C y mantener esa condición por espacio de uno a cinco minutos. El resultado es la eliminación de la mayoría, sino de todos, los microorganismos presentes. En contraposición, la pasteurización se define como la exposición de una sustancia (normalmente alimenticia, incluida el agua), “durante el tiempo suficiente a una considerable temperatura para destruir los microorganismos que puedan producir enfermedad o dañar las condiciones del alimento”. Si bien la susceptibilidad al calor se encuentra condicionada por factores como la turbiedad del agua, la concentración de células, estado fisiológico y otros parámetros, el proceso de pasteurización destruye coliformes y otras bacterias no termotolerantes y esto es afortunado, ya que la mayor parte de los patógenos se encuentran en este grupo.

Para el caso del agua se ha tratado de determinar la relación óptima entre el tiempo y la temperatura para destruir los gérmenes patógenos. Si bien esto no es exacto, se ha tomado como regla que para un agua clara (con turbiedad menor de 5 UTN) se puede asegurar un razonable nivel de seguridad en la desinfección con cualquiera de las siguientes relaciones:

65 °C durante 30 minutos o 75 °C durante 15 minutos.

Desde un punto de vista eminentemente práctico y operativo estas condiciones se aseguran en zonas soleadas con exposiciones de cuatro a cinco horas en el período de máxima radiación (desde las 11:00 a las 16:00 horas).

### Subproductos de la desinfección

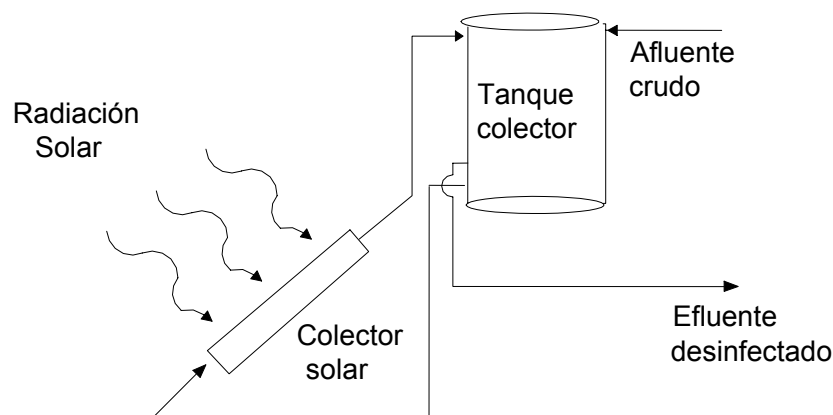
El conocimiento actual de la SODIS y los estudios que se han realizado hasta el presente no reportan la presencia de SPD.

### Equipos

Se han desarrollado varios equipos que se diferencian en cuanto a volumen de producción de agua y costo.

### Calentadores solares

El calentador solar comercial que se utiliza para desinfectar agua no difiere de los calentadores que se ven en muchos techos de viviendas y que se usan para calentar agua para la cocina o la ducha. Está compuesto por un colector que es una caja con marco de aluminio y cubierta de vidrio. El colector contiene tubos de cobre, pintados de negro, soldados a dos tubos cabezales y que almacenan el agua en proceso de calentamiento. Este colector está conectado, por medio de tubos del mismo material, a un tanque-termo de plástico y fibra de vidrio, aislado con espuma de poliuretano para almacenamiento del efluente tratado. Algunos de estos tanques están divididos para permitir el intercambio de calor entre el agua fría que entra y el agua caliente que sale.



