

01177



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y
DOCTORADO EN INGENIERIA

DESINFECCION DE AGUA DE CONSUMO
HUMANO EN COMUNIDADES
RURALES MEDIANTE RADIACIÓN
SOLAR

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(A M B I E N T A L)
P R E S E N T A:
JOSEFINA VERGARA SANCHEZ



DIRECTOR DE TESIS: M. en C. JUANA E. CORTES MUÑOZ

JIUTEPEC, MORELOS

MAYO, 2005

m343955



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

ENTREGA/RECEPCIÓN DE TESIS

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Recibí la notificación y el ejemplar de la tesis desarrollada por la alumna: **JOSEFINA VERGARA SANCHEZ**, para obtener el grado de MAESTRA EN INGENIERÍA en el campo del conocimiento **INGENIERIA AMBIENTAL**. En el entendido que de acuerdo a los artículos 55 y 66 de las Normas Operativas del Programa, cuento con un plazo no mayor de 20 días hábiles para revisar y señalar por escrito las observaciones y correcciones de carácter académico pertinentes, en caso de que las hubiera, así como 10 días hábiles posteriores a que el estudiante realice las mismas, para emitir mi Voto, ya sea positivo o negativo.

JURADO

		FIRMA	FECHA
PRESIDENTE	DR. GEORGINA FERNANEZ VILLAGOMEZ		13/04/05
VOCAL	M. EN C. JUAN E. CORTES MUÑOZ		13/04/05
SECRETARIO	DR. ERICK R. BANDALA GONZALEZ		14/04/05
SUPLENTE	M. EN C. CATALINA MAYA RENDON		13/04/05
SUPLENTE	M. EN C. MARISELA BERNAL GONZALEZ		13/04/05

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM por educarme y enseñarme los valores profesionales.

Al IMTA y al CIE por facilitarme sus instalaciones para realizar mi trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por otorgarme la beca para mis estudios de maestría.

Al Proyecto, Potabilizador solar para zonas rurales, convenio específico de colaboración IMTA-CIMAV de 2002.

Al M. en I. Arturo González H. por invertir su tiempo y sus conocimientos para poder realizar este trabajo.

Al Dr. Eric Bandala y a Manuel Sánchez por la orientación de las pruebas actinométricas

Al Ing. Oscar Gomezdaza por facilitarme el espectrofotómetro para realizar las mediciones de reflectancia.

Al Dr. Simón González por su ayuda incondicional en la parte administrativa de este trabajo.

Al jurado por sus valiosos comentarios para mejorar el escrito.

A mi familia por el apoyo brindado siempre.

A la persona que me ha apoyado incondicionalmente en todos estos años, Pedro G. Reyes Romero.

A Dios por darme la fuerza necesaria para enfrentar los momentos difíciles y regalarme cada mañana un día más de vida.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron al desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE

	Página
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	viii
Glosario	xi
Resumen	xiii
INTRODUCCIÓN	1
Problemática	3
Justificación	4
Objetivos	5
Hipótesis	6
CAPÍTULO I	
1. ANTECEDENTES	7
1.1. Experiencias sobre desinfección solar	7
1.1.1. SODIS (Solar Disinfection)	7
1.1.2. Experiencias en México	10
1.1.3. Otras experiencias	12
1.2. Materiales reflectantes	15
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Microbiología	19
2.1.1. Bacterias	20
2.2. Métodos de desinfección	21
2.2.1. Necesidad de la desinfección	21
2.2.2. Características deseables en un desinfectante de agua	23
2.2.3. Tipos de desinfectantes	24
2.3. Radiación	27
2.3.1. Fundamentos de radiación térmica	27
2.3.2. La luz	28
2.3.3. Reflexión y Refracción	30
2.3.4. Desinfección de agua por radiación UV	32
2.4. Estadística de prueba y decisión	35
CAPÍTULO III	
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	36
3.1. Metodología del trabajo	36

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	41
4.1.	Búsqueda de materiales reflectantes	41
4.2.	Determinación de la reflectancia de los materiales	43
4.2.1	Análisis estadístico de las reflectancias de los materiales	48
4.3.	Intemperización de los materiales	49
4.3.1.	Análisis estadístico de las reflectancias de los materiales seleccionados	57
4.4.	Construcción de los concentradores solares	58
4.5.	Prueba de Transmitancia	61
4.6.	Determinación de la radiación útil	62
4.7.	Pruebas de desinfección	73
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES	89
	ANEXO I	90
	ANEXO II	93
	A N E X O III	97
	REFERENCIAS	99

Índice de Figuras

Figura		Página
1	Desinfección por radiación solar	2
2	Concentrador solar	11
3	Espectro electromagnético	29
4	Leyes fundamentales de Reflexión	31
5	Reflexión en un espejo plano	31
6	Color amarillo-verdoso de la solución actinométrica en las botellas de prueba	39
7	Foto que muestra los materiales nuevos (no usados)	41
8 a	Gráfica de reflectancias de las láminas nuevas	45
8 b	Grafica de reflectancia de los plásticos metalizados	46
8 c	Grafica de reflectancias de los papeles de aluminio	47
9	Materiales expuestos a la intemperie (antes y despues)	51
10	Gráfica de reflectancias de los materiales seleccionados expuestos a la interperie 141 días	54
11	Gráfica de la reflectancia de los tres materiales seleccionados antes y después de la intemperización	57
12	Concentrador forrado de plástico metalizado	59
13	Concentrador forrado de cinta de aluminio	59
14	Concentrador forrado de papel aluminio	60
15	Concentrador de lámina galvanizada C-24	60
16	Gráfica de transmitancia de la botella de plástico utilizada en las pruebas actinométricas y bacteriológicas	62
17 a	Ángulo Cenit, inclinación, ángulo de la superficie azimutal y ángulo solar azimutal para una superficie inclinada.	67
17 b	Vista del plano observado por el ángulo solar azimutal.	67
18	Comparación de la radiación útil de la botella izquierda, utilizando cuatro tipos de materiales reflectantes	70

19	Radiación útil, utilizando el plástico metalizado en el concentrador	71
20	Radiación útil, utilizando la cinta de aluminio en el concentrador	72
21	Exposición del concentrador de cinta de aluminio con las tres botellas, en la prueba actinométrica	73
22	Coliformes totales registrados en la botella izquierda en tres concentradores diferentes	75
23	<i>E. coli</i> registrados en la botella izquierda en tres concentradores diferentes	75
24	Coliformes totales registrados en la botella central en tres concentradores diferentes	77
25	<i>E. coli</i> registrados en la botella central en tres concentradores diferentes	78
26	Prueba bacteriológica utilizando el concentrador con plástico metalizado	79
27	Botellas contenidas en el concentrador de plástico metalizado	79
28	Botellas contenidas en el concentrador de lámina galvanizada	80
29	Coliformes totales registrados en las botellas contenidas en el concentrador de cinta de aluminio	81
30	<i>E. coli</i> registrados en las botellas contenidas en el concentrador de cinta de aluminio	82
31	Prueba de desinfección solar utilizando el concentrador con cinta de aluminio	82
32	Botellas contenidas en el concentrador de cinta de aluminio	83
33	Comparación del plástico metalizado y la cinta de aluminio colocadas en el concentrador solar después de realizar las pruebas	83
34	Coliformes totales registrados en las botellas centrales en dos concentradores	85
35	<i>E. coli</i> registrados en las botellas centrales en dos concentradores	85

Índice de Tablas

Tabla		Página
1	Reflectancia de materiales	15
2	Agentes potencialmente infecciosos presentes en el agua que se transmiten por vía oral	22
3	Región espectral	32
4	Característica de los materiales nuevos antes de usar	42
5	Reflectancia de los materiales nuevos	44
6	Representación de las medias y varianzas de las reflectancia de los materiales nuevos	48
7	Observación de los materiales expuestos a la intemperie	50
8	Condiciones climáticas de los meses de prueba de ntemperización (promedios)	51
9	Reflectancia de los materiales seleccionados expuestos a la intemperie	53
10	Reflectancia de los tres mejores materiales seleccionados puestos a la intemperie	56
11	Resultados de la distribución t, comparando el papel aluminio nuevo con los demás materiales seleccionados	58
12	Transmitancia de la botella de plástico coca cola	61
13	Valores de la distribución espectral	64
14	Resultados de las radiaciones de entrada (F_e) y útil (F_{abs}) en las botellas puestas en los concentradores	69
15	Condiciones climáticas de los meses de prueba de ntemperización (promedio)	69
16	Comparación de la radiación útil de la botella izquierda, tilizando cuatro tipos de materiales reflectantes	70
17	Radiación útil, utilizando el plástico metalizado en el concentrador el día 18/01/02, (medio día solar 12:03 hrs.)	71

18	Radiación útil, utilizando la cinta de aluminio en el concentrador el día 2/04/02	72
19	Comportamiento de coliformes totales (NMP/100mL) en las botellas izquierdas con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía recibida el día 15/01/02	73
20	Comportamiento de <i>E. Coli</i> (NMP/mL) en las botellas izquierdas con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía recibida el día 15/01/02	74
21	Temperaturas (°C) alcanzadas en las botellas izquierdas en los diferentes concentradores el día 15/01/02	74
22	Comportamiento de coliformes totales (NMP/mL) en las botellas centrales con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía acumulada el día 15/01/02	76
23	Comportamiento de <i>E. coli</i> (NMP/mL) en las botellas centrales con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía recibida el día 15/01/02	76
24	Temperatura (°C) de las botellas centrales con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía acumulada el día 15/01/02	76
25	Comportamiento de coliformes totales (NMP/100mL) en las tres botellas del concentrador de cinta aluminio el día 27/05/02	80
26	Comportamiento de <i>E. coli</i> (NMP/100mL) en las tres botellas del concentrador de cinta aluminio el día 27/05/02	80
27	Temperaturas (°C) en las tres botellas del concentrador de cinta aluminio el día 27/05/02	81
28	Comportamiento de coliformes totales (NMP/100mL) en las botellas centrales con los dos mejores materiales seleccionados, el día 13/05/02	84
29	Comportamiento de <i>E. coli</i> (NMP/100mL) en las botellas centrales con los dos mejores materiales seleccionados, el día 13/05/02	84

30	Temperatura (°C) de las botellas centrales con los dos mejores materiales seleccionados, el día 13/05/02	84
31	Resumen de las pruebas realizadas a los cuatro materiales seleccionados	86

GLOSARIO

Actinometría	Sistema químico que realiza una reacción inducida por la luz de una determinada longitud de onda en la que se conoce el rendimiento cuántico o número de fotones por unidad de tiempo
ADN	Ácido desoxirribonucleico
Altitud	Altura de un punto respecto al nivel del mar
ARN	Ácido ribonucleico
CGiAB	Comisión para la Gestión integral del Agua en Bolivia
CIE	Centro de Investigación en Energía
CONAPO	Consejo Nacional de la Población
CNA	Comisión Nacional del Agua
EAWAG	Instituto Federal Suizo en Ciencia del Ambiente y Tecnología
eins	Es un mol de fotones (6.022×10^{23} fotones)
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Latitud	Distancia que hay desde un punto de la superficie terrestre al Ecuador, contada por los grados de su meridiano
Molaridad	Número de moles del soluto entre el número de litros de solución
nm	Nanómetro (1×10^9 metros)
NMP/100mL	Número Más Probable en 100 mL
Normalidad	Número de pesos equivalentes de soluto entre los litros de solución
OMS	Organización Mundial de Salud
OPS	Organización Panoamericana de Salud
PET	Tereftalato de polietileno
PVC	Cloruro de polivinilo
Radiación	Emisión continua de energía en forma de ondas electromagnéticas a nivel atómico; las cuales difieren en su longitud de onda
Radiación útil	(radiación absorbida F_{abs}) Cantidad de radiación absorbida por el actinómetro
Radiación entrante	(F_e) Radiación que entra al concentrador, medida por el actinómetro

Reflexión	Trayectoria de la luz que retorna al medio original después de que incide sobre una superficie lisa
Refracción	Trayectoria de la luz que cambia cuando entra en un medio transparente
RUV	Radiación Ultravioleta
SANDEC	Saneamiento para Países en Desarrollo
SODIS	Desinfección Solar
SSA	Secretaría de Salud
Tiempo solar	Tiempo basado en el movimiento angular del sol en el cielo, cuando el sol atraviesa el meridiano del observador
Transmitancia	Capacidad que tienen los rayos solares para atravesar un material, en diferentes longitudes de onda.
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
W/m^2	Watt por metro cuadrado
$W-h/m^2$	Watt – hora/ m^2

RESUMEN

El desarrollo de este trabajo está inspirado en la necesidad que existe por tener agua potable para el consumo humano en las diferentes comunidades rurales del país. Con tal propósito se construyó un concentrador solar de paredes planas, basado en trabajos previos realizados en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, así como en otros países, donde el objetivo principal fue probar el método de desinfección solar del agua de consumo humano, utilizando el concentrador solar de paredes planas mejorado aplicado a comunidades rurales. Para el aumento de eficiencia del concentrador se seleccionaron varios materiales reflectantes a los cuales se les midió el porcentaje de reflectancia inicial (materiales nuevos, sin usar), la intemperización (porcentaje de reflectancia después de la exposición a la intemperie); la radiación útil a los mejores materiales reflectantes (plástico metalizado, lámina galvanizada C-24, papel aluminio y cinta de aluminio) y por último las pruebas de desinfección (utilizando los materiales de la prueba de radiación útil). Finalmente se observó que el material adecuado para mejorar el concentrador solar de paredes planas fue la cinta de aluminio adherible, ya que es resistente a la intemperie y permite la mayor radiación útil dentro de las botellas ($F_{abs} = 0.0396$ eins), incrementando así la concentración de radiación que entra al concentrador hasta 2.25 veces respecto a la botella sin concentrador ($F_{abs} = 0.0176$ eins); logrando una desinfección de 4 a 5 unidades logarítmicas de coliformes totales y *E. coli* empleando de tres a cuatro horas de exposición a la radiación solar.

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la vida del hombre, pero puede ser también una fuente de transmisión de enfermedades hidrotansmisibles que pueden llevar a la muerte al ser humano, cuando el agua para beber está contaminada con microorganismos patógenos. Los principales afectados por este tipo de enfermedades, son aquellas personas de escasos recursos que viven en zonas rurales o marginadas, en donde no existe un tratamiento para el agua que consumen.

El agua potable es aquella que no contiene contaminantes químicos o agentes infecciosos y que, por lo tanto, no causa efectos nocivos para la salud. Cuando las fuentes de abastecimiento de agua no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994 modificada en el año 1999), es necesario un tratamiento de potabilización.

En la actualidad para asegurar un agua de aceptable calidad microbiológica se utilizan diversos métodos de desinfección, entre los que se encuentran: la cloración, ozonización, oxidantes mezclados, radiación ultravioleta, yodación, así como la aplicación de: bromo, iones metálicos (oro, plata, mercurio y cobre), calor, radiación gamma y rayos X y la luz solar (OPS/OMS, 1995). Sin embargo, la mayoría de estos métodos no son apropiados para comunidades rurales, ya que son costosos en infraestructura y mantenimiento.

En México se estima que la cobertura de agua potable, a diciembre del 2002, fue del 89.2% y que el 94.6% del agua abastecida está clorada (CNA, 2002). Sin embargo, en las zonas rurales gran parte de la población consume agua no desinfectada debido a uno o varios factores: no hay un abasto continuo de productos de cloro, la población rechaza el agua clorada por su mal sabor, no hierve el agua por el alto consumo de leña o por su escasez, o desconocen los métodos de desinfección (Martín *et al.*, 1999).

Debido a esta situación, para mejorar la calidad del agua de consumo, la desinfección por radiación solar constituye una alternativa económica y fácil de implementar a escala doméstica, ya que su aplicación permite la inactivación de las bacterias indicadoras (coliformes totales y coliformes fecales) (Figura 1) (Arafa y Cotis, 1988).



Figura 1. Desinfección por radiación solar

Para la desinfección del agua mediante éste método, se utilizan botellas de plástico transparentes de dos litros de capacidad, expuestas a la radiación solar en un intervalo de cinco a seis horas. Esta tecnología, bajo el nombre de SODIS (SOLar DISinfection), se ha aplicado desde 1984 en países en desarrollo en donde todavía miles de personas carecen de agua segura para beber (Wegelin *et al.*, 1997).

Con el propósito de mejorar la desinfección solar, el Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA) desarrolló y validó un concentrador solar de paredes planas para aumentar la cantidad de radiación solar que llega a las botellas con agua. Así, con un diseño sencillo y práctico que permitiera la implementación en comunidades de bajos recursos, se logró disminuir el tiempo de exposición y con ello una rápida desinfección, (Martín *et al.*, 1999). Con el objeto de mejorar la eficiencia del concentrador el presente trabajo plantea llevar a cabo las siguientes actividades; a) optimizar el concentrador de paredes planas probando diferentes materiales reflectantes o reflejantes, b) seleccionar los materiales reflectantes en centros papeleros, tiendas y centros comerciales, c) en laboratorio realizar las pruebas de reflectancia seleccionando los materiales con mayor capacidad reflectante antes y después de la exposición a la radiación solar o a la intemperie, d) seleccionados los materiales,

realizar las pruebas actinométricas para medir la radiación útil dentro de las botellas y así conocer la capacidad real de concentración del dispositivo y e) llevar a cabo las pruebas de desinfección con los concentradores solares utilizados en las pruebas actinométricas, para conocer los tiempos mínimos de exposición a la radiación solar y el grado de eficiencia en la inactivación de coliformes totales y *Escherichia coli*.

Problemática

El sector poblacional más afectado por enfermedades ocasionadas por agentes infecciosos potencialmente hidrotransmisibles es el rural, integrado por aquellas localidades de menos de 2,500 habitantes en donde viven aproximadamente 25 millones de la población mexicana. De esta, solamente el 69.5% cuenta con servicio de agua entubada dentro de la vivienda (CONAPO, 2004). Los padecimientos gastrointestinales más frecuentes (de la población en general) son: el cólera, enfermedades diarreicas agudas, fiebre tifoidea, shigelosis, paratifoidea y otras salmonelosis. Para evitar este tipo de enfermedades y asegurar la calidad bacteriológica del agua, existen diversos métodos de desinfección disponibles (cloro, yodo, radiación ultravioleta, ebullición, entre otros).

Problemática del agua y la salud

1. Alto nivel de incidencia de enfermedades gastrointestinales o infecciosas intestinales. En México en el año 2003 se registraron 5, 540, 579 individuos que contrajeron enfermedades infecciosas intestinales de las cuales un 72.4% representan enfermedades transmitidas por el agua (Boletín Epidemiológico SSA, 2003).
2. La población más vulnerable es la rural y la urbana marginada por carecer de sistemas formales de abastecimiento y potabilización de agua. En México hay casi 25 millones de habitantes en zonas rurales, de los cuales el 30.5% no disponen de agua entubada en el interior de la vivienda (CONAPO, 2004).
3. Rechazo de la población a la cloración y ebullición y desconocimiento de la relación agua-salud. (Martín *et al.*, 1999).

Justificación

La desinfección del agua por exposición a la radiación solar o fotodesinfección es una alternativa para las poblaciones que no cuentan con sistemas de abastecimiento y desinfecciones formales y que rechazan el uso del cloro o la ebullición para la desinfección del agua.

La energía solar es una técnica eficiente para inactivar los microorganismos patógenos (*Shigella* sp., *Salmonella typhi*, *Vibro cholerae*, etc.) causantes de enfermedades infecciosas de origen hídrico (Enriquez de Madrid *et al.*, 1995; SANDEC, 2002), la cual desinfecta pequeñas cantidades de agua para consumo humano a escala doméstica con cinco horas de exposición en días soleados (Wegelin *et al.*, 1999). Este proceso depende únicamente de la energía solar, siendo éste la principal ventaja, además de que:

- No altera el olor ni el sabor del agua
- No depende de reactivos químicos o combustibles
- La botella de plástico transparente es reciclable, con una capacidad de dos litros
- Es una tecnología eficaz, simple y de bajo costo.

En un trabajo previo realizado por Martín y colaboradores (2000) se determinó que la energía solar que deben recibir las botellas, para una desinfección adecuada del agua debe ser superior a los 3200 W-h/m² (Martín *et al.*, 2000).

Para mejorar la eficiencia de los SODIS en zonas con mucha nubosidad, en el IMTA (Martín *et al.*, 1999) se desarrolló y probó un concentrador solar de paredes planas, el cual tiene las siguientes características: una base de madera de 55 cm x 55 cm y cuatro caras de madera de 35 cm x 35 cm cada una, en donde se coloca el material reflectante (papel aluminio), estas caras están dispuestas a un ángulo de 30° respecto a la vertical. El dispositivo demostró ser eficiente en la inactivación de coliformes totales y *E. coli* reduciendo el tiempo de exposición (en caso de no usar el concentrador) de seis a cuatro horas. El agua utilizada fue del clarificador de la planta de tratamiento residual del IMTA que tiene una turbiedad alrededor de 2 UNT. Además es económico, de fácil manejo y se puede construir por los usuarios con materiales comunes.

El colector solar ha sido validado técnica y socialmente en comunidades rurales de Chiapas y Oaxaca, donde demostró eficacia y aceptación por los usuarios (Martín *et al.*, 2000).

Sin embargo, resulta necesario seleccionar un material reflectante de mayor resistencia al que se utilizó, ya que de acuerdo con la experiencia obtenida por el IMTA durante el proyecto de validación, se llegó a la conclusión que uno de los factores críticos para lograr el buen uso de la tecnología es la resistencia y durabilidad del material reflejante (papel aluminio).

Los criterios para la búsqueda del material reflejante fueron: un material capaz de reflejar la mayor cantidad de radiación, económico, fácil de manejar, ligero, resistente y disponible en el mercado.

La calidad del agua para consumo humano en comunidades rurales es un problema de cultura y salud que se puede solucionar con la tecnología de desinfección solar. En las zonas del trópico, la intensidad de radiación y la cantidad de días soleados que se tienen durante el año es suficiente para permitir que dicho dispositivo opere con una mayor eficiencia, un menor costo y durabilidad (SANDEC, 2002). Las regiones del mundo más favorables para la desinfección solar están localizadas entre las latitudes 15° N y 35° N (de igual modo 15° S y 35° S), México se encuentra entre los meridianos 14° y 33° de latitud norte, con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio (SANDEC, 2000).

Objetivos

Con el propósito de mejorar la desinfección del agua mediante radiación solar, usando un concentrador de paredes planas, se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo General

- 1) Probar el método de desinfección solar del agua de consumo humano utilizando un concentrador de paredes planas mejorado aplicable a comunidades rurales

Objetivos particulares

- 2) Seleccionar materiales altamente reflectantes, considerando su bajo costo, fácil adquisición y alta resistencia a la intemperie.
- 3) Construir y mantener el concentrador solar de paredes planas, considerando los materiales disponibles para que permita al usuario operarlo adecuadamente.
- 4) Medir la radiación útil dentro de las botellas y determinar la capacidad de concentración del concentrador solar.
- 5) Determinar los tiempos mínimos de exposición del agua a la radiación solar hasta la inactivación de las bacterias indicadoras de la calidad bacteriológica del agua, utilizando los mejores materiales reflectantes.

Hipótesis

Considerando que el uso de la radiación solar es factible para desinfectar agua de consumo humano y que los concentradores de paredes planas mejoran el método, el nuevo material reflectante seleccionado es el más resistente a la intemperie, de fácil manejo, igual o mejor eficiencia de reflectancia de los rayos solares en comparación con el papel aluminio utilizado en estudios anteriores. Así mismo este material aumenta la radiación y reduce el tiempo de exposición al sol de las botellas. De esta forma, se asegura que la inactivación de los microorganismos presentes en el agua tratada sea la adecuada para el consumo humano.

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

1.1. Experiencias sobre desinfección solar

En el presente capítulo se indican algunas de las principales experiencias en países como Suiza, México, Colombia, Bolivia, Brasil, África y Estados Unidos con respecto a la desinfección de agua utilizando la radiación solar.

1.1.1. SODIS (Solar Disinfection)

El Departamento de Agua y Saneamiento en Países en Desarrollo (SANDEC) del Instituto Federal Suizo para Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente (EAWAG), en cooperación con países en vías de desarrollo, desarrollaron el proyecto SODIS (Solar Disinfection) que es una opción de desinfección de agua por radiación solar. Este proyecto ha sido cofinanciado sustancialmente por la Agencia Suiza para Desarrollo y Cooperación (SDC).

Mediante extensas pruebas de laboratorio y campo, utilizando bolsas y botellas de plástico con agua expuestas a la radiación solar, la eficiencia del método en la inactivación de bacterias y virus presentes en el agua quedó demostrada, desde 1991 por SANDEC. Además, las experiencias realizadas en Colombia por EAWAG/SANDEC muestran evidencias positivas de la inactivación de la bacteria del cólera (*Vibrio cholerae*). SODIS ha sido aplicado en China, Tailandia, Tago, Burkina Faso, Colombia, Bangladesh y el sur de África (SANDEC, 1998).

Las poblaciones de Sacabamba y Yunkhataqui en Bolivia (1996), con apoyo del Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Mayor de San Simón fueron las pioneras en usar el método de desinfección solar del agua. A partir de entonces, su uso se difundió rápidamente y actualmente más de 300 familias de siete departamentos bolivianos potabilizan el agua con energía solar (CGiAB, 2000).

Sin embargo para que dicha técnica funcione adecuadamente (SANDEC, 1999):

- Requiere de condiciones climáticas favorables, tales como irradiación solar y temperaturas preferiblemente no inferiores a 500 W/m^2 y 20°C , respectivamente
- Debe ser aplicado a agua no desinfectada de baja turbiedad, menor a 30 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad)
- Se basa en el uso de botellas plásticas adecuadas
- Se requieren de cinco a seis horas de exposición en días soleados o parcialmente nublados
- Ha sido probado para la inactivación de bacterias y virus, pero, sin embargo, su eficiencia en destruir quistes de parásitos aún es desconocida
- Transfiere el problema del tratamiento desde los sistemas centralizados hacia los hogares individuales donde el comportamiento cotidiano es frecuentemente el más difícil de cambiar
- Requiere de la aceptación de los usuarios, la cual también está influida por su entorno socio-cultural
- Al ser una alternativa a hervir el agua, posiblemente no sea aceptada fácilmente por las autoridades de salud pública

Los participantes de la Conferencia Internacional organizada por SANDEC, en el año 2000, han revisado y discutido SODIS aceptando que es un proceso potencial de tratamiento de agua.

Entre las principales conclusiones derivadas de la conferencia, se pueden mencionar las siguientes:

- ✓ SODIS es un procedimiento sencillo de tratamiento de agua para mejorar la calidad microbiológica del agua para beber
- ