

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**



**EVALUACIÓN DE UNA ESTUFA SOLAR COMO MÉTODO PARA
DESINFECCIÓN DE AGUA PROVENIENTE DEL RÍO GUACALATE DE SAN
BARTOLOMÉ BECERRA SACATEPÉQUEZ**

JOSÉ RODRIGO LOARCA UMAÑA

QUÍMICO BIÓLOGO

Guatemala, Octubre de 2005

INDICE

	Pg.
I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	3
III. ANTECEDENTES	4
A. Bacterias coliformes	4
B. <i>Escherichia coli</i>	4
C. Enfermedades transmitidas por agua	6
D. Desinfección del a agua	8
E. Efecto de la temperatura sobre las bacterias	9
F. Radiación solar	10
G. Uso de la radiación solar para la desinfección de agua	11
H. Estufa solares	14
I. Características climáticas y recurso solar en Guatemala	15
J. Río Guacalate	17
IV. JUSTIFICACIÓN	19
V. OBJETIVOS	20
VI. HIPÓTESIS	21
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	22
A. Universo	22
B. Muestra	22
C. Recursos humanos	22
D. Materiales	23
E. Métodos	25
F. Diseño de investigación	28
VIII. RESULTADOS	29
IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	34
X. CONCLUSIONES	38
XI. RECOMENDACIONES	39
XII. REFERENCIAS	40
XIII. ANEXOS	45

VIII. ANEXOS

Anexo 1

Temperaturas alcanzadas por el agua cruda de Río tratada a través de la estufa solar durante cuatro horas de exposición al sol (Mayo 2005).

Hora/Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10:00	20 °C	20 °C	17 °C	20 °C	17 °C	23 °C	20 °C	20 °C	20 °C	21 °C
10:30	30 °C	23 °C	29 °C	32 °C	26 °C	32 °C	26 °C	32 °C	35 °C	41 °C
11:00	32 °C	29 °C	31 °C	35 °C	29 °C	33 °C	27 °C	36 °C	38 °C	45 °C
11:30	33 °C	31 °C	33 °C	35 °C	32 °C	37 °C	30 °C	42 °C	42 °C	59 °C
12:00	36 °C	34 °C	36 °C	39 °C	40 °C	40 °C	35 °C	50 °C	49 °C	78 °C
12:30	37 °C	39 °C	41 °C	60 °C	45 °C	42 °C	35 °C	62 °C	53 °C	86 °C
13:00	37 °C	42 °C	44 °C	62 °C	48 °C	45 °C	36 °C	69 °C	58 °C	88 °C
13:30	39 °C	42 °C	45 °C	64 °C	51 °C	47 °C	37 °C	71 °C	65 °C	86 °C
14:00	39 °C	43 °C	47 °C	67 °C	54 °C	47 °C	40 °C	84 °C	69 °C	87 °C

Fuente: Datos experimentales de las muestras analizadas.

Anexo 2

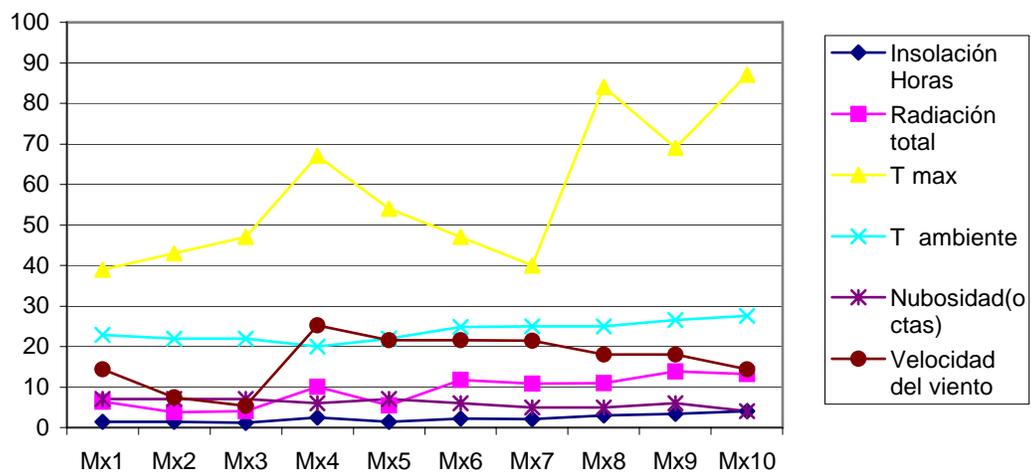
Radiación solar (Calorías/Cm²/min) durante el tratamiento del agua cruda de río de 10:00 a 14:00 horas (Mayo 2005).

No. MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HORA										
10:00	0.81	0.65	0.50	0.57	0.55	1.70	1.65	1.57	1.35	1.25
10:30	0.53	0.40	0.50	0.92	0.54	1.60	1.70	1.50	1.4	1.30
11:00	0.54	0.30	0.50	0.98	0.56	1.67	1.25	1.70	1.51	1.50
11:30	0.90	0.40	0.49	1.28	0.56	1.61	1.25	1.20	1.61	1.51
12:00	1.00	0.40	0.45	1.36	0.60	1.30	1.23	1.10	1.70	1.53
12:30	0.67	0.57	0.45	1.46	0.65	1.10	1.10	1.20	1.75	1.60
13:00	0.80	0.45	0.43	1.37	0.75	0.99	1.01	1.00	1.80	1.60
13:30	0.70	0.30	0.40	1.01	0.65	0.95	0.87	0.90	1.60	1.67
14:00	0.50	0.30	0.35	1.07	0.60	0.91	0.85	0.85	1.20	1.26
TOTAL	6.45	3.77	4.07	10.02	5.46	11.83	10.91	11.02	13.92	13.22

Fuente: Datos experimentales de las muestras analizadas.

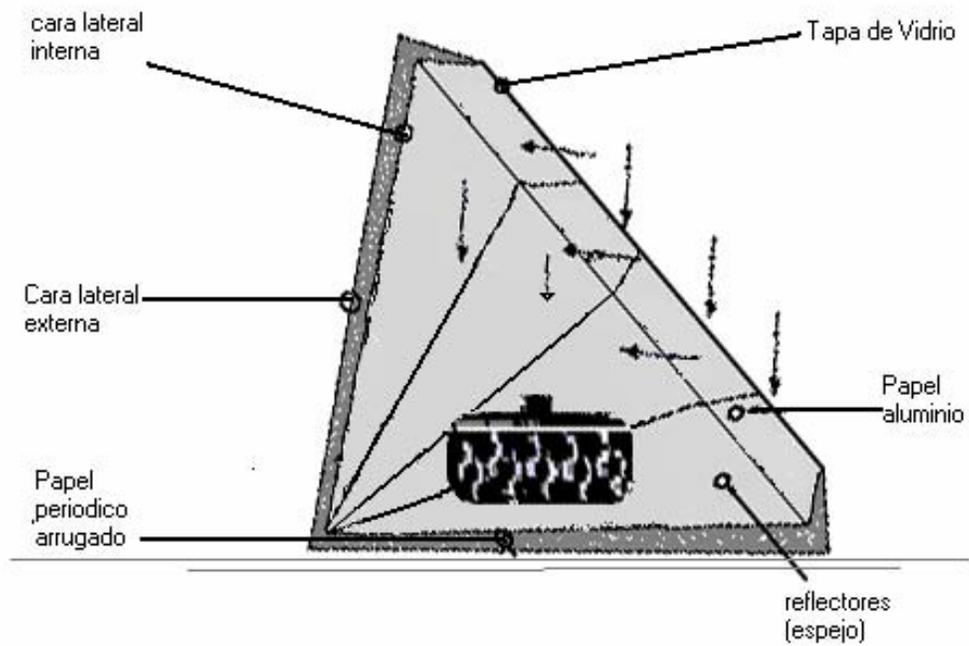
Anexo 3

Variables climatológicas (Mayo 2004) y temperaturas alcanzadas por el agua cruda de río dentro de la estufa solar.



Anexo 4

Posición de la Estufa Solar sobre la superficie del suelo durante el proceso de desinfección del agua destilada.



Anexo 5

Fotografías de la estufa solar diseñada.



I. RESUMEN

El agua contaminada es una fuente importante de transmisión de enfermedades, afectando principalmente a los países en vías de desarrollo que presentan un número importante de comunidades rurales con necesidades primarias no cubiertas. Entre los servicios elementales inexistentes de estas comunidades rurales destaca la falta de acceso al agua potable. El agua que ingieren generalmente no recibe tratamiento o bien el tratamiento utilizado es deficiente.

Una alternativa para la desinfección del agua es la radiación solar. Tomando en cuenta que el recurso solar en Guatemala es abundante durante todo el año, en el presente estudio se evaluó el tratamiento de agua por exposición a la energía solar, a través de una estufa solar que contenía un recipiente negro de aluminio y que fue hecha con materiales de bajo costo y fácil adquisición y construida para concentrar esta energía para producir calor y dañar el contenido bacteriano presente. Para ello, se utilizó agua proveniente de un río con contaminación fecal presente (expuesta a la estufa solar a inicios de invierno), las muestras de agua fueron tratadas durante un periodo de 4 horas de exposición (entre las 10:00 y 14:00 horas).

En la evaluación de la desinfección de agua cruda proveniente del río Guacalate a través de la estufa solar, se alcanzaron temperaturas comprendidas entre los 38 °C y 87 °C. Se observó que de las diez muestras analizadas, seis de ellas mostraron crecimiento de *E. coli* a las cuarenta y ocho horas después del tratamiento. Por lo que la desinfección del agua de río a través de la estufa solar no logró una eliminación completa de *Escherichia coli* y de coliformes. Únicamente, en las muestras de agua expuestas en los días soleados que permitieron radiación solar y un incremento de la temperatura por arriba de 60 °C se obtuvo ausencia de bacterias coliformes y *Escherichia coli*. Por lo que no se puede asegurar que el uso de la estufa solar sea una alternativa segura para la

desinfección en los días en que no se alcancen estas condiciones climáticas y de radiación.

II. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población a nivel mundial y el mal uso del agua para diferentes actividades, ha incrementado los niveles de contaminación. Esta contaminación está relacionada con los vertidos de origen doméstico e industrial a los cuerpos de agua. En el caso de los residuos de origen doméstico, la carga contaminante está representada por altos porcentajes de materia orgánica y microorganismos de origen fecal. Estos microorganismos son causantes de enfermedades de origen gastrointestinal, que generan altos porcentajes de morbi-mortalidad en la población.

En nuestro país muchas enfermedades infecciosas son causadas por bacterias, virus y otros microorganismos que se transmiten por medio del agua contaminada. Esto sucede especialmente en áreas rurales donde no existe infraestructura sanitaria, ni servicios de agua potable. Los lugares de abastecimiento son tanques, pozos, ríos, lagos y otras fuentes naturales que generalmente están contaminadas por la falta de drenajes, letrización o mal manejo de desechos entre otros.

Es clara la razón de usar procesos de cocción y pasteurización para evitar las enfermedades de transmisión por agua, pero estos métodos implican el uso de recursos energéticos como la electricidad y los materiales combustibles (gas, carbón y madera). La utilización de dichos recursos implican un alto costo económico, un desgaste ecológico o bien problemas de salud a causa de la contaminación que generan. Por esta razón se hace imprescindible la búsqueda de soluciones a través del desarrollo de nuevas tecnologías, con el objetivo de aprovechar otras fuentes de energía para la desinfección y el tratamiento térmico de agua. Una alternativa para aprovechar la energía renovable es el uso de estufas solares, por este motivo se diseñó una estufa económica que fue construida con materiales que permitieron el uso eficiente de la energía para generar calor y finalmente crear condiciones inhóspitas o inadecuadas para la supervivencia bacteriana.

III. ANTECEDENTES

A. Bacterias coliformes

Las coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. La presencia de bacterias coliformes en el suministro de agua es un indicio de que el suministro de agua puede estar contaminado con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. Los coliformes fecales, que se encuentran en los intestinos de los humanos y otros animales de sangre caliente, son un tipo de bacterias coliformes. La presencia de coliformes fecales en un suministro de agua es un buen indicador de que las aguas negras han contaminado el agua. Se pueden hacer pruebas específicamente para coliformes fecales o para el total de bacterias coliformes que incluye todos los tipos de bacterias coliformes y que puede indicar contaminación fecal (1-4).

B. *Escherichia coli*

Microorganismo que fue aislado por primera vez en heces de niños, en el año de 1885 y descrito por el bacteriólogo alemán Theodor Escherich. *E. coli* habita en el intestino de personas y animales de sangre caliente, es una bacteria anaerobia facultativa, Gram negativo, no formadora de esporas, tiene la capacidad de fermentar la glucosa y la lactosa, puede crecer a 35 o 37 °C con una temperatura óptima de 44 °C \pm 0.2 °C, su punto térmico mortal es de 55°C y generalmente es un comensal inofensivo (1-4).

1. *Escherichia coli* como indicador de contaminación

E. coli pertenece al grupo de microorganismos coliformes y es adecuado como indicador de contaminación bacteriana ya que los coliformes son contaminantes comunes

del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, están presentes en grandes cantidades, permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos con los sistemas de desinfección. Algunos coliformes se denominan termo-tolerantes por su capacidad de soportar temperaturas elevadas (4-7).

Muchas enfermedades son transmitidas por el agua, aunque esta sea clara y pura, puede estar lo suficientemente contaminada con microorganismos patógenos para ser una amenaza a la salud. Por lo general no es práctico examinarla en busca de varios organismos patógenos como bacterias, virus y protozoarios, vigilar cada uno de estos agentes sería un trabajo difícil y largo, el diagnóstico de estos microorganismos requiere en la mayoría de los casos laboratorios especializados, varios días de análisis y costos elevados. Una alternativa para realizar un control fiable y económico de la calidad microbiológica del agua, es el uso de microorganismos indicadores de contaminación, que son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos (concentración y reacción frente a factores ambientales y barreras artificiales), pero se identifican y cuantifican mediante técnicas fáciles, rápidas y económicas. Existen aquellos que se encuentran o relacionan con las vías intestinales y cuya presencia en el agua, indica que esta ha recibido contaminación de origen intestinal (1,3,5,7,8).

“El uso de organismos intestinales normales como indicadores de contaminación fecal, en lugar de los organismos patógenos mismos, es un principio de aceptación universal en la vigilancia y evaluación de la seguridad microbiana en los sistemas de abastecimiento de agua” (8).

El grupo de coliformes son buenos indicadores debido a que son habitantes comunes del tracto intestinal. Al excretarse al medio acuático los organismos casi mueren pero no lo hacen tan rápido como las bacterias patógenas y tanto los coliformes como los patógenos se comportan de una manera similar durante los procesos de purificación de agua, por lo tanto es probable que si los coliformes se encuentran en el agua esta ha recibido contaminación fecal y puede no ser segura para beber (3,5,8).

Del origen intestinal de *E. coli* se concluye que su presencia en el agua indica que ésta ha tenido contacto con materia fecal, la supervivencia de estas bacterias en medios no entéricos es limitada por lo que implica una contaminación reciente y por ende potencialmente más peligrosa. Su fácil recuperación *in vitro*, identificación, aislamiento, su carácter generalmente apatógeno y las características de supervivencia en el agua, determinaron que *E. coli* sea un indicador ideal de contaminación fecal, que proporciona una evaluación sanitaria de la calidad del agua con un alto grado de especificidad y sensibilidad (1,3,5,8).

C. Enfermedades transmitidas por agua

Las enfermedades transmitidas por el agua son causadas principalmente por agentes patógenos biológicos, más que químicos, y las enfermedades que provocan casi siempre son contagiosas. Estos microorganismos como bacterias, virus y parásitos, pueden llegar al huésped por medio de la vía oral, siendo esta la forma más común de contaminación por microorganismos para el hombre. Estos microorganismos se transmiten generalmente cuando las heces contaminadas con patógenos son eliminadas y entran en contacto con las fuentes hídricas que se usan para el consumo humano y como este líquido se ingiere en grandes cantidades, pueden infectar aun cuando contenga un pequeño número de organismos patógenos, que pueden provocar enfermedades como: cólera, fiebre tifoidea, disenterías, poliomielitis, hepatitis y salmonelosis, de esta forma la falta de higiene y la carencia o el mal funcionamiento de los servicios sanitarios son algunas de las razones por las que estas enfermedades continúan representando un importante problema de salud en países en vías de desarrollo (8-10).

Dentro de las bacterias mayormente relacionadas con las enfermedades transmitidas por el agua se puede encontrar especies de *Escherichia coli*, causantes de una diversidad de enfermedades gastrointestinales, como *E. coli* enteropatógena, *E. coli* enterotoxigénica, *E. coli* enteroinvasiva, *E. coli* enterohemorrágica, *E. coli* enteroadherente y *E. coli* enteroagregativa. Otros microorganismos comunes son *Vibrio*

cholerae, agente etiológico del cólera, *Shigella dysenteriae*, que causa la disentería, *Salmonella typhi*, bacilo que causa la fiebre tifoidea y *Salmonella* spp., agentes de salmonelosis (8,9).

A nivel mundial, el 80 por ciento de las enfermedades infecciosas y parasitarias gastrointestinales y una tercera parte de las defunciones causadas por éstas se deben al uso y consumo de agua insalubre (6).

La tasa de mortalidad infantil según la Encuesta Nacional de Salud Materno Infantil (ENSMI 98/99) en el área metropolitana es de 46 de cada mil nacidos vivos, en el área urbana es de 49.0 por cada mil y en el área rural de 49.1 por cada mil. Las dos causas principales de mortalidad infantil siguen siendo las enfermedades respiratorias agudas que contribuyen con el 38 por ciento de las muertes y la enfermedad diarreica aguda con un 17 por ciento. La tasa de mortalidad en la niñez se considera de 59 por cada mil (11).

Guatemala es el país centroamericano con el mas bajo índice de acceso a instalaciones adecuadas para disponer de excretas, según las Características Generales de Población y Habitación del Instituto Nacional de Estadística de la República de Guatemala en Marzo del año 1996 (11).

Una de las principales causas de la morbilidad son las enfermedades gastrointestinales. En 1998, se notificaron 5,669 casos de cólera, que representa una disminución del 17 por ciento en relación a 1995 (6,825 casos registrados); con una tasa de incidencia de 52.0 por cada 100,000 habitantes y una letalidad de 1.04 por ciento. El 79 por ciento de los casos fueron clasificados como sospechosos y el 21 por ciento restantes fueron confirmados. La enfermedad diarreica aguda continúa siendo un problema de salud pública con una tasa de incidencia de 249.3 por cada 100,000 habitantes (11).

El peligro más común del agua es su contaminación a través de excretas que implican la presencia de patógenos que pueden causar infección y ser transmitidos fácilmente al ingerir dicho líquido fundamental para la vida (8,10).

D. Desinfección del agua

Por medio de la desinfección del agua se busca principalmente asegurar la destrucción de microorganismos patógenos y mantener una barrera de protección contra estos, la cual es una intervención fundamental de salud pública que, si se aplica como es debido, reduce la incidencia de la mayor parte de las enfermedades transmitidas por el agua (1,6,12-15).

En los países en desarrollo, la consideración sanitaria principal con respecto a los suministros de agua es el prevenir que se conviertan en vehículo para la transmisión de enfermedades entéricas, pero las personas que más sufren de estas enfermedades tienen tan pocos recursos económicos, que las únicas intervenciones a su alcance para reducir los riesgos de exposición a los patógenos de transmisión hídrica son las más simples y de precio más bajo (1,14,16-18).

Hirviendo vigorosamente el agua durante un minuto, mata a cualquier microorganismo que pueda causar enfermedades, pero cuando no sea práctico el hervir el agua (más aún con el aumento de la deforestación en Guatemala, debido en parte, al uso de leña para cocinar), se debe usar la desinfección química. Los dos productos químicos que se utilizan más comúnmente es el cloro (hipoclorito de sodio) y el yodo. De estos dos, el cloro es el más común por su disponibilidad, bajo costo, confiabilidad y fácil manejo, lo hace la alternativa mayormente utilizada (18-24).

E. Efecto de la temperatura sobre las bacterias

La temperatura es uno de los parámetros ambientales más importantes que condicionan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos. La temperatura afecta a la velocidad de crecimiento (y, por lo tanto al tiempo de generación). Cada bacteria (y suponiendo que el resto de condiciones ambientales se mantienen constantes) muestra una curva característica de tasa de crecimiento en función de la temperatura, donde podemos distinguir tres puntos característicos, la temperatura mínima, óptima y máxima, las cuales son llamadas temperaturas cardinales (12,15,19,20,23,24).

La temperatura mínima se puede explicar en función de un descenso de la fluidez de la membrana, de modo que se detienen los procesos de transporte de nutrientes y el gradiente de protones, hay un aumento de la viscosidad del citoplasma, un debilitamiento de los enlaces hidrófobos de las proteínas (debido a cambios físicos en la estructura del agua de solvatación) que provoca inactivación de enzimas alostéricos y de actividad funcional de los ribosomas y en muchos casos los polisomas no se ensamblan (19, 21).

Por encima de la temperatura mínima la tasa de crecimiento va aumentando proporcionalmente hasta alcanzar la temperatura óptima, debido a que las reacciones metabólicas catalizadas por enzimas se van aproximando a su óptimo. En dicha temperatura óptima las enzimas y reacciones se dan a su máxima tasa posible (19,21).

A partir de la temperatura óptima, si seguimos subiendo la temperatura se produce un descenso de la tasa de crecimiento hasta alcanzar la temperatura máxima. Dicha temperatura refleja: desnaturalización e inactivación de proteínas enzimáticas esenciales; colapso de la membrana citoplásmica y lisis térmica de la bacteria (19,21).

Cada especie o cepa bacteriana tiene temperaturas cardinales distintas, de modo que una bacteria puede presentar una temperatura óptima superior a la temperatura máxima de otra, o inferior a la temperatura mínima de una tercera (19,21).

Según el rango de temperaturas al que pueden crecer las distintas bacterias, se pueden establecer tres tipos principales: las psicrófilas o criófilas crecen en un rango comprendido entre -5 a 5 °C, las mesófilas presentan temperaturas de crecimiento mínimas entre $10-15$ °C, óptimas a los $25-40$ °C y máximas entre 35 y 47 °C. La mayor parte de las bacterias (incluyendo las patógenas) pertenecen a esta categoría y las termófilas presentan mínimos a 25 °C, óptimos entre $50-75$ °C y máximos entre 80 y 105 °C. Dentro de esta categoría se suele distinguir las termófilas extremas, que pueden llegar a presentar óptimos cercanos a los 100 °C, y que taxonómicamente pertenecen al dominio de las *Archaea* (13,19).

Al subir la temperatura por encima de la temperatura máxima de crecimiento, se dejan sentir los efectos sobre la viabilidad: la pérdida de viabilidad significa que las bacterias dejan de ser capaces de crecer y dividirse, aun cuando las transfiramos a un medio idóneo, la inactivación (total o parcial) por calor se debe a la desnaturalización de proteínas y a la fusión de lípidos de membrana, debido a que se rompen muchos enlaces débiles, sobre todo los puentes de hidrógeno entre grupos $C=O$ y H_2-N (12,14,19).

F. Radiación solar

La cantidad de radiación recibida en una superficie normal al eje de radiación solar que se encuentra localizada en el límite de la atmósfera y cuando el sol se encuentra a una distancia media de la tierra es llamada “constante solar”, es decir, la cantidad total de energía que llega a la tierra por área (m^2 , cm^2 , etc.) y por tiempo (hora, min., etc.). El valor más aceptado de esta constante es de 1355 watts/ m^2 . La cantidad de radiación recibida en cualquier lugar de la tierra depende de dos factores: la duración y la intensidad de la radiación, la que a su vez está en función del movimiento terrestre en torno del sol (14,15,24-30).

La duración es indicada por el largo del día y la intensidad de la radiación es controlada por el movimiento de la tierra en relación al sol. La órbita terrestre no es un

círculo, pero si una elipse. De acuerdo a ello, en determinada época del año, el sol se encuentra más próximo de la tierra y en otras épocas más alejado. La intensidad también varía con la posición o elevación del sol en el cielo. La intensidad será mayor cuanto mayor sea la elevación del sol en el cielo. Por lo tanto, al medio día, mayor cantidad de radiación es recibida, debido a que: a) Los rayos procedentes del sol en una posición elevada por encima del horizonte son detectados en una superficie menor que los rayos oblicuos. b) El camino recorrido por los rayos en la atmósfera es menor cuando la elevación solar es mayor, esto quiere decir que los rayos serán menos atenuados al medio día debido a la absorción, dispersión y reflexión por los componentes de la atmósfera incluyendo las nubes. c) Al medio día cuando la elevación es mayor, el ángulo de incidencia es menor, entonces menor radiación será reflejada de vuelta al espacio. Otro factor que interviene en la radiación solar es la nubosidad, cuanto mayor espesas sean las nubes menor será la radiación que recibe la tierra (14,25,26).

El “brillo solar” es utilizado para designar el intervalo de tiempo en que, un período dado, un punto seleccionado de la superficie terrestre permanece expuesto a la radiación solar directa, es decir que representa el tiempo que el disco solar permanece descubierto en el período y local considerado. La presencia de agua y de partículas de otra naturaleza, condicionan el apareamiento de nubes y de fenómenos que reducen el brillo solar (25,26).

G. Uso de la radiación solar para desinfección de agua

Desde hace aproximadamente tres décadas, se ha estudiado el uso de la energía solar como una alternativa para desinfectar el agua en comunidades que no cuentan con servicio de abastecimiento público de agua potable y que por diferentes razones no aplican desinfectantes químicos (13-15,20,23,24,27-31).

Cuando la energía solar incide con suficiente intensidad sobre un organismo vivo puede causar daño celular y muerte. En el siglo XIX Downes y Blount reconocieron tales

efectos sobre las bacterias. La luz solar emite rayos ultravioleta, violeta y azules del espectro, que tienen un efecto bactericida, en tanto que los verde, amarillos y rojos son menos mortíferos (12,16,20,31).

La luz solar es un desinfectante natural, cuya fuente de radiación nos llega desde el espacio: radiaciones de la luz solar (visible + UV) y los rayos cósmicos, (su efecto se da principalmente como agente desecante). La radiación ultravioleta, a dosis concentrada, posee la propiedad de destruir bacterias y esporas en virtud de la longitud de la onda de sus rayos, intensificando la desinfección (4,12,14,26).

La radiación UV tiene un efecto letal y mutagénico, que depende de su longitud de onda. Ello se debe a la absorción selectiva de longitudes de onda por parte de ciertas moléculas biológicas: Las proteínas tienen dos picos (es decir, máximos) de absorción: uno a 280 nm, debido a los aminoácidos aromáticos (triptófano, tirosina y fenilalanina), y otro a 230 nm, debido a los enlaces peptídicos, el ADN y el ARN absorben a 260 nm, debido al enlace doble entre las posiciones 4 y 5 de las bases púricas y pirimidínicas (21).

Los rayos UV no tienen actividad ionizante, pero provocan cambios químicos en las moléculas absorbentes, de modo que aparecen moléculas alteradas denominadas genéricamente fotoproductos. Los fotoproductos originan la inactivación de macromoléculas, aunque, el ADN dispone de mecanismos que en algunos casos pueden paliar o eliminar estas modificaciones potencialmente lesivas (21).

Las consecuencias de inactivar proteínas o ARN no se dejan sentir a efectos de letalidad, ya que existen muchas copias de cada uno de estos tipos de macromoléculas, y se pueden volver a sintetizar, en cambio, la inactivación del único cromosoma de la bacteria tiene efectos letales primarios y efectos mutagénicos secundarios. Por lo tanto, el espectro de acción biológica de la luz UV equivale al de absorción del UV por el ADN (260 nm) (21).

Los fotoproductos generados por la luz UV en el ADN derivan principalmente de alteraciones en las bases pirimidínicas (citosina, timina) como los dímeros de pirimidina (anillo ciclobutano), los fotoproductos de la endospora (5-timinil-5,6-dihidrotimina) y los hidratos de pirimidina (21).

Los dímeros de pirimidina son los fotoproductos más importantes en las células vegetativas bacterianas. Se trata de aductos (uniones) entre dos pirimidinas adyacentes en la misma hebra de ADN, mediante la creación de un anillo de ciclobutano. Su efecto principal es la distorsión local de la configuración de la doble hélice, que interfiere en el normal emparejamiento de bases complementarias; ello, a su vez, provoca una interferencia en los procesos de replicación y transcripción, y secundariamente en el crecimiento y la respiración (21).

A dosis muy altas de rayos UV se forman también dímeros entre pirimidinas de las dos cadenas, es decir, se provocan entrecruzamientos de las dos hebras que igualmente afectan a la replicación y a la transcripción, aunque este tipo de daños reviste menos significación biológica. A diferencia de la UV, la luz visible es de baja energía, sin embargo, la luz visible puede ejercer un efecto negativo indirecto, en el fenómeno de sensibilización fotodinámica (21).

La luz visible de fuerte intensidad (p. ej., exposición a pleno sol) es capaz de matar las bacterias, debido a que ciertas moléculas de éstas (riboflavinas, porfirinas, citocromos) absorben la energía de los cuantos y se excitan durante 10^{-6} - 10^{-8} seg., tras lo cual reemiten la energía a otras moléculas, originando fotooxidaciones en residuos His y Trp de las proteínas y en las bases de los ácidos nucleicos. También se puede generar oxígeno en estado de singlete (O^{\cdot}), que es un radical muy reactivo, oxidante, que puede destruir la célula con rapidez (21).

H. Estufas solares

Desde la antigüedad se conocen pueblos que utilizaban la energía del sol para derretir hielo, calentar agua, secar frutas, granos, alimentos o cocer vegetales. La primera estufa solar es atribuida a Horace de Saussure, el cual construyó, en 1767, una pequeña “caja solar”. En 1837, el astrónomo inglés John Herschel, hijo del famoso astrónomo Sir William Herschel, construyó un sencillo dispositivo para su uso práctico durante una expedición que realizó al Cabo de Buena Esperanza. Consistía en una caja negra que era enterrada en la arena, para aislarla térmicamente, y tenía una cubierta con doble capa de vidrio para permitir la entrada de la luz solar y evitar el escape de calor. Hacia 1860, Mouchot, en Argelia, cocinó con un reflector curvado, concentrando los rayos solares sobre una pequeña olla (31-33).

El primer americano que utilizó una estufa solar fue Samuel P. Langley, durante una ascensión al monte Whitney en el año 1,881. Carl Abbot diseñó un espejo concentrador con el que logró alcanzar unos 200 °C. Con la llegada del siglo XX, la utilización masiva de los combustibles fósiles, el mundo industrializado olvidó antiguas y sencillas técnicas naturales. Cuando comenzaron a aflorar problemas como la distribución de recursos petrolíferos y la progresiva contaminación, volvió a ser planteada de forma tímida la acción solar. En 1960 finalizó un amplio estudio a nivel mundial patrocinado por las Naciones Unidas para su implantación en el Tercer Mundo. La conclusión fue que las estufas solares eran un instrumento idóneo, y solamente era necesario un poco de voluntad y adaptación a las costumbres para su utilización a gran escala. Son interesantes los trabajos realizados por la ingeniera María Telkes, que creó estufas muy asequibles por su barata construcción y aptos para ser usados en países pobres. Por aquella época, en China (sobre todo en el Tibet), se hicieron intentos de distribuir un número elevado de estufas entre la población campesina. En 1970, Sherry Cole y Bárbara Kerr desarrollaron en Arizona varios modelos de gran difusión debido a su bajo precio. En 1980, el “Solar Chef” de Sam Erwin fue muy popular, por su excelente rendimiento. En 1992 fue promovida la 1º Conferencia Mundial sobre la Cocina Solar por la asociación “Solar Box Cookers International” (32-34).

Como su propio nombre indica, las estufas solares utilizan la energía proveniente de la radiación solar. Consiste en crear un “ambiente” caliente aprovechando esta energía, utilizando para su construcción diversos materiales que eviten la pérdida de calor y que no sean fácilmente alterables por la radiación o por los diversos factores climáticos, las estufas solares son un método práctico que se basa en un recipiente aislante que acumula por efecto invernadero la radiación solar, o que recibe y concentra esta misma radiación en un punto focal para la producción de calor, el cual se genera cuando las ondas calóricas provenientes del sol chocan con las partículas de los materiales, esta energía calórica hace que las partículas de estos comiencen a vibrar y luego transmitan esa vibración de una partícula a otra hasta que toda la superficie se calienta (14, 23, 27-29, 31-36).

Se clasifican a las estufas solares básicamente en dos grupos, en hornos basados en el efecto invernadero y los concentradores de rayos, de los hornos uno de los más usados es del tipo caja caliente solar, que se diferencia del horno propiamente dicho por tener menores reflectores y ser más sencilla en general, proporciona un espacio caliente y cerrado. Los concentradores constan de un reflector en forma de disco parabólico cuyo foco actúa sobre el recipiente o sobre una plataforma en la que se deposita este (31-34).

I. Características climáticas y recurso solar en Guatemala

El sol es una masa de materia gaseosa caliente que irradia a una temperatura efectiva de unos 6000 °C, está a una distancia de 149,490,000 kilómetros de la Tierra. La luz que continuamente derrama sobre el planeta, ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia (37).

La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se reduce por varios factores variables, entre ellos, la absorción de la radiación, en intervalos de

longitud de onda específicos, por los gases de la atmósfera, dióxido de carbono, ozono, etc., por el vapor de agua, por la difusión atmosférica por la partículas de polvo, moléculas y gotitas de agua, por reflexión de las nubes y por la inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de la radiación (37).

La intensidad de la energía radiante del sol en el exterior de la atmósfera terrestre es de 1353 watts/m^2 como promedio anual, pero en Guatemala el valor que se utiliza es de $2 \text{ calorías.cm}^2.\text{min.}$ (37).

Esta energía cuando atraviesa la atmósfera va perdiendo intensidad debido a factores variables, entre ellos, la absorción de la radiación, en intervalos de longitud de onda específicos, por los gases de la atmósfera, dióxido de carbono, ozono, etc., por el vapor de agua, por la difusión atmosférica por la partículas de polvo, moléculas y gotitas de agua, por reflexión de las nubes y por la inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de la radiación. Sobre la superficie terrestre, su valor total se reduce de $69 \times 10^{16} \text{ watts}$ a $17 \times 10^{16} \text{ watts}$ de radiación solar (37, 38).

La República de Guatemala se localiza en el istmo Centroamericano, entre los paralelos $13^{\circ} 44'$ y $18^{\circ}30'$ de latitud Norte y los meridianos $87^{\circ}24'$ y $92^{\circ}14'$ de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al Norte y al Oeste con México, al Este con El Salvador, Belice y Honduras, al Sur con el Océano Pacífico, tiene una extensión territorial aproximada de $108,900 \text{ kms}^2$ (10-11, 39-41).

Guatemala se caracteriza por un clima tropical, se encuentra localizada entre el trópico de Cancer (23.5° N) y de Capricornio (23.5° S), estos trópicos delimitan los paralelos donde el sol alcanza su máxima declinación. Dentro del contexto geográfico, el país presenta una serie de accidentes topográficos que generan climas locales que van desde secos hasta muy húmedos. Esta variedad de climas hace del país un lugar especial, en donde puede darse cualquier actividad agrícola, industrial, etc. (39).

El sol está en el cenit de Guatemala en los días, del 29 al 30 de abril, llega a su inclinación máxima al norte entre los días 21 y 22 de junio de cada año y en el área sur llega a su inclinación máxima entre los días 21 y 22 de diciembre de cada año, las horas teóricas de sol están desde 11.3 horas en enero hasta 13.0 horas en julio y desde 12.8 horas en agosto hasta 11.3 horas en diciembre (39,40).

El régimen de lluvias es variado. Presenta zonas como el altiplano con una precipitación media anual de 1,200 a 1,800 mm, zonas relativamente secas como en los Llanos de la Fragua (Zacapa), cuyo promedio anual alcanza 400 a 600 mm; zonas usualmente húmedas con valores de 4,000 a 4,500 mm y zonas extremas, cuyas precipitaciones medias anuales sobrepasan los 6,000 mm. (39,40).

Las temperaturas medias a nivel del mar son de 27.5 °C en el Océano Pacífico y 28.29 °C en la Bahía de Amatique, las cuales en los meses de abril y agosto alcanzan valores de 30 °C y 31.5 °C, respectivamente. La situación térmica en el interior es totalmente diferente, debido primordialmente a los grandes contrastes producidos por las cadenas montañosas que atraviesan el país con alturas que varían de 1,500 a 4,000 metros sobre el nivel del mar (39-41).

J. El río Guacalate

Este río se localiza en el altiplano central de Guatemala, 56 km al noroeste de Ciudad de Guatemala, esta a una altitud de 1,530 metros sobre el nivel del mar, tiene un área aproximada de 155.8 km, desde Antigua Guatemala hasta Alotenango en el departamento de Sacatepéquez. Una pequeña parte de las tierras del norte drena sus aguas hacia el Mar Caribe, por la vía del Río Motagua. Éste las recibe del Río Pixcayá, que las toma por intermedio del Río Santo Domingo (el ramal local del Santo Domingo tiene varios nombres aguas arriba: Chopac, Xaltayá Chinimayá, Chiritzrín). Pero la mayor parte del drenaje fluye al sur. El canal principal es el Río Guacalate, que corta todo el centro. Nace en Chimaltenango, un poco al norte del límite, entra por San Luis Las

Carretas, atraviesa el Valle Panchoy-Almolonga y sale por un desfiladero entre los Volcanes de Fuego, Acatenango y de Agua. Mientras serpentea por el valle recibe al Río Pensativo, por varios siglos unido a la vida de la ciudad de La Antigua Guatemala. El Cañón del río Guacalate es trascendental, pues sus aguas son usadas para riego en la agricultura y constituye una puerta de comunicación con la planicie costera (43).

IV. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala la gran mayoría de personas sufren la carencia de agua potable y eso constituye un riesgo elevado de transmisión de enfermedades gastrointestinales como cólera, fiebre tifoidea, hepatitis A, disentería y otras enfermedades.

En muchas comunidades rurales no añaden cloro al agua por rechazo al sabor o falta de suministro del producto y tampoco hierven el agua por escasez de la leña y por el alto costo que implica, por estas razones se hace imprescindible la búsqueda de alternativas para la desinfección del agua que estén al alcance de este tipo de comunidades. Una de estas alternativas es el uso de la energía solar la cual se ha empleado como una técnica eficiente en la inactivación y destrucción de bacterias patógenas.

Sabiendo que el agua es un vehículo de transmisión de enfermedades que debe ser procesado y tratado adecuadamente para disminuir el riesgo de contaminación, se hace necesario el control de la presencia de microorganismos utilizando métodos de desinfección o pasteurización, pero muchos de estos métodos requieren el uso de energía, y es ahí donde se puede elegir aquellas que sean limpias y renovables, que reduzcan la contaminación, la deforestación y que disminuyan las consecuencias que estas implican; por esto es importante el uso de este tipo de energía renovable, como la energía proveniente del sol, que puede ser aprovechada para pasteurizar o desinfectar el agua y de esta manera mejorar las condiciones de salud de la población, sin usar recursos no renovables, sin generar contaminantes y sin elevar los costos. Es así una opción económica y confiable para el tratamiento de aguas, con el fin de mantener la salud, de mejorar la calidad de vida y de fomentar el desarrollo sostenible.

V. OBJETIVOS

1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la desinfección de agua cruda proveniente del Río Guacalate posterior a cuatro horas de tratamiento en una estufa solar construida.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir una estufa solar con materiales económicos.
- Determinar las temperaturas alcanzadas por el agua proveniente de río que fueron expuestas a la estufa solar.
- Evaluar la sobrevivencia de indicadores de contaminación fecal (coliformes y *Escherichia coli*) en el agua cruda proveniente del Río Guacalate luego del tratamiento en la estufa solar.

VI. HIPÓTESIS

El tratamiento por cuatro horas de exposición a través de la estufa solar (10:00 a 14:00 horas), es un método que permite eliminar el contenido de coliformes de las muestras de agua proveniente del río Guacalate.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Universo

La estufa solar y el agua cruda proveniente del río Guacalate.

B. Muestra

Diez muestras de agua cruda proveniente del río Guacalate en Antigua Guatemala, analizadas en cuatro periodos distintos y por duplicado.

C. Recursos humanos

Tesista:

José Rodrigo Loarca Umaña.

Asesor:

Ana Rodas de García.

Colaboradores:

- Equipo técnico que labora en el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología en el Departamento de Climatología, Estación Guatemala (INSIVUMEH).
- Equipo del Laboratorio de Análisis Físicoquímico y Microbiológico (LAFYM), Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Sr. Luis Gabriel Loarca Mazariegos
- Sr. Luis Fernando Espinoza Pérez

D. Materiales

1. Equipos

- a) Autoclave Castle, co. 354024
- b) Balanza de dos platos OHAUS
- c) Baño de maría LAB-LINE
- d) Campana LABCONCO Class II
- e) Cámara de Québec Darkfield, Américal Optical Corpoation
- f) Incubadora Precision, GCA Corporation
- g) Pissetas
- h) Termómetros
- i) Vortex Genie

2. Reactivos y medios de cultivo

- a) Agar PCA.
- b) Caldo Bilis verde brillante.
- c) Caldo lauril sulfato triptosa
- d) Caldo *E. coli*.

3. Cristalería

- a) Balón aforado de 1000 mL.
- b) Beakers 50 y 100 mL.
- c) Embudo de vidrio.
- d) Erlenmeyers 500 y 1000 mL.
- e) Campanas de Durham.
- f) Cajas de petri estériles.

- g) Gradillas.
- h) Pissetas.
- i) Pipetas Pasteur.
- j) Probeta de 1000 mL.
- k) Probeta de 100 mL.
- l) Tubos de vidrio con tapadera de rosca 18 x 100 mm.

4. Instrumentos

- a) Bata de manga larga.
- b) Cofia.
- c) Guantes.
- d) Mascarillas.

5. Materiales para construcción de la estufa solar

- a) Aluminio.
- b) Cartón.
- c) Espejo.
- d) Polipropileno.
- e) Vidrio.
- f) Silicón.

E. Métodos

1. Construcción de la estufa solar

- a) La estufa solar fue construida con materiales económicos, de uso común, peso ligero y fácil transportación.
- b) Se utilizaron principalmente cuatro tipos de materiales para la construcción de la estufa, se uso cartón para las bases, papel periódico como aislante entre las bases, vidrio común de 5 mm de espesor para la tapadera en la parte superior y espejos comunes rodeados por papel aluminio como reflectores (29,30,31).
- c) Se utilizó silicón como sellador para unir todos los componentes de la estufa y se reforzó con cinta adhesiva industrial.
- d) Una vez terminada la construcción de la estufa se procedió a analizar la desinfección del agua.
- e) Para contener el agua se utilizó un recipiente negro de aluminio con tapadera de virio y con un volumen aproximado de $1,000 \text{ cm}^3$ el cual fue colocado sobre la base de uno de los reflectores internos de la estufa solar. Para poder medir la temperatura del agua se hizo un orificio pequeño en la parte superior de la pared del recipiente por donde se introdujo un termómetro.

2. Caracterización del agua de río

- a) Se utilizó agua cruda proveniente del Río Guacalate ubicado en San Bartolomé Becerro en la Antigua Guatemala, este muestreo se llevó a cabo durante diez días del mes de mayo del año 2005.

- b) Cada muestra de agua fue analizada por duplicado y en 4 momentos distintos: inmediatamente después de la captación (agua cruda), después del tratamiento, a las 24 horas y a las 48 horas post tratamiento en la estufa solar.
 - c) En los ensayos para desinfección del agua de río se contaban con controles positivos (Inoculación de agua peptonada con la cepa *Escherichia coli* ATCC 25922) y negativos (Agua peptonada estéril), que incluían un recuento de coliformes totales, fecales y *E. coli*.
3. Procedimiento de análisis de la estufa solar y desinfección del agua (7, 13, 28)
- a) Las muestras de agua cruda proveniente del río Guacalate se transportaron inmediatamente en agua de hielo hasta la estación INSIVUMEH Guatemala, a una latitud de 14.35.11, una longitud de 90.31.58 y a una altitud de 1502 metros sobre el nivel del mar, en donde se realizó la exposición de las muestras a la estufa solar la cual se colocó directamente sobre la superficie plana del suelo (Anexo 5).
 - b) Dentro de la estufa solar se colocó el recipiente de aluminio con 1000 mL de agua.
 - c) La exposición a la radiación solar, inició a las 10:00 horas.
 - d) Se llevó el control de la temperatura y la orientación de la estufa solar (exponiendo la tapa de vidrio manualmente en dirección al sol) en intervalos de 30 minutos luego de iniciado el experimento.

- e) La exposición a la radiación solar, finalizó a las 14:00 horas.
 - f) Se transportó la muestra de agua al Laboratorio de Análisis Fisicoquímico y Microbiológico (LAFYM), en agua de hielo y en recipientes estériles en donde fue analizada.
 - g) Se analizó la muestra de agua por el método de tubos múltiples (Número Más Probable).
4. Método de análisis de aguas Tubos Múltiples (Número Más Probable) (1, 4, 13, 28)
- a) Se recolectaron las muestras de agua en frascos estériles.
 - b) Se inocularon 10 mL de agua a cada 5 tubos con 10 mL de Caldo Lauril Triptosa de concentración doble, con una campana de Durham, de la misma forma se le agregó 1 mL de muestra a los 5 tubos de Caldo Lauril Triptosa de concentración simple y 0.1 mL de muestra a otros 5 tubos del mismo medio de concentración simple.
 - c) Todos los tubos se incubaron a 36 °C por 48 horas.
 - d) Se interpretó como resultado positivo a la presencia de turbidez y gas.
 - e) Se realizó la lectura de los tubos en base a la tabla Número Más Probable respectiva para interpretación de resultados de la técnica de Tubos Múltiples.

F. Diseño de investigación

1. Muestra

Se tomaron 10 muestras de agua proveniente del río Guacalate como piloto según la fórmula:

$$\text{Si } d^2 = \sigma^2$$

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{d^2} = z^2$$

$$n = 6.6 \approx 7$$

Aproximando $n \approx 10$

Nivel de confianza = 99 % $z = 2.58$ $z^2 = 6.6$

El modelo estadístico utilizado permite muestrear 10 muestras con un nivel de confianza del 99 por ciento.

2. Variables de interés

- Tiempo
- Temperatura
- Número más probable /100 mL de agua.

3. Análisis de resultados

Se analizaron los resultados por revisión de significancia entre antes y después, t pareado.

VIII. RESULTADOS

A. Construcción de la estufa solar

Se construyó la estufa solar como una caja en forma de diamante, con paredes forradas con reflectores internos hechos de vidrio y en los costados de papel aluminio, se utilizó cartón como material para la construcción de las bases y las paredes laterales y en la parte superior por donde entra la radiación solar, se uso vidrio común de ventana (Figura 1).

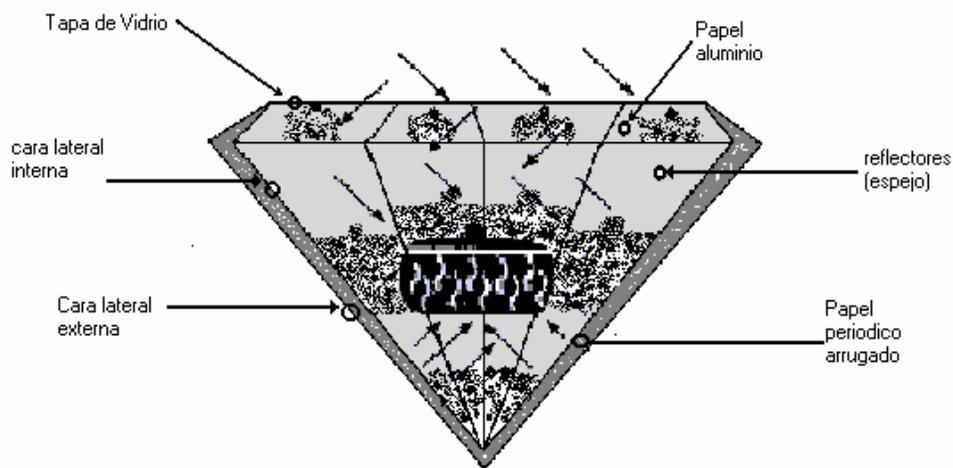


Figura 1. Componentes de la estufa solar diseñada.

Se construyeron dos bases para la estufa solar (una interior más pequeña y otra exterior más grande) cada una con cinco paredes triangulares de cartón unidas para formar una geometría pentagonal. Se rellenó el espacio entre la base interior y la exterior con papel periódico, para aislar el interior de la estufa del ambiente exterior, estas paredes planas están inclinadas con respecto a la horizontal y contienen reflectores hechos de espejos para concentrar la luz y la radiación solar hacia el interior de la estufa. Los reflectores colocados sobre la superficie plana de la base interior de la estufa, están separados una cierta distancia uno de otro, para evitar las sombras entre ellos. Este diseño permite que los rayos solares lleguen al absorbedor formando un ángulo grande de 60 grados, dando lugar a reflexiones altas dirigidas hacia el recipiente negro de aluminio que contenía el agua destilada y que se colocó en el interior (Figuras 2,3 y 4).

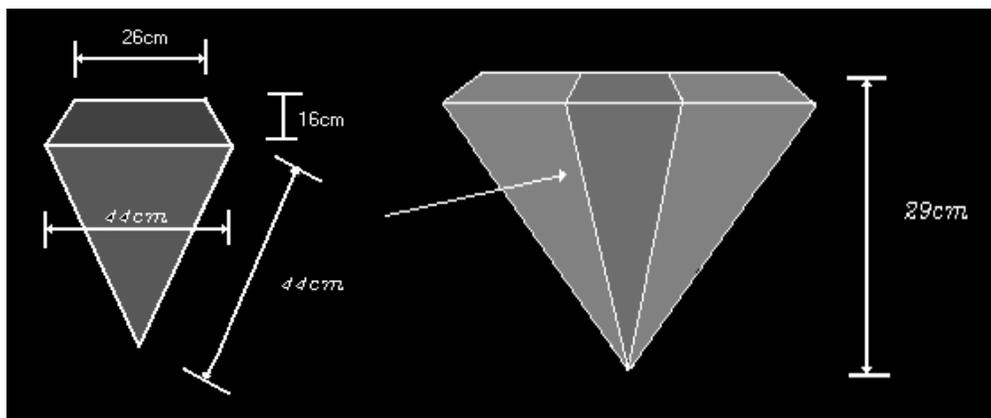


Figura 2. Diseño de las bases laterales externas de la estufa solar.

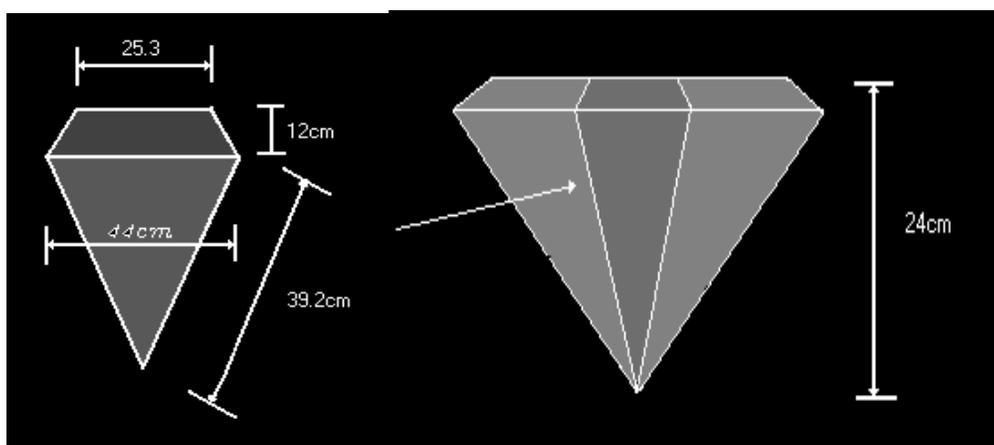


Figura 3. Diseño de las bases laterales internas de la estufa solar.

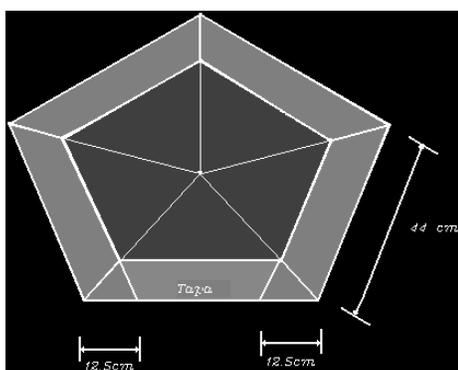


Figura 4. Diseño de la parte superior externa de la estufa solar.

B. Desinfección del agua

La desinfección del agua a través de la estufa solar dependió de las condiciones ambientales, por esto, durante el procesamiento de desinfección, se determinaron los valores de algunas variables climatológicas de importancia, dentro de las cuales están la insolación solar (con insolaciones totales de hasta 4 horas), la nubosidad (con un máximo de 7 octas y con un mínimo de 1 octas), la velocidad del viento (entre 5.1 Kilómetros / hora y 25.2 Kilómetros / hora), la radiación solar (con valores promedio de alrededor de 13 Calorías / centímetro²), la temperatura ambiental (con un mínimo de 20.0 °C y un máximo de 28.4 °C) y la época del año. Así las pruebas para la desinfección del agua cruda de río, se llevaron a cabo en inicios de invierno durante 10 días del mes de mayo del año 2005 entre las 10:00 y las 14:00 horas, con un tiempo total de exposición diaria de 4 horas por muestra.

1. El agua proveniente del Río Guacalate

La temperatura del agua cruda de río al inicio de los experimentos estuvo a 20 °C. Y como se muestra en el anexo 1, aumentó gradualmente hasta finalizada la exposición, al transcurrir 240 minutos. De todos los experimentos las temperaturas alcanzadas luego de esas cuatro horas de exposición estuvieron entre un rango de 39 °C - 87 °C (Anexos 1 y 2, Tablas 3 y 4).

De las diez muestras de agua de río expuestas a la estufa solar, solo en cuatro no se detectó sobrevivencia ni recuperación bacteriana para coliformes y *Escherichia coli*, en las otras seis muestras no se logró la desinfección.

TABLA 1. Temperaturas máximas alcanzadas por la estufa solar y lecturas climatológicas tomadas y medidas en la estación INSIVUMEH Guatemala durante los días de muestreo en el mes de Mayo del 2005.

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
¹ Insolación total (Horas)	1.4	1.5	1.2	2.5	1.5	2.2	2.1	3.0	3.4	4
Radiación total Calorías/Cm ² /min	6.45	3.77	4.07	10.02	5.46	11.83	10.91	11.02	13.92	13.22
Temperatura ambiente °C	22.9	22.0	22.0	20.0	22.0	24.8	25.0	25.0	26.5	27.6
² Nubosidad (Octas)	7	7	7	6	7	6	5	5	6	4
³ Velocidad del viento Kilómetros/Hora	14.4	7.4	5.4	25.2	21.6	21.6	21.5	18.0	18.0	14.4
⁴ Temperatura (°C) máxima alcanzada por la estufa solar	39 °C	43 °C	47°C	67 °C	54 °C	47 °C	40 °C	84°C	69°C	87C°

Fuente: Datos experimentales

¹Insolación: Es el período (expresado en horas) durante el cual el lugar de observación ha recibido radiación solar directa y que no ha sido interceptada por obstáculos (la nubosidad).

²Nubosidad: La nubosidad es la extensión del cielo cubierta por nubes y se expresa en octavos de cielo cubierto u Octas.

³Velocidad del viento: Es una variable del estado de movimiento del aire, medida según intensidad o fuerza de movimiento en unidades de espacio y tiempo.

⁴Temperatura máxima alcanzada por la estufa solar: La mayor temperatura que alcanzó el agua destilada dentro de la estufa solar en cada experimento.

TABLA 2. Concentración de Coliformes totales, fecales y *Escherichia coli* en agua de río, antes y después del tratamiento (4 horas de exposición en la estufa solar).

No Mx	MUESTRA DE AGUA DESPUES DEL TRATAMIENTO					
	ANTES DEL TRATA MIENTO	Coliformes totales, fecales y E. coli NMP/100mL				
	Antes	Inmediata- mente después	A las 24 hrs.	A las 48 hrs.	Recupera- ción Bacteriana	Presencia de E. coli
1	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≥1600, ≥1600, ≥1600	≥1600, ≥1600, ≥1600	Positivo	Presente
2	≥1600	4, 4, 4	50, 50 50	≥1600, ≥1600, ≥1600	Positivo	Presente
3	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≥1600, ≥1600, ≥1600	≥1600, ≥1600, ≥1600	Positivo	Presente
4	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	Negativo	Ausente
5	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	2, 2, 2	Positivo	Presente
6	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	2, 2, 2	2, 2, 2	Positivo	Presente
7	≥1600	2, 2, 2	8, 8, ≤2	8, 8, 8	Positivo	Presente
8	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	Negativo	Ausente
9	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	Negativo	Ausente
10	≥1600	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	≤2, ≤2, ≤2	Negativo	Ausente

Fuente: Datos experimentales

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. La estufa solar

Se construyó la estufa solar con materiales simples, como cartón, papel de aluminio, espejo y vidrio, se prefirió el uso de estos materiales debido a que son de uso común, fácil adquisición y baratos. El costo de la construcción de la estufa solar fue de Q.72.00 lo que la hace una opción viable y factible comparado con el costo de utilizar gas, electricidad, leña u otros métodos de desinfección del agua.

El cartón fue usado para las bases y paredes de la estufa solar, debido a que es un buen material aislante que permitió el almacenamiento del calor y el aumento de la temperatura en el interior de la estufa, además su estructura de peso ligero, permitía moverlo e inclinarlo para poder orientarlo con facilidad en forma perpendicular al sol (esta orientación se realizó con el fin de aumentar la radiación y la cantidad de luz solar directa que recibía el agua).

Dentro de la estufa solar, entre las bases de cartón, se colocaron reflectores fabricados con espejos comunes, cortados en triángulos formando un prisma de base pentagonal. La unión entre los reflectores tiene cierta holgura, para permitir las dilataciones y contracciones correspondientes del vidrio. Estos reflectores están encargados de captar la radiación solar y concentrarla sobre el recipiente negro de aluminio y el agua contenida, además permite recibir adecuadamente la radiación cuando los rayos solares son inclinados o poco inclinados (como ocurre a mediodía o verano).

En la parte superior de la estufa, sobre las bases de cartón, se colocó vidrio común de ventana (5mm de grosor), para que la radiación solar pasara adecuadamente y se evitara el ingreso directo del viento, esto con el fin de disminuir las pérdidas de calor que están fuertemente influenciadas por la convección y por la velocidad de viento.

El incremento o disminución de la temperatura también dependió de las pérdidas de calor a través de las pequeñas aberturas entre los vidrios y espejos, por eso se empleó sellador adhesivo de silicona, que permitió el almacenamiento más eficiente de la energía.

B. Desinfección a través de la estufa solar

La desinfección del agua proveniente del Río Guacalate se realizó durante el periodo entre las 10:00 y 14:00 horas del día, debido a que la radiación solar máxima se registró alrededor de las 12:00 horas aumentando el efecto letal sobre las bacterias. En la exposición del agua a través de la estufa solar, se tomó ventaja de esta energía solar para generar calor y para producir daño celular y con esto contribuir en la desinfección del agua. Es importante notar que en algunas muestras el agua dentro de la estufa solar aumentó gradualmente su temperatura hasta alcanzar el máximo a las cuatro horas, almacenando el calor minuto a minuto y proporcionando temperaturas similares a las de pasteurización mucho antes de concluir el tiempo de exposición, así durante el proceso se obtuvieron muestras en las cuales luego de solo una hora en la estufa solar ya superaban los 60 °C e incrementaron su temperatura por tres horas más hasta concluir el periodo de tratamiento. (Anexo 1 y 3)

1. Desinfección del agua de Río

En la exposición del agua de río a través de la estufa solar, se produjo daño celular por el aumento de la temperatura y la radiación solar que contribuyeron a la desinfección del agua, estas pruebas se realizaron el mes de mayo, este mes se caracterizó por condiciones climatológicas determinadas por la tendencia decreciente en los valores de radiación solar directa, esto se estimó, teniendo en cuenta las variables climatológicas, la latitud y altura del lugar. Los ensayos se realizaron en forma independiente, las condiciones meteorológicas fueron variables en cuanto a temperatura

ambiente, radiación sobre el plano horizontal y una irregular velocidad del viento, razón por la cual en todas las corridas se obtuvieron valores con cierta discrepancia.

De las diez muestras de agua cruda de río expuestas a la estufa solar durante los días de muestreo solo cuatro muestras lograron que las temperaturas aumentaran gradualmente por arriba de los 67 °C, lo que permitió que solo en estas muestras las bacterias llegaran a sus punto térmicos mortales, pero en las otras seis muestras, la estufa solar no logró sobrepasar estas temperaturas y no se pudo eliminar el contenido bacteriano del agua de río y solo se logró reducirlo. Como se muestra en la tabla 4 algunas muestras redujeron el contenido bacteriano desde ≥ 1600 NMP/100mL hasta en < 2 NMP/100mL pero a las 48 hrs del tratamiento ya presentaban crecimiento, así que se comprobó que el efecto de la estufa solar en estas muestras y sobre estos agentes bacterianos no excede la capacidad de reparar los daños celulares provocados lo que permitió la recuperación bacteriana. Este efecto se observó en todas las muestra que no llegaron a temperaturas superiores a 60°C, lo que fue causado por las condiciones climáticas en estos días de muestreo con alta nubosidad y con dosis mínimas de radiación total acumulada, por esto no se logró la eliminación completa de coliformes totales, fecales y de *Escherichia coli*, además se presentaron temperaturas ambientales bajas y velocidad del viento de hasta 25 Km/hora en si fueron condiciones desfavorables, esto significa que la estufa solar no funcionó en días con altos declives de radiación, lo que demuestra que la estufa solar no pudo concentrar la radiación y almacenar suficiente energía y calor que permitiera la desinfección eficientemente.

Los resultados individuales de las cuatro muestras exitosamente desinfectadas mostraron que para la eliminación de 1600 NMP/100mL de coliformes totales, fecales y *E. coli* fueron suficientes cuatro horas de exposición del agua de río a la estufa solar con valores promedio de alrededor de 10.02 Calorías/centímetro² de intensidad total de radiación solar. Esto demuestra que la desinfección del agua de río (en estas cuatro muestras) por este método satisfacen la calidad microbiológica según la norma COGUANOR 29001 para tubos múltiples (42).

Por los resultados obtenidos no se puede asegurar que el agua tratada a través de la estufa solar sea una alternativa práctica y segura para la desinfección de agua de río en los días en que las condiciones climáticas y de radiación no permitan un incremento de la temperatura por arriba de 60 °C.

X. CONCLUSIONES

1. En la exposición del agua cruda proveniente de río a la estufa solar se logró la eliminación total de coliformes y *E. coli* en cuatro muestras, expuestas durante los días en que se lograron temperaturas superiores a 65 °C.
2. En cuatro muestras negativas a la presencia de coliformes y *E. coli* después de la desinfección por exposición a la estufa solar luego de 24 horas se tornaron positivas es decir, se recuperaron, lo que indica que el daño en esas ocasiones fue subletal.
3. La estufa solar construida permitió alcanzar temperaturas de pasteurización en cuatro muestras de agua en los días en que las condiciones climáticas presentaron niveles de radiación promedio por arriba de 10 Calorías/Cm².

XI. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar pruebas con otras bacterias, protozoarios, parásitos y algunos enterovirus de origen fecal que sean menos susceptibles a las radiaciones que las bacterias. Es necesario realizar pruebas sobre los efectos de la radiación en el material del envase y verificar que no haya desprendimiento de compuestos tóxicos de importancia para la salud pública.
- Se recomienda analizar la desinfección solar con otras fuentes de agua, en otras épocas del año y con diferentes grados de radiación solar, tiempos de exposición, turbidez, y diferentes tipos de recipientes contenedores de agua.
- Debería evaluarse la factibilidad técnica y social de la desinfección solar usando la estufa solar en comunidades rurales para establecer sus condiciones de uso y aceptación.

XII. REFERENCIAS

1. Adams NR, Moss MO. Microbiología de los alimentos. España: ACRIBIA S.A., 1997. 464p.
2. Henry JB. Diagnóstico y tratamientos clínicos por el laboratorio. 9. ed. España: Masson, 1998. 1509p. (p.1082-1090).
3. Madigan MT. Microbiología. 6. ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1993. 897p. (p.599-597).
4. Cano F, Quán N. Técnicas de análisis microbiológico de alimentos y agua. Guatemala: INCAP, 1995. 40p.
5. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. “Agua potable para comunidades rurales, rehusó y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas.” Indicadores de contaminación fecal en aguas. 14 Abril 2002. 14 Agosto 2003. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_20.pdf>.
6. Wolter, W “Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales.”26 Mayo, 2003 <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo_13.html>.
7. López MC. Efecto del color y la turbiedad en la eliminación de coliformes fecales al aplicar el método de desinfección solar en agua cruda proveniente de los vertederos de Acatán, Teocinte 18 y Canalitos de la planta potabilizadora Santa Luisa de la ciudad de Guatemala. Guatemala: USAC, 2002. 57p.
8. Organización Panamericana de la Salud, Oficina Sanitaria Panaméricana, Oficina Regional de la OMS. Guías para la calidad del agua potable. EUA: Organización Mundial de la Salud, 1991.
9. National academy of sciences. “Calidad del agua y problemas a la salud”. 23 Marzo 2000. <<http://lanic.utexas.edu/la/mexico/water/ch5esp.html>>.
10. Quiroz JA. Análisis económico de la contaminación de las aguas en América Latina. Chile: Centro internacional para el desarrollo económico, 1995. 446p.

11. Organización Panamericana de la Salud, CEPIS “Evaluación de los servicios de agua potable y saneamiento 2000 en las Américas.” 25 febrero, 2003. 24 Abril 2003. <<http://www.cepis.opsoms.org/eswww/eva2000/Guatemala/informe.html>>.
12. Maffeo J. “Agua, desinfección y potabilización de emergencia”. Agua potable bajo el sol. 01 Agosto, 2003. <<http://www.josto.potabil.htm>>.
13. Quan NE. Uso de la radiación solar para la desinfección de agua contaminada con el agente causal del cólera. Guatemala: Universidad de San Carlos, (Tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 1994. 46p
14. Cadena C, Bucchianti G, Saravia T. “Caracterización de preparaciones alimenticias realizadas en cocinas solares comunales.” 24 Julio 2001. 14 Agosto 2003. <<http://216.239.37.104/search?q=cache:QeNfCozVFNkJ:mail.inenco.net/~asadedit/avermas/averma5/ar115-03.pdf+preparaciones+alimenticias+cocina+solar+&hl=es&ie=UTF-8>>.
15. Meierhofer R, Wegelin M. “Desinfección solar del agua” Manual SODIS, Guía de aplicación. Febrero 2002, Agosto 2003. <http://www.sodis.ch/files/SODIS_Manual_sp.pdf>.
16. Solar water disinfection. “A water treatment process used at household level”. 1 julio 2003, 01 Agosto 2003. <<http://sodis.ch/>>.
17. Carlyle Guerra de Macedo. Oficina Sanitaria Panamericana. “Ponderación de los Riesgos de origen Microbiano y Químico en la Desinfección del Agua Potable: La Perspectiva Panamericana.” 26 Agosto, 2003. 28 Agosto, 2003. <<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind55/ponrie/pon.html>>.
18. Sandoval C. “Información y análisis para el manejo forestal sostenible: Integrando esfuerzos nacionales e internacionales en 13 países tropicales en América Latina, Estudio de casos sobre combustibles forestales en Guatemala.” Mayo, 2001, Agosto, 2003. <http://www.medioambiente.gov.ar/documentos/bosques/manejo_forestal_sostenible/actividades/taller_energia/informe_nacional.pdf>.
19. Nancy Sánchez Tarragó. Unidad de Análisis y Tendencias en Salud. “Alternativas de desinfección del agua.” Reporte técnico de vigilancia. Abril 27, 1997. 24 julio, 2003. <<http://www.infomed.sld.cu/instituciones/uats/uats/RTV/rtv0597.htm>>.

20. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. “Agua potable para pequeñas comunidades rurales a través de un sistema de colección y almacenamiento de lluvia y planta potabilizadora.” Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. 23 mayo, 2003. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_20.pdf>.
21. Enrique Iáñez. “Acción de los agentes físicos sobre las bacterias (II).” Microbiología. 17 Agosto, 1998. 26 de Agosto 2003. <http://www.ugr.es/~eianez/Microbiologia/18_Micro.html>.
22. Sistema de las Naciones Unidas en Guatemala. Guatemala: Los contradtes del desarrollo humano. Guatemala: Organización de las Naciones Unidas en Guatemala, 1998. 198p.
23. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. “Inactivación y recuperación de enterobacterias en agua de consumo humano tratada con radiación solar.” Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. 23 Mayo, 2003. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_10.pdf>.
24. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. “Desinfección solar, una alternativa para pequeñas comunidades rurales.” Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. 23 Mayo, 2003. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_09.pdf>.
25. Godínez GA. Análisis preliminar sobre radiación y brillo solar en Guatemala. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 1995. 32p. (p.1-12)
26. Salamanca J, Hurtado A. “Cálculo de los parámetros de un modelo matemático para estimación de radiación solar directa en Bogotá.” Enero, 2001, Julio, 2003. <http://calima.univalle.edu.co/scf/vol33_2/articulos/pdf/332373.pdf>.
27. Passamai V, Passamai M. “Experiencias con cocinas solares tipo cookit de costo mínimo.” Abril, 2002, Marzo, 2003 <<http://mail.inenco.net/~asadedit/avermas/averma6/art128.pdf>>.

28. Treto PC, Bermúdez AJ. “Evaluación de la cocina solar SK-12 de fabricación alemana (Evaluation of the German solar cooker SK-12.)” Marzo, 2003. [.<http://creo.fim.uclv.edu.cu/publications_es.htm>](http://creo.fim.uclv.edu.cu/publications_es.htm).
29. Saravia LR, Cadena C, Caso R. “Cocinas solares comunales de uso múltiple.” Agosto, 2003. [.<http://www.asades.org.ar/erma/erma10/7%20saravia.pdf>](http://www.asades.org.ar/erma/erma10/7%20saravia.pdf)
30. Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para América Central. “Enfoque renovable”. Diciembre, 2000, Agosto, 2003. [.<http://www.bunca.org/boletines/enfoque4.pdf>](http://www.bunca.org/boletines/enfoque4.pdf).
31. Stoll D, Giroux JF, Passamai V. “Experiencias controladas realizadas con distintas cocinas solares.” Junio, 1998, Julio, 2003. [.<http://mail.ineco.net/~asadedit/avemas/avema3/03-81.pdf>](http://mail.ineco.net/~asadedit/avemas/avema3/03-81.pdf).
32. Passamai V, Massy C. Facultad de Ciencias Exactas, U.N. “Cocinas solares de tipo caja.” 18 julio, 2003. [.<http://g.unsa.edu.ar/inenco/publica/Asad971.html >](http://g.unsa.edu.ar/inenco/publica/Asad971.html).
33. Grupo de Areas de Investigación Ingeniería Sin Fronteras Granada. “Cocina Solar.” 26 Agosto, 2003. [.<http://www.mutualsentimiento.org.ar/files/pdf/coc_solar.pdf>](http://www.mutualsentimiento.org.ar/files/pdf/coc_solar.pdf).
34. Solar cooker international. “Solar cooker review.” Abril 2001, 1 Agosto 2003. [.<http://www.solarcooking.org/newsletters/scrapr01-span.htm>](http://www.solarcooking.org/newsletters/scrapr01-span.htm).
35. Cadena C, Saravia L, Echazú R. “Trasferencia de calor y curvas de calentamiento para absorbedores de aluminio empleados en cocinas solares.” 24 Marzo, 2003 [.<http://mail.inenco.net/~asadedit/avemas/averma6/art044.pdf>](http://mail.inenco.net/~asadedit/avemas/averma6/art044.pdf)
36. Castell ME, Pastrana AF, Pereira MC. “Propuestas de procedimiento para la evaluación del comportamiento térmico de cocinas y hornos solares.” [.<http://mail.inenco.net/~asadedit/avemas/averma3/08-133.pdf>](http://mail.inenco.net/~asadedit/avemas/averma3/08-133.pdf).
37. Rafael Faradje. “Disponibilidad de la energía solar.” Primera parte. Energía Solar. 26 Julio, 2003. [.<http://www.cai.org.ar/revista/sol1064.html>](http://www.cai.org.ar/revista/sol1064.html).
38. ECOM. “Energía solar”. El sol. 16 Agosto 2002 [.<http://members.tripod.com/~fotografia/textos/solar.htm>](http://members.tripod.com/~fotografia/textos/solar.htm).
39. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Datos meteorológicos de las cabeceras departamentales. 2. ed. Guatemala: Ministerio de comunicaciones, transportes y obras públicas, 1995. 175p.

40. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Meteorología de Guatemala. INSIVUMEH. 1995. 180p. (p.48)
41. Contreras VM., Estación Meteorológica. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 1995. 189p.
42. COGUANOR, Norma Guatemalteca Obligatoria Agua Potable. Especificación NGO 29001: 99. Primera revisión. Guatemala: Ministerio de economía, 1999. 14p.(p1-7)
43. Orozco O. “Potencial del recurso hídrico subterráneo y modelo matemático preliminar y del sistema acuífero del valle aluvial del río Guacalate desde Antigua Guatemala hasta Alotenango, Sacatepéquez, Guatemala.” Diciembre, 2003, Agosto, 2004. <[http:// mail.inenco.net/~asadedit/avermas/averma3/08-133.pdf](http://mail.inenco.net/~asadedit/avermas/averma3/08-133.pdf)>.

XIII. ANEXOS

Anexo 1

Temperaturas alcanzadas por el agua cruda de Río tratada a través de la estufa solar durante cuatro horas de exposición al sol (Mayo 2005).

Hora/Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10:00	20 °C	20 °C	17 °C	20 °C	17 °C	23 °C	20 °C	20 °C	20 °C	21 °C
10:30	30 °C	23 °C	29 °C	32 °C	26 °C	32 °C	26 °C	32 °C	35 °C	41 °C
11:00	32 °C	29 °C	31 °C	35 °C	29 °C	33 °C	27 °C	36 °C	38 °C	45 °C
11:30	33 °C	31 °C	33 °C	35 °C	32 °C	37 °C	30 °C	42 °C	42 °C	59 °C
12:00	36 °C	34 °C	36 °C	39 °C	40 °C	40 °C	35 °C	50 °C	49 °C	78 °C
12:30	37 °C	39 °C	41 °C	60 °C	45 °C	42 °C	35 °C	62 °C	53 °C	86 °C
13:00	37 °C	42 °C	44 °C	62 °C	48 °C	45 °C	36 °C	69 °C	58 °C	88 °C
13:30	39 °C	42 °C	45 °C	64 °C	51 °C	47 °C	37 °C	71 °C	65 °C	86 °C
14:00	39 °C	43 °C	47 °C	67 °C	54 °C	47 °C	40 °C	84 °C	69 °C	87 °C

Fuente: Datos experimentales de las muestras analizadas.

Anexo 2

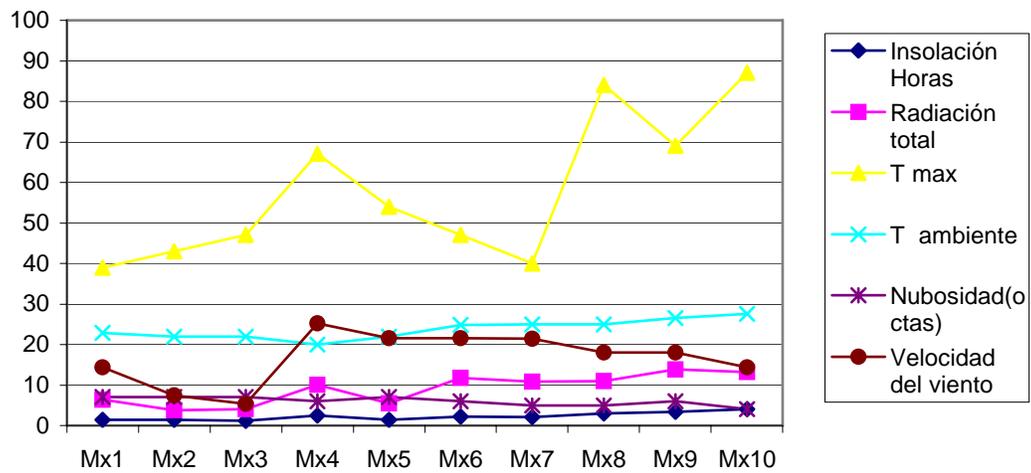
Radiación solar (Calorías/Cm²/min) durante el tratamiento del agua cruda de río de 10:00 a 14:00 horas (Mayo 2005).

No. MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HORA										
10:00	0.81	0.65	0.50	0.57	0.55	1.70	1.65	1.57	1.35	1.25
10:30	0.53	0.40	0.50	0.92	0.54	1.60	1.70	1.50	1.4	1.30
11:00	0.54	0.30	0.50	0.98	0.56	1.67	1.25	1.70	1.51	1.50
11:30	0.90	0.40	0.49	1.28	0.56	1.61	1.25	1.20	1.61	1.51
12:00	1.00	0.40	0.45	1.36	0.60	1.30	1.23	1.10	1.70	1.53
12:30	0.67	0.57	0.45	1.46	0.65	1.10	1.10	1.20	1.75	1.60
13:00	0.80	0.45	0.43	1.37	0.75	0.99	1.01	1.00	1.80	1.60
13:30	0.70	0.30	0.40	1.01	0.65	0.95	0.87	0.90	1.60	1.67
14:00	0.50	0.30	0.35	1.07	0.60	0.91	0.85	0.85	1.20	1.26
TOTAL	6.45	3.77	4.07	10.02	5.46	11.83	10.91	11.02	13.92	13.22

Fuente: Datos experimentales de las muestras analizadas.

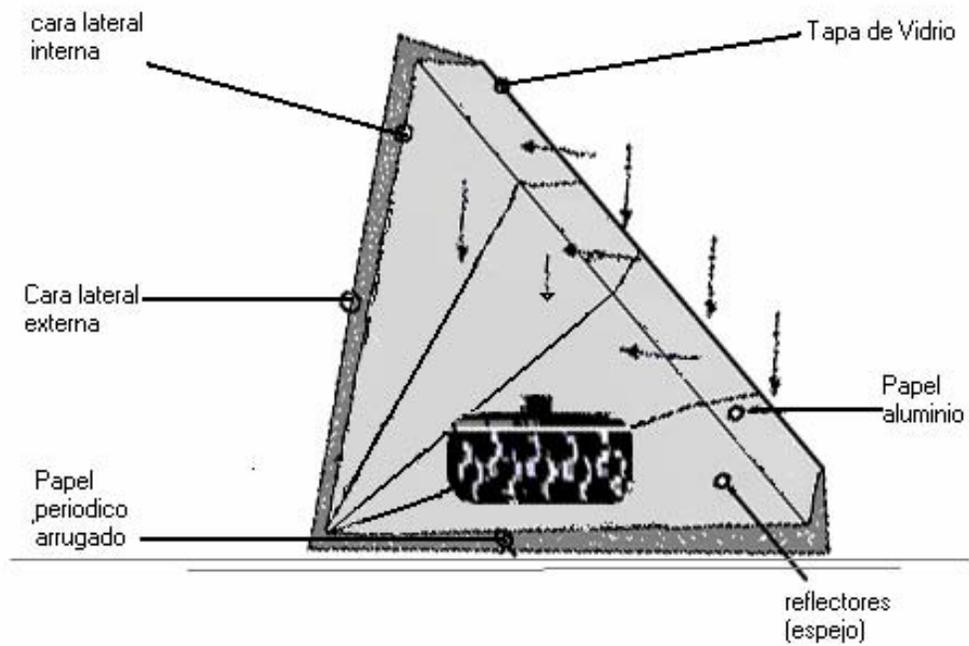
Anexo 3

Variables climatológicas (Mayo 2004) y temperaturas alcanzadas por el agua cruda de río dentro de la estufa solar.



Anexo 4

Posición de la Estufa Solar sobre la superficie del suelo durante el proceso de desinfección del agua destilada.



Anexo 5

Fotografías de la estufa solar diseñada.