Esquema de un termosifón para calentamiento de agua



El principio de funcionamiento de estos sistemas es conocido como circuito convectivo o calentador solar pasivo, donde el calor de la radiación solar es absorbido por los tubos negros, lo que incrementa la temperatura del agua dentro del colector y produce una consecuente disminución de la densidad de ésta. En estas condiciones, la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que la primera baje y desplace a la última hacia el tanque que está más arriba. Esta circulación natural, conocida como “termosifón”, continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer la caída de presión en el sistema. Cuando un calentador solar se utiliza con fines de desinfección, la eficiencia depende directamente de la temperatura que alcance para llevar a cabo el proceso de pasteurización. Dado que el agua alcanza su máxima temperatura entre las 14:30 y las 15:30 horas, se recomienda evitar, en lo posible, drenar el tanque antes de esa hora para aumentar así el tiempo de residencia del agua en el equipo.

### **Calentador solar**

Los equipos convencionales familiares pueden producir unos 15 litros y los equipos mayores hasta 1 m<sup>3</sup> de agua después de tres a cuatro horas de operación al mediodía. Existen en el mercado calentadores solares más sofisticados con colectores de doble cubierta de vidrio y tubos aleteados de cobre con superficies selectivas para captar mayor cantidad de energía solar y convertirla en calor útil. Algunos llegan a alcanzar temperaturas del agua de más de 90 °C e incluso la vaporizan. No obstante, es necesario evaluar si las condiciones climatológicas del lugar justifican la inversión, de otra manera pueden utilizarse equipos menos eficientes pero también menos costosos.

### **Cocinas solares**

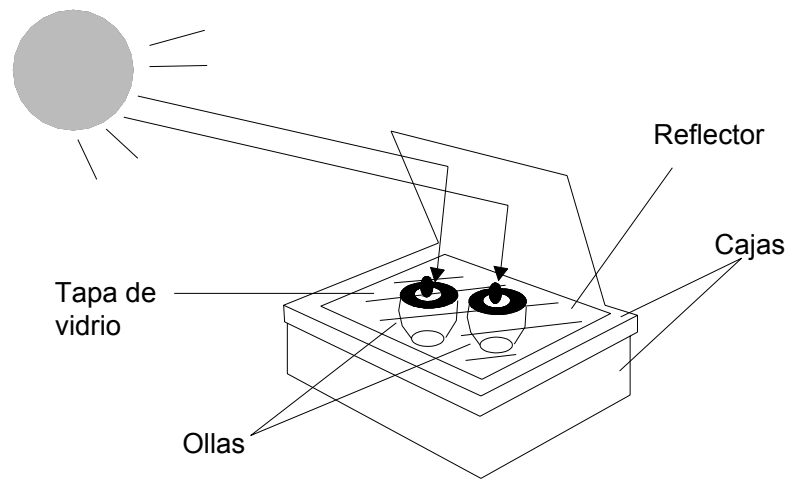
En muchos países en desarrollo, especialmente donde la deforestación es un grave problema, los hornos y concentradores solares son la única opción que tiene la población para cocinar sus alimentos. La desinfección del agua por pasteurización es otra posibilidad que se deriva del uso de “estufas solares”.

Una cocina solar se compone de un par de cajas que pueden ser de cartón o madera, una dentro de la otra, que sirven para atrapar el calor del sol y utilizarlo, en este caso, para calentar el agua. El principio consiste en aprovechar el calor que llega del sol por radiación y atrapararlo en el interior de la caja pequeña; se evita que salga por medio de una cubierta transparente, que generalmente es de vidrio. Este calor es transferido por conducción a través de las ollas de metal hacia el agua contenida. Es conveniente utilizar un reflector que ayude a dirigir más los rayos solares hacia dentro de la caja para mantener el calor. El uso de reflectores disminuye aproximadamente 35% del tiempo del proceso.



**Cocina solar**

El espacio libre que queda entre las dos cajas se rellena con un material aislante que puede ser bolas de papel periódico, hule espuma, etc. La parte interior de la caja pequeña se recubre con un material reflectivo como papel aluminio. En el fondo de esta caja se coloca una laminilla de color negro. También es conveniente que las ollas se pinten de negro o se ahúmen para que absorban más calor. De preferencia deben utilizarse ollas metálicas. Las ollas de barro no son recomendables porque este material es aislante. Tampoco es conveniente usar materiales plásticos porque pueden derretirse con las temperaturas altas.



