

Capítulo 9

DESINFECCIÓN SOLAR, UNA ALTERNATIVA PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES RURALES

Resumen

El presente artículo muestra los resultados de estudios sobre desinfección solar de agua de consumo humano usando un concentrador solar de paredes planas y botellas de plástico transparentes, validado en laboratorio y comunidades rurales de los estados de Oaxaca y Chiapas.

Palabras clave: desinfección, agua, consumo, solar

Introducción

La falta de acceso a agua de consumo de buena calidad constituye un riesgo elevado de transmisión de enfermedades hídricas, como diarreas, cólera, fiebre tifoidea, hepatitis A, disentería y otras enfermedades diarreicas. En países en vías de desarrollo, más de un tercio de la población no tiene acceso al agua de consumo segura. Las estadísticas son alarmantes: más de 4 mil millones de casos de diarrea cada año, de los cuales 2.5 millones son mortales (adaptado de la conferencia virtual SODIS, septiembre del 2002). La población más vulnerable a este riesgo es la rural. Para proteger de estas enfermedades a la población que carece de acceso al agua limpia, es necesaria la aplicación de métodos apropiados de potabilización de agua, prevención de contaminación secundaria, disposición adecuada de excretas y medidas de promoción y educación de la higiene.

Muchas comunidades rurales no añaden cloro al agua por rechazo al sabor o falta de suministro del producto. Tampoco hierven el agua por escasez de la leña, alto costo, la dificultad de tener que acarrearla o porque el sabor también cambia. El uso de la plata coloidal se ve limitado por su costo y baja disponibilidad en comunidades marginadas.

Una alternativa para desinfección del agua para este tipo de comunidades es la radiación solar, la cual ha demostrado ser una técnica eficiente en la inactivación y destrucción de bacterias patógenas y virus en el agua. Este método ha sido probado por diferentes instituciones y países alrededor del mundo desde hace casi dos décadas.

La desinfección solar (también llamada SODIS por sus siglas en inglés), ha sido recomendada durante el Día Mundial del Agua 2001 como un método para mejorar la calidad microbiológica del agua a escala doméstica (<http://www.worldwaterday.org/2001/index.html>).

El método consiste en exponer a la radiación solar agua contenida dentro de botellas de plástico transparente de 2 litros de capacidad, las comúnmente utilizadas en las bebidas comerciales, son adecuadas para usarse en la desinfección solar. En días soleados, el tiempo de exposición requerido generalmente es de más de cinco horas para remover de manera completa (hasta cinco unidades logarítmicas) los coliformes fecales presentes en el agua, de acuerdo a estudios de laboratorio y campo realizados por Martín Wegelin desde 1991.

Metodología y experimentación

La metodología general fue la siguiente: 1) validación en laboratorio de la eficiencia de la desinfección solar en la remoción de contaminantes microbiológicos bajo diferentes condiciones de radiación solar, turbiedad del agua, tiempos de exposición, tipo de recipiente contenedor de agua y el uso de un concentrador solar; 2) la segunda etapa fue evaluar la factibilidad técnica y social de la desinfección solar usando el concentrador en comunidades rurales de Oaxaca y Chiapas y establecer sus condiciones de uso y aceptación; 3) como consecuencia de los estudios anteriores, fue necesario buscar nuevos materiales reflejantes de uso común y fácil adquisición para mejorar la eficiencia del concentrador prototipo.

Resultados

Con el propósito de aumentar la intensidad de radiación o reducir el tiempo de exposición para la desinfección solar, en 1999 personal del IMTA y del CIE UNAM, desarrollaron un concentrador de paredes planas con capacidad para tres botellas de plástico de 2 litros (Martín et al, 1999). El primer concentrador fue construido con una estructura de aluminio que permitía moverlo e inclinarlo para tenerlo orientarlo en forma perpendicular al sol; como material reflejante se usaron espejos de vidrio. Por la geometría de este concentrador, su capacidad ideal esperada sería la concentración de 3 soles. Después se construyó un prototipo que pudiera ser adecuado para las comunidades rurales. Este concentrador consta de una base de madera de 55 cm x 55 cm, cuatro aletas planas también de madera de 35 cm x 35 cm cada una forrada de papel aluminio comercial o el proveniente de envolturas de papas fritas, y ocho triángulos de madera para dar una inclinación de 60° a las aletas respecto a la horizontal (*Figura 1 y Figura 2*).