**Esquema de una cocina solar**

### **Concentradores solares**

Los concentradores solares son un tipo de calentador solar. Se parecen a una antena parabólica espejada o más bien a un paraguas abierto con su interior espejado. Al igual que una lente cóncava que recibe los rayos de luz y los concentra en un punto (el foco), estas cocinas concentran los rayos del sol en un punto en donde se coloca una pequeña plataforma para asentar allí la olla o recipiente que se quiere calentar. El diámetro típico de estos concentradores es igual o mayor que 0,80 m y pueden estar hechos de cartón recubierto de papel de aluminio o de otros materiales.



**Concentrador solar**

No existen muchos modelos comerciales, pero hay libros y folletos que incluyen los planos para fabricarlos. A diferencia de las cocinas descritas anteriormente, la concentración de los rayos en

este tipo de cocinas genera temperaturas que pueden llegar a 350° C, lo que permite el rápido calentamiento del agua. Ello puede producir la desinfección por pasteurizado o por ebullición directa.

### Destiladores solares

Otro equipo que aplica la energía térmica es el destilador solar, el cual puede manejarse con tecnología simple o sofisticada. Estos equipos se utilizan para la producción de agua potable a partir de agua de mar o de agua dulce con algún problema de contaminación y también sirven como sistemas de desinfección del agua.

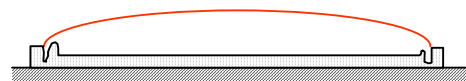
El principio de operación mediante energía solar es el mismo que utiliza la naturaleza en el ciclo hidrológico: se evapora el agua del embalse que tiene presencia de sales y se condensa en otra parte (nubes y luego lluvia), donde se obtiene agua purificada.

El destilador solar requiere un elemento que transforme la energía solar en un incremento de la temperatura del agua para poder evaporarla. La radiación visible e infrarroja es absorbida por cualquier superficie de color oscuro, de preferencia negro mate. El acabado mate se usa para lograr una mejor absorción y evitar pérdidas de una fracción de luz por reflexión. En los destiladores solares más simples, el colector solar consiste en una charola horizontal, de color negro, que contiene el agua que se quiere destilar, a la que se le denomina “destilando”. Para evitar las pérdidas indeseables de calor, es necesario que la charola esté aislada térmicamente por la parte inferior. El calentamiento del destilando produce evaporación y las sales minerales quedan retenidas en la charola. Para facilitar la evaporación, conviene que el evaporador tenga un área grande comparada con el volumen de destilando que puede contener. El agua así evaporada, se recolecta mediante una cubierta de vidrio o algún otro material colocado sobre el evaporador a una distancia e inclinación adecuadas.

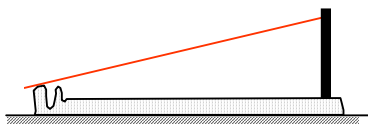
Existen varios diseños de condensadores. El más simple consiste en una caseta de vidrio a dos aguas, con una inclinación de alrededor de 20° con respecto a la horizontal, lo cual permite que las gotas de agua condensada escurran hacia abajo en donde se colectan en pequeños canales.



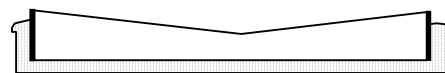
a) Cubierta de vidrio



c) Cubierta de plástico inflada



b) Cubierta de vidrio con reflector

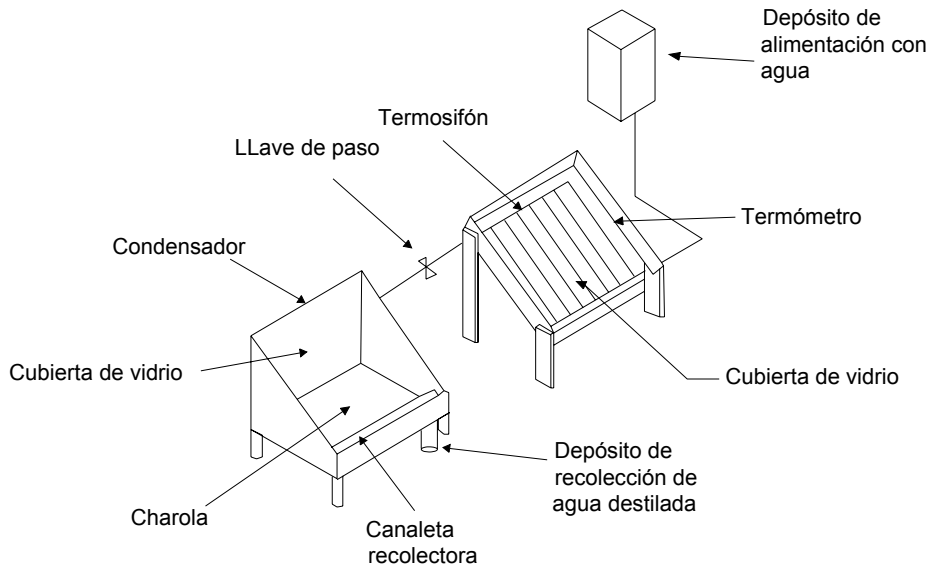


d) Cubierta de plástico en forma de V

### Diagramas esquemáticos de diseños de destiladores solares simples

## Proceso combinado de precalentamiento y destilación solares

Un dispositivo propuesto por la Secretaría de Salud en México, está formado por un depósito de alimentación de agua, un termosifón y un condensador y resulta útil en lugares templados donde la temperatura no es suficiente para llevar a cabo el proceso de condensación, entonces el termosifón calienta el agua antes de que pase al condensador.



**Dispositivo combinado de termosifón y destilador solares.**

## Desinfección en botellas y recipientes pequeños

Para el ámbito familiar, donde se desinfectan pequeños volúmenes de agua, el Instituto Federal Suizo para la Ciencia y Tecnología Ambiental (EAWAG), a través de su Departamento de Agua y Saneamiento en Países en Desarrollo (SANDEC), ha promocionado el uso de botellas y recipientes especiales pintados de negro. Esta modalidad ha tenido amplia aceptación en los lugares donde se ha implementado, aunque es necesario aclarar que siempre se ha debido disponer de programas de información, de concientización de los usuarios y de monitoreo y seguimiento.

La técnica consiste en exponer el agua a desinfectar en botellas de plástico, como las que se usan para las bebidas gaseosas las que pueden estar o no, pintadas de negro. La pintura puede ser total o solo en la parte inferior de las mismas. Los suizos han realizado pruebas con una serie de recipientes, desde bolsas plásticas hasta bidones de boca estrecha (para evitar que las manos entren en contacto con el agua desinfectada) y si bien han obtenido excelentes resultados desde un punto de vista práctico y económico, las populares botellas de bebidas gaseosas tienen un atractivo



**Botella de gaseosa con monitor de temperatura**



especial por su difundida disponibilidad. Los requerimientos en cuanto al tiempo y temperaturas de exposición son exactamente iguales que para cualquiera de las otras técnicas. En algunos casos puede adicionarse un termómetro para medir la temperatura alcanzada (ver monitoreo).

### Requerimientos de instalación

| <i>Equipo</i>                           | <i>Instalación y requerimientos de instalación</i>  |
|---|---|
| <b>Calentadores solares</b>             | Los calentadores solares son relativamente fáciles de instalar o adaptar a cualquier instalación. Únicamente se requiere que el tanque colector del agua caliente se eleve aproximadamente 60 cm por arriba del punto más alto del colector. No requiere de una presión determinada para su funcionamiento, ya que es suficiente que el tanque de alimentación de agua se coloque junto al colector, el que debe ubicarse con una inclinación aproximada a la de la latitud del lugar (por ejemplo entre los 15° y los 35°) y orientado hacia el sol. |
| <b>Cocinas y concentradores solares</b> | Estos equipos no requieren cuidados mayores en la instalación, ya que puede hacerse en cualquier parte. Es conveniente que antes de adoptar este método se realicen algunas pruebas, tomando la temperatura del agua después de cuatro o cinco horas (en el caso de las cocinas). Si el promedio de temperatura es en todos los casos mayor de 60° C, el agua podrá consumirse. Los concentradores, si están bien contruidos, deberían desinfectar por ebullición más que por pasteurización.   |
| <b>Destiladores solares</b>             | No hay requerimientos especiales para estos destiladores solares, que son simples y sin partes móviles. Debe evitarse que haya animales cercanos o que éstos tengan acceso a los equipos.   |
| <b>Botellas y recipientes</b>           | En cuanto a la turbiedad, la aplicación de la SODIS requiere agua limpia con muy baja turbiedad. De no ser así, deberá filtrarse previamente pasando el agua por un filtro casero de arena o una tela muy fina. Las botellas se pueden colocar sobre alguna superficie reflectiva, como papel de aluminio. No se recomienda el uso de botellas de gaseosa coloreadas.   |

### Operación y mantenimiento

| <i>Equipo</i>        | <i>Operación y mantenimiento</i>   |
|----------------------|--|
| Calentadores solares | La operación es simple, solo debe abrirse la llave de paso durante el día y cerrarse durante la noche. El mantenimiento se limita a mantener la cubierta del colector libre de toda suciedad, ya que la misma reduce la cantidad de radiación que llega al colector. La frecuencia de limpieza dependerá del grado de contaminación atmosférica. No se recomiendan las cubiertas de acrílico, pues se deforman y rayan fácilmente. |
| Estufas solares      | La operación de este equipo consiste en colocar la olla o cacerola en el interior de la estufa solar y dirigir los rayos solares al interior de la caja mediante el reflector. Su mantenimiento resulta muy sencillo, ya que únicamente consiste en mantener limpio el interior, el vidrio y los reflectores. Para mantener limpia el agua es conveniente dejarla en el mismo  |

|                        |  |
|------------------------|--|
|                        | recipiente cubierto con su tapa, hasta que se vaya a usar.   |
| Destilador solar       | La operación de este sistema consiste en alimentar al destilador con el agua a ser tratada. Esto puede hacerse de manera continua o discreta. La forma de operación discreta o por tandas es práctica para un sistema rural familiar. De otro modo, puede emplearse el sistema combinado con precalentamiento de un calentador solar. El destilador común de caseta produce en días soleados entre tres a cinco litros diarios por cada metro cuadrado. Esto equivale a una disminución en la profundidad del destilando de 0,3 a 0,5 cm/día, lo que implica que la alimentación puede ser una vez al día. El agua deberá consumirse o desecharse dentro de las 24 horas siguientes. |
| Botellas y recipientes | Para purificar el agua contenida, el envase plástico deberá estar bien limpio. En este caso como en todos los anteriores, el agua desinfectada debe mantenerse en el mismo envase o en otro envase con tapa, en un lugar fresco.   |

### Monitoreo

Se ha demostrado que en 99% de los casos, la remoción de coliformes es total para temperaturas del efluente mayores de 55° C. Sin embargo, por razones de seguridad, ya se ha expresado que la regla de oro es trabajar con un margen de seguridad y establecer los 65° C como la temperatura mínima de desinfección. Por tal motivo, el monitoreo de estos sistemas debe confirmar que la temperatura del agua a la salida de cualquier sistema o luego del período de tratamiento haya alcanzado 65° C.

Considerando que los calentadores solares no fueron diseñados para desinfectar el agua, sino simplemente para calentarla, no hay forma de conocer si la temperatura alcanzó el punto de pasteurización, por lo que resultaría conveniente instalar un termostato acoplado a una válvula que únicamente permita el paso del agua a una temperatura mayor de 65° C. En las cocinas o botellas puede acoplarse un termómetro a la tapa y en otros, se pueden colocar dentro de la botella pequeñas ampollas con una sustancia que se derrita a una temperatura mayor de 65° C, lo que aseguraría que se ha alcanzado la temperatura de pasteurización requerida.

### Ventajas y desventajas de la desinfección solar

| <i>Equipo</i>        | <i>Ventajas</i>  | <i>Desventajas</i>  |
|----------------------|--|---|
| Calentadores solares | No depende de energía convencional, cuyo costo se incrementa con la creciente demanda. Evitan el uso de sustancias químicas tóxicas. Requieren equipo relativamente sencillo y de bajo costo, que se recupera rápidamente y proporciona agua potable durante muchos años. Su uso no deteriora el ambiente.   | No pueden utilizarse en días nublados o lluviosos.<br>No proporciona protección residual.   |
| Cocinas solares      | No consumen leña, por lo que ayudarían a evitar la deforestación y la erosión en las zonas rurales. Se ha calculado que para llevar a punto de ebullición un litro de agua, se necesita aproximadamente un kilo de leña. Tampoco consumen combustibles fósiles. Esto es especialmente útil en el medio rural, donde el suministro de gas resulta problemático. No emiten humo como los fogones abiertos que causan enfermedades respiratorias. | Son dos veces más lentas que una estufa convencional.<br>No pueden utilizarse en días nublados o lluviosos.<br>No proporcionan protección residual. |

|                        |   |   |
|------------------------|---|---|
|                        | No son costosas y son fáciles de construir.                                     |   |
| Botellas y recipientes | Sumamente sencillos y económicos.<br>Fácilmente aceptables por las comunidades. | No proporcionan protección residual.<br>Requieren agua limpia.<br>No pueden usarse para tratar grandes volúmenes de agua. |

### **Costos de equipos, de operación y mantenimiento**

| <b><i>Equipo</i></b>   | <b><i>Costos Totales</i></b>  |
|------------------------|---|
| Calentadores solares   | El precio de los equipos comerciales oscila entre US\$ 250 a US\$ 500.  |
| Concentradores solares | No existen en el mercado. Hay que hacerlos con un costo entre US\$ 100 y US\$ 200   |
| Cocinas solares        | No existen en todos los países. Hay que hacerlos localmente. Su costo varía según el material que se utilice. Normalmente ronda entre US\$ 25 y US\$ 80, dependiendo del acceso a los materiales locales. |
| Destilador solar       | Se aplican las consideraciones de los casos anteriores. El costo oscila entre US\$ 75 y US\$ 250, dependiendo de los materiales locales disponibles y del tamaño del equipo.                              |
| Botellas               | No significan costo alguno.   |

### **Fuentes de información**

Almanza Salgado, R.; Muñoz Gutiérrez, F. *Ingeniería de la energía solar*. México DF, El Colegio Nacional (1994).

EAWAG/SANDEC, *SODIS bulletins*. Boletines de la sección Agua y Saneamiento del Instituto Federal Suizo para el Medio Ambiente, la Ciencia y la Tecnología. (1997).

Márquez Bravo, L. *Desinfección solar*. Trabajo presentado en el Simposio CEPIS sobre “Calidad del agua, desinfección efectiva”. Disponible en e sitio web del CEPIS y en CD-Rom (1998).

Solsona, F. *Water disinfection for small community supplies*. Capítulo sobre desinfección del agua para el manual de la IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/CEPIS. (2001).

Wegelin, M.; Canonica, S.; Mechsner, K.; Fleischmann, T.; Pesaro, F.; Metzler, A. *Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments*. J Water SRT-Aqua Vol 43, No. 3, pp. 154-169 (1994).

Wegelin, M.; Sommer, B. *Solar water disinfection (SODIS), destined for worldwide use?* Revista “Waterlines” Vol 16, No. 3 (1998).