En ese estudio se evaluó la remoción de virus, bacterias coliformes y *Vibrio cholerae* bajo diversas condiciones de exposición al sol y calidad del agua. La desinfección solar puede llevarse a cabo utilizando bolsas o botellas de refresco de plástico transparente de dos litros de capacidad, colocadas sobre un material reflejante. Los resultados mostraron que para la reducción de hasta 10^5 coliformes totales como NMP /100 mL, en el primer caso se requieren aproximadamente cuatro horas de exposición, mientras que en el segundo se necesitan seis horas, dependiendo de la intensidad de la radiación solar.



Figura 1. Concentrador solar para desinfección de agua

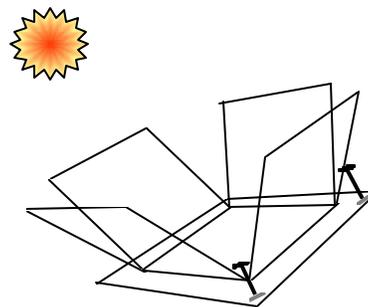


Figura 2. Orientación del concentrador solar al medio día solar

El uso de botellas de plástico, aunque menos eficiente, permite asegurar un mejor control del agua tratada y evitar su recontaminación. Bajo este principio, en el estudio mencionado se diseñaron y construyeron concentradores solares de paredes planas que permitieron disminuir el tiempo de exposición requerido cuando se utilizan las botellas

Los resultados obtenidos en este mismo estudio a nivel laboratorio mostraron que utilizando los concentradores solares se puede disminuir hasta 10^5 coliformes totales medidos como NMP/100 ml; 10^6 Unidades Formadoras de Placa Viral

(vacuna triple de polio) y 10^3 Unidades Formadoras de Colonias de *Vibrio cholerae*, con niveles de radiación promedio arriba de los 700 W/m^2 durante al menos cuatro horas de exposición. Los coliformes fecales medidos como *Escherichia coli* son más sensibles a la radiación y con niveles por arriba de los 500 W/m^2 es suficiente para eliminarlos completamente. En cuanto a los coliformes totales, el tiempo puede reducirse hasta dos horas cuando: la intensidad de radiación es elevada, el concentrador se mueve con la posición del sol y la botella tiene el fondo negro.

Los resultados obtenidos a nivel laboratorio necesitaban corroborarse con proyectos demostrativos en comunidades rurales con diferentes entornos socio-culturales, económicos y medio ambientales, esto con la finalidad de estudiar el interés de los usuarios, su aceptación, facilidades de construcción, problemas en el manejo y eficiencias de la desinfección en condiciones reales.

Para lograr esto, durante el 2000, personal del IMTA trabajó en comunidades rurales de Chiapas (La Victoria en el municipio de Tila y La Laguna en el municipio de Yajalón) y Oaxaca (Santa Lucía en el municipio de Ocotlán) para evaluar la viabilidad técnica y social de esta tecnología y establecer las condiciones de operación en campo del dispositivo.

Se seleccionaron tres comunidades piloto en regiones distintas para probar la eficiencia de la tecnología en la remoción de coliformes totales y fecales con base en climas y niveles de radiación diferentes, teniendo en consideración además los parámetros socio-ambientales que favorecen la transferencia de la tecnología, al cual está enfocada a comunidades dispersas, de alto nivel de marginalidad, que no cuentan con suministro regular de cloro o rechazan el uso de este y donde se recomienda realizar el tratamiento a escala domiciliaria. Se presentó el proyecto a las autoridades e instituciones locales de salud y se establecieron acuerdos de trabajo. Posteriormente se realizaba los trabajos con la comunidad: primero se analizaban las condiciones de salud-enfermedad relacionadas con el agua, las modalidades locales de usos y costumbres del agua (si la consumen cruda, si usan o no cloro, si la hierven o usan otros métodos para desinfectar el agua). Participaron en la selección de las comunidades y ejecución de los proyectos, instituciones públicas y organizaciones sociales (ONGs)



Figura 3. Asamblea comunitaria de difusión y concertación.

Se presentó en asambleas comunitarias (Figura 3) el método de desinfección solar del agua con el uso de concentradores solares, explicándose las ventajas (no se agrega ninguna sustancia y no cambia el sabor del agua) y las desventajas (sólo funciona con el sol, limitada producción y se debe consumir únicamente dentro las siguientes 24 horas, etc.).

Con los acuerdos de participación la siguiente actividad fue la capacitación en el uso del método de desinfección solar y de la construcción de las cajas solares (Figura 4). Una vez construidos los concentradores, se instalaban al día siguiente en cada casa y nuevamente se recordaban los elementos de manejo, tiempo de exposición y manejo posdesinfección del agua.



Figura 4. Taller de capacitación y construcción.

La desinfección solar del agua es de fácil uso, los aspectos sociales son los que presentan dificultades de cambios en los usos y costumbres del manejo del agua para consumo humano. De ahí que el trabajo de promoción requiere de mucha sensibilidad sobre las percepciones locales respecto al agua, siendo indispensable la presencia constante de los promotores de salud, para la asesora y seguimiento.

Respecto a las botellas, inicialmente el proyecto suministró 6 piezas a cada familia participante, que fueron proporcionadas por la Coca Cola. Personal del IMTA realizó análisis de caracterización de calidad fisicoquímica y bacteriológica (incluido *Vibrio cholerae*) en las fuentes de agua de las tres comunidades rurales piloto (2 en Chiapas y 1 en Oaxaca), detectándose como único problema el contenido de coliformes fécales y totales. Las fuentes de estas comunidades son subterráneas (pozos someros y manantiales)

Para evaluar la eficiencia de SODIS con el uso de los concentradores solares, se llevaron a cabo 3 campañas (mayo, junio, julio, octubre, incluyendo época de lluvias) de monitoreo de la calidad bacteriológica (análisis de coliformes totales y *E. coli*, con el método de sustrato definido Colilert) en cada una de las localidades. Cada una duro aproximadamente una semana y se tomaron 5 muestras para cada concentrador tanto del agua cruda como de la desinfectada. Se instaló en las localidades o en su cercanía, un piranómetro Kipp and Zonben modelo CM3 para medir la intensidad de radiación.

Los resultados mostraron que la desinfección es técnicamente factible, siempre y cuando el nivel radiación recibida por las botellas entre las 10:00 y las 15:00 sea superior a los 3000 W-h/m². Estos niveles de radiación se observaron en las zonas de estudio aún durante el período de lluvias. Sin embargo, un aspecto crítico en el uso de estos concentradores durante las pruebas en campo, fue la baja durabilidad del papel aluminio utilizado como superficie reflejante, lo que ocasiona que se deteriore ante la intemperie y baje el rendimiento del dispositivo hasta hacerlo inoperante. Por lo anterior surgió la necesidad de realizar un estudio de materiales para mejorar su durabilidad manteniendo o mejorando sus propiedades para la correcta operación del dispositivo.

La desinfección solar del agua es bastante sencilla y fácil de ejecutar, pero exige cambios en los usos y costumbres del manejo del agua para consumo humano. De la manera de promover los cambios en las costumbres va a depender el resultado. Es ahí donde la presencia de un promotor es fundamental, no sólo para el buen uso del método, sino además para ayudar en el proceso de cambio que haga posible la adopción de la desinfección solar como alternativa a escala domiciliaria.

Una característica importante en la aceptación del agua desinfectada es el hecho que el sabor no sufre modificaciones y no se le agrega nada que pueda resultar desagradable de acuerdo a sus preferencias. Con el uso se pueden empezar a notar los resultados de tomar agua libre de bacterias, es decir, los niños tienden a enfermarse menos y eso lo notan fácilmente las madres, lo que refuerza la aceptación de la tecnología.

El siguiente estudio, realizado durante los años 2001 y 2002, tuvo como objetivo mejorar el concentrador solar desarrollado por el IMTA y el CIE utilizando un material más resistente que el papel aluminio y de igual o mejor reflectancia.

La metodología a seguir fue la siguiente: 1) búsqueda de materiales reflejantes de uso común y fácil adquisición; 2) determinación de la capacidad de reflejar la radiación solar (longitud de onda en el rango 200 a 700 nm) para preseleccionar los mejores materiales y construir los colectores; 3) determinación de la radiación útil (radiación incidente, fracción que entra a la botella considerando las características geométricas y reflectivas del concentrador así como la transmitancia del plástico de la botella y diámetro) y 4) Medición de la eficiencia de la desinfección solar en la remoción de bacterias coliformes.

La reflectancia de los materiales se midió con un espectrofotómetro UV – visible marca Shimadzu, modelo UV-1601, del departamento de materiales del CIE.

La radiación solar útil que entra a las botellas, se determinó usando como actinómetro químico una solución de ácido oxálico (H₂C₂O₄ · 2H₂O) y nitrato de uranilo [UO₂ (NO₃)₂ · 6H₂O] con la cual se llenan la botella y se exponen al sol. El Ac. Oxálico dentro de las botellas se degrada hasta CO₂ por la acción de la radiación solar dentro del rango de longitudes de onda entre 300 a 546 nm y del uranilo como catalizador. El Ac. Oxálico remanente se cuantifica titulando

la solución con permanganato de potasio. Se ha seguido la metodología de Curcó y colaboradores de la Universidad de Barcelona y Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (Curcó et al., 1996). La intensidad o densidad de potencia de radiación solar (W/m^2) se midió en el IMTA con un piranómetro modelo CM11, marca Kipp & Zonen, cuyo rango de medición espectral es de 305 nm a 2800 nm, de la cual al rango de 300 a 546 nm le corresponde aproximadamente el 35% (Blanco y Malato, 2000).

Para las pruebas bacteriológicas se usó agua residual proveniente del efluente de la planta de tratamiento del IMTA (lodos activados modalidad aireación intermitente), con un conteo de hasta 10^5 NMP/100 mL en coliformes totales y 10^5 NMP/100 mL de *E. coli*, los cuales se utilizaron como organismos indicadores de contaminación bacteriana, midiéndose mediante tecnología de sustrato definido. También se midió la temperatura del agua alcanzada dentro de las botellas.

En todas las pruebas, los colectores quedaron orientados de tal forma que dos aletas fueran perpendiculares al movimiento del sol durante el día y el fondo se inclinó para quedar normal a los rayos del medio día solar; lo anterior con el fin de captar la mayor cantidad de radiación en las botellas (*Figura 2*). Todas las botellas utilizadas en las diferentes pruebas fueron de plástico transparente de dos litros de capacidad, pintadas con una franja negra a lo largo y que cubría menos de la mitad del perímetro. Después se colocaban acostadas dentro del concentrador con la franja negra hacia abajo.

Los materiales reflectivos conseguidos y estudiados fueron: láminas lisas galvanizada (calibre 24) y de aluminio (calibre 26 y 22); papel aluminio doméstico de tres marcas; plásticos aluminizados y metalizados (usados para envoltura de regalos y alimentos); papel metalizado (para envoltura de regalos); y cinta autoadherible 100% aluminio de 5 cm de ancho (usada para aislamiento térmico en sistemas de refrigeración). Las reflectancias promedio medidas en los rangos de 200 a 700 y 300 a 540 nm para los diferentes materiales se muestran en la *Tabla 1*. El comportamiento de la reflectancia en función de la longitud de onda para algunos de los materiales estudiados se aprecia en la *Figura 5*.

Tabla 1. Reflectancias promedio en (%) de diferentes materiales.

Material	200 – 700 nm	300 – 540 nm
Plástico metalizado (envoltura de regalos)	68.8 – 79.3	66.0 – 75.2
Plástico aluminizado (envoltura de papas fritas)	25.8 – 69.9	25.3 – 68.7
Cinta 100% aluminio autoadherible	68.4	57.66
Papel metalizado (envoltura de regalos)	60.1	59.4
Papel aluminio (para uso en cocina)	41.6 – 56.4	38.8 – 56.3
Placa y lámina de aluminio	16.6 – 19.1	14.8 – 16.3
Lámina galvanizada	28.98	31.6

En la gráfica de la *Figura 5*, se puede observar que los materiales más reflectivos en el rango de la radiación UV (300 – 540 nm) son el papel metalizado y los plásticos metalizados y aluminizados empleados para envolver regalos o alimentos (papas fritas y galletas, entre otros), seguido del papel aluminio y de la cinta de aluminio.

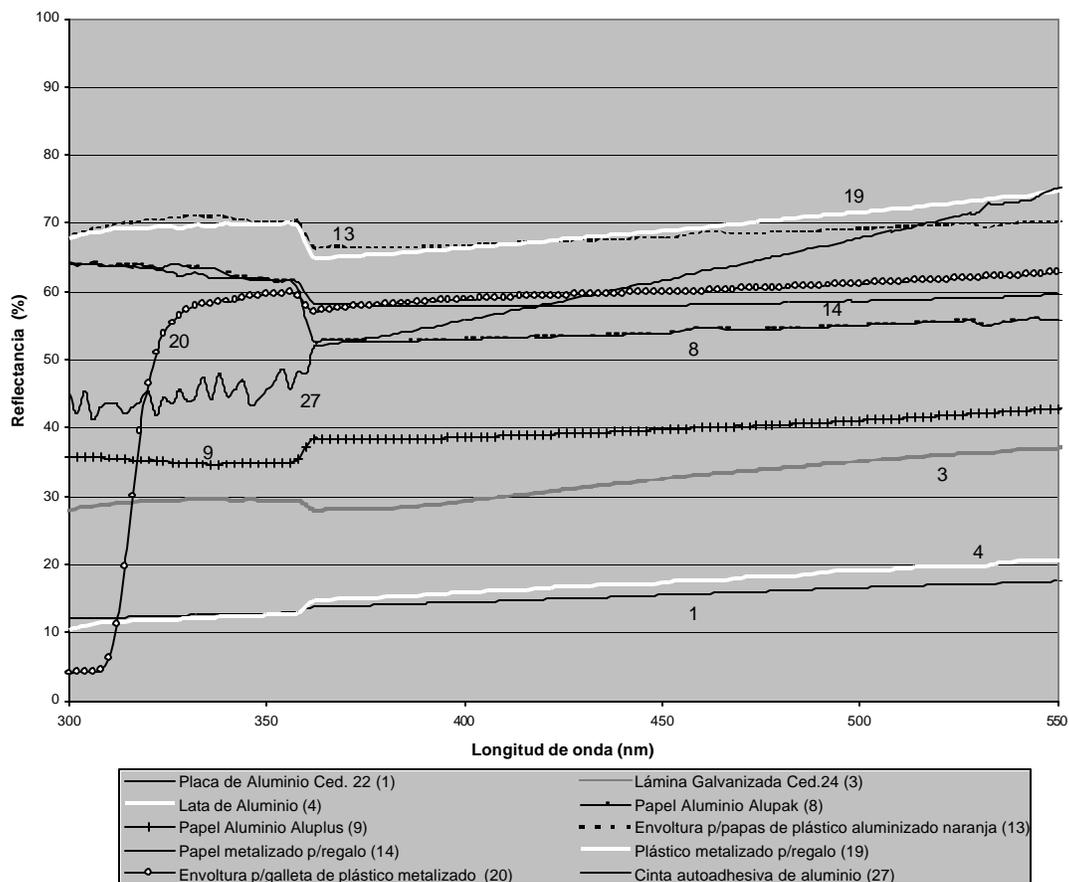


Figura 5. Gráfica de reflectancias de los materiales de estudio.

Para las pruebas actinométricas se eligieron cuatro materiales reflejantes: cinta adherible de aluminio, plástico aluminizado, lámina galvanizada y papel aluminio. Se realizaron tres tipos de pruebas: en la primera, con el propósito de determinar la radiación útil de las botellas en función de su posición dentro del concentrador y de la hora del día, se utilizó el material más reflejante (plástico metalizado, Figura 6) colocando las botellas (izquierda, central y derecha, en relación al movimiento del sol y mirando hacia el norte) y midiendo la radiación a las 10:10, 11:40 y 13:10 hrs (tiempo medio) en cada una. En la segunda prueba el objetivo fue comparar los diferentes materiales para lo cual se colocaron dos botellas (izquierda y central) en cada concentrador exponiéndolas al sol a las 13:00 hrs. La tercera prueba fue similar a la primera pero se utilizó la cinta de aluminio como material reflejante.

La duración de cada ensayo fue de 20 minutos, tiempo en que las botellas con la solución actinométrica se colocaban en el concentrador y después del cual se retiraban, se cubrían y se guardaban para evitar la incidencia de la radiación solar. Se colocó como testigo una botella con el actinómetro químico fuera del concentrador solar y expuesta al sol al mismo tiempo que las otras botellas.

Las fórmulas empleadas para el cálculo del coeficiente de eficiencia (Φ_{ef}) del concentrador solar y la radiación útil absorbida por el actinómetro (F_{abs}), son las siguientes (Curcó et al, 1996):

$$\Phi_{ef} = \frac{(C_0 - C_t)}{W_T} * \left[\frac{(V_T * Na * h * Cv)}{(S_{MOD} n_{MOD})} \right] * * \left[\frac{1}{\sum_{300}^{546} \{I_1 f_1 [1 - \exp(-a_1 * D)] * f_1 \Phi_{T1}\}} \right] \quad (1)$$

$$F_{ABS} = \frac{\Phi_{ef} * S_{mod} * n_{mod}}{N_a * h * c_v} * W_T * \sum_{I=300}^{540} I * f_1 * [1 - \exp(-a_1 * D)] * \Phi_{T1} \quad (2)$$

Donde:

C_0	concentración inicial del ácido oxálico a t_0 , mol/L	n_{mod}	número de módulos, igual a 1
C_t	concentración del ácido oxálico al tiempo t , mol/L	D	diámetro promedio de la botella, 0.093 m
W_T	energía total acumulada en el lapso de t_0 a t , J/m ²	λ	longitud de onda, de 300 a 540 nm
Na	número de Abogadro, $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ o eins	f_λ	distribución espectral
h	constante de Plank, 6.626×10^{-34} J-s	a_λ	Coef. de absorción del líquido, 1/cm
C_v	velocidad de la luz, 2.998×10^8 m/s	f_λ	producción cuántica
V_t	volumen total del reactor (una botella = 0.002 m ³)	$F_{T\lambda}$	transmitancia del plástico de la botella
S_{mod}	superficie del colección, 0.375 m ²	S_{Bot}	superficie de la botella, 0.083 m ²

El coeficiente de eficiencia es específico para cada material, hora y posición de botella dentro del colector solar. Con este coeficiente y el valor de la energía solar acumulada durante las pruebas bacteriológicas, se calcula la radiación útil o dosis requerida para la total remoción de coliformes totales y fecales.

Los resultados finales para el cálculo de la radiación útil dentro de botellas en función de su ubicación, hora y tipo de material reflejante, se presentan en las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2.. Coeficiente de eficiencia y radiación útil de las botellas del concentrador de plástico metalizado a diferentes hrs.

Botella	Hora	$C_0 - C_t$ (mol/m ³)	W_T (J/m ²)	F_{ef}	F_{abs} (eins)
Izquierda	10:10	2.86	276182	0.072	0.0126
	11:40	7.16	364091	0.137	0.0316
	13:10	6.676	388630	0.120	0.0295
Central	10:10	3.82	276182	0.096	0.0169
	11:40	6.2	364091	0.119	0.0274
	13:10	5.24	388630	0.094	0.0232
Derecha	10:10	3.34	276182	0.084	0.0148
	11:40	6.68	364091	0.128	0.0295
	13:10	6.914	388630	0.124	0.0306
Testigo	10:10	2.865	298627	0.296	0.0127
	11:40	3.34	378326	0.273	0.0148
	13:10	3.813	388491	0.303	0.0169

Tabla 3. Coeficiente de eficiencia y radiación útil de la botella izquierda para diversos materiales a las 13:10 hrs.

Material	$C_0 - C_t$ (mol/m ³)	W_T (J/m ²)	F_{ef}	F_{abs} (eins)
Plástico metalizado	2.86	381447	0.120	0.0295
Papel aluminio	8.11	381447	0.148	0.0358
Lámina galvanizada	5.25	381447	0.096	0.0232
Botella testigo	3.813	388491	0.303	0.0169

Tabla 4. Radiación útil en las botellas izquierda y central en colector con cita de aluminio y testigo a diferentes horas.

Botella	Lapso (hr)	$C_0 - C_t$ (mol/m ³)	W_T (J/m ²)	F_{ef}	F_{abs} (eins)
Izquierda	11:30 - 11:50	8.96	389317	0.161	0.0396
	12:30 - 12:50	6.96	410843	0.118	0.0308
	13:30 - 13:50	6.97	406502	0.120	0.0308
Central	11:30 - 11:50	6.72	389317	0.120	0.0297
	12:30 - 12:50	5.47	410843	0.093	0.0242
	13:30 - 13:50	4.48	406502	0.077	0.0198
Botella testigo	11:30 - 11:50	3.98	389317	0.319	0.0176
	12:30 - 12:50	4.47	410843	0.367	0.0198
	13:30 - 13:50	3.49	406502	0.268	0.0154

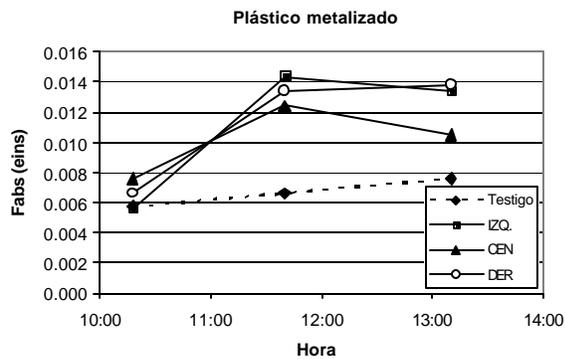


Figura 6. Gráfica de radiación útil utilizando plástico metalizado.

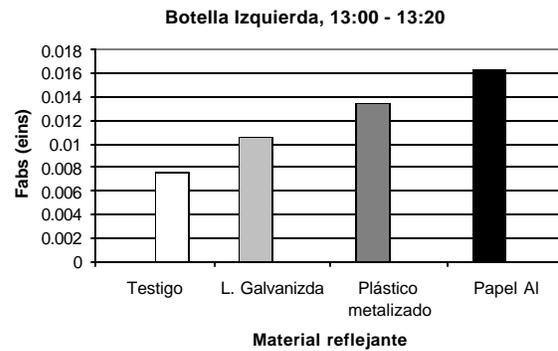


Figura 7. Gráfica comparativa de radiación útil para diversos materiales.

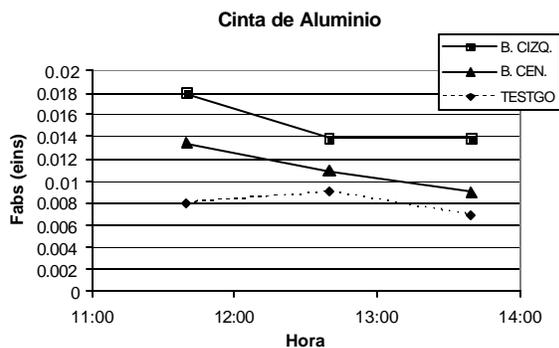


Figura 8. Gráfica de radiación útil con cinta de aluminio

Como se puede apreciar en *Figura 6*, *Figura 7* y *Figura 8*, en general las eficiencias más altas de concentración se lograron para el plástico metalizado y la cinta de aluminio. Por ejemplo, para la botella izquierda a las 11:40 hrs, la radiación útil (eins) fue 2.25 veces la del testigo. De manera global y a manera de comparación, de los materiales probados, el que dio valores más altos de radiación útil en las botellas fue la cinta de aluminio (0.0396 eins), después el papel aluminio (0.0358 eins), enseguida el plástico metalizado (0.0316 eins) y por último la lámina galvanizada (0.0295 eins), en comparación con el testigo (0.0169 y 0.0198) eins. También se observa que la radiación absorbida fue mayor en la botella izquierda que en la central, tanto en el concentrador forrado con plástico metalizado como para

el de cinta de aluminio. La botella izquierda (y se estima que también la derecha, por simetría) recibe mayor radiación que la central, después de las 11:00 hrs, según se aprecia en *Figura 6* y *Figura 8*. La razón se debe a que las botellas de los extremos le hacen sombra a la central en cuanto a la radiación reflejada en las paredes laterales.

De los resultados de las pruebas de remoción bacteriológica sólo se presentan los relativos a los coliformes totales, pero hacemos la aclaración que los E. coli son mucho más sensibles a la radiación solar que los totales. Las *Figuras 9*, *10* y *11*, muestran las curvas de decaimiento horario de los coliformes totales durante las pruebas de desinfección solar. La *Figura 9* muestra los resultados comparativos de la botella central para tres materiales reflectivos: papel aluminio, papel metalizado y lámina galvanizada. La *Figura 10* presenta los resultados comparativos para los dos mejores materiales: papel y cinta de aluminio. El decaimiento bacteriano usando el colector solar forrado con cinta de aluminio aparece en la *Figura 11*.

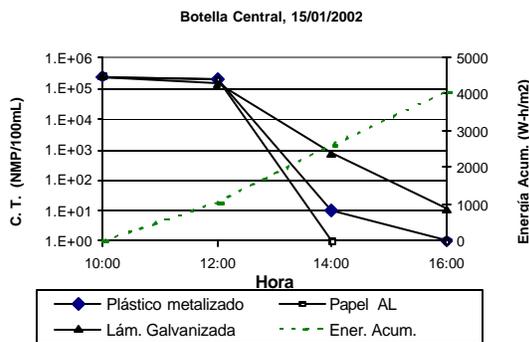


Figura 9. Decaimiento de coliformes totales usando diferentes materiales reflejantes

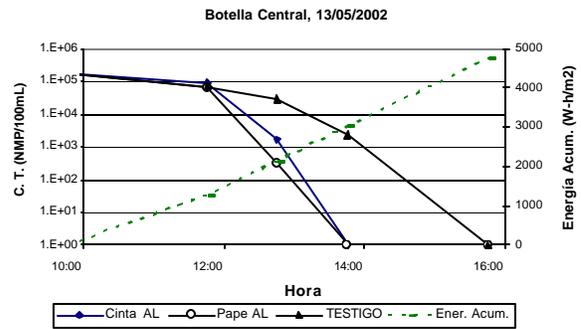


Figura 10. Decaimiento de coliformes totales usando cinta y papel aluminio como superficie reflejantes.

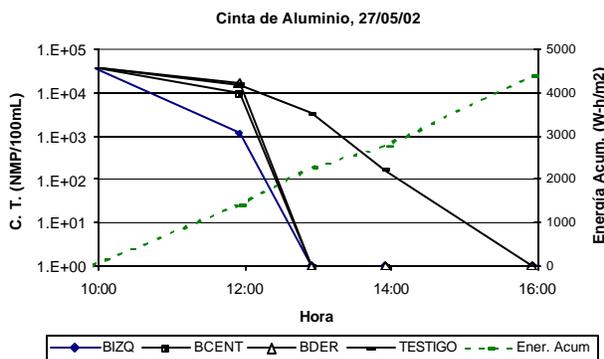


Figura 11. Decaimiento de coliformes totales usando el colector solar de cinta de aluminio.

Respecto a la eficiencia de remoción de coliformes totales, el concentrador de cinta de aluminio logró eficiencia del 100% en tan sólo 3 horas (Figura 11); los concentradores construidos de papel aluminio y plástico metalizado necesitaron 4 horas, mientras que la lámina galvanizada 6 horas para una eficiencia del 99.99% (Figura 9 y Figura 10), igual que la botella testigo (sin concentrador solar). En estas gráficas también aparece la energía solar acumulada para cada prueba. En todos los casos se requiere para la remoción total una energía superior a los 2200 W-h/m².

para el plástico metalizado, 49.3 °C para la lámina galvanizada y 46.0 °C para la botella testigo.

La temperatura del agua en las botellas alcanzó valores máximos a las 4 horas de exposición, siendo para el papel y cinta de aluminio hasta de 56.8 °C, 52.7 °C

En cuanto a la durabilidad de los materiales, los plásticos metalizados y aluminizados resultaron ser muy deteriorables principalmente por la radiación solar; un poco más resistente es el papel aluminio, pero mejor resulta la cinta de aluminio, la cual se conserva adherida a la base de madera usada en las paredes durante más tiempo que los otros materiales. Las láminas galvanizadas y de aluminio son muy resistentes a la intemperie.

Conclusiones

La desinfección solar es una opción de bajo costo y fácil aplicación, adecuada para comunidades rurales que no tienen acceso a agua limpia y rechazan o no aplican otros métodos de desinfección de agua como la cloración y la ebullición.

La desinfección solar es efectiva y puede remover totalmente los coliformes fecales y totales en menos de 4 horas, con niveles de ambos de hasta 10^5 como NMP/100 m en el agua cruda.

La desinfección solar en comunidades rurales es técnicamente factible, siempre y cuando se use adecuadamente el método y el nivel radiación recibida por las botellas entre las 10:00 y las 15:00 sea superior a los 3000 W-h/m². Estos niveles de radiación se observaron en las regiones de las comunidades piloto aún durante el período de lluvias.

La radiación solar permite remover virus y *Vibrio cholerae* con dos o tres horas de exposición.

El mejor material reflejante para el concentrador es la cinta autoadherible de aluminio, ya que da mayor durabilidad que los plásticos metalizados y que el papel aluminio de uso doméstico, además facilita la construcción del concentrador por ser autoadherible

El uso de concentradores solares de paredes planas aumenta la radiación útil dentro de la botella hasta 2.25 veces la del testigo, dependiendo de la posición de la botella y de la hora el día, lo que concuerda con el diseño teórico del colector, que tiene una capacidad ideal de concentración de tres soles. La ventaja radica en requerir una menor cantidad de energía radiante o menor tiempo de exposición para lograr eficiencias de remoción hasta del 100% de coliformes totales. Esto es útil en los lugares con bajos niveles de radiación o tiempos de insolación reducidos por nubosidad en épocas de lluvias.

Una ventaja adicional de la desinfección solar es que no proporciona sabor desagradable al agua, razón por lo cual tiene buena aceptación entre los usuarios

Una desventaja de este método es que no proporciona una protección residual contra recontaminación y tampoco asegura la calidad fisicoquímica del agua, por lo que sólo debe emplearse para mejorar la calidad bacteriológica.

Agradecimientos.- Se reconoce en estos estudios la valiosa participación de nuestros compañeros del IMTA: Omar Fonseca, Juana E. Cortés, Víctor Ramírez y Erick Bandala, así como de las tesis Miriam Rodríguez y Josefina Vergara. También se reconoce la importante colaboración de Claudio Alejandro Estrada Gasca, investigador del Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM en el diseño del concentrador solar y evaluación de nuevos materiales reflejantes.

Bibliografía

- BLANCO J., MALATO S.; (2002) "Solar Detoxification"; US, *John Wiley and Sons, UNESCO*.
- CORTÉS J., ET AL.; (2000) "Radiación solar para desinfectar agua en comunidades rurales"; *Informe final, proyecto IMTA/CNA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 59 pp.*
- MARTÍN A., ET AL.; (1999) "Desinfección del agua por radiación solar"; *Informe final, proyecto IMTA/CNA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 51 pp.*
- MARTÍN A., ET AL.; (2000) "Viabilidad técnico social de la desinfección solar"; *Informe final, proyecto IMTA/CNA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 7 capítulos.*
- WEGELIN, M.; (1999) "Solar Water Disinfection. A water treatment process used at household level"; *Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology, Department of Water and Sanitation in Developing Countries (EAWAG/SANDEC).*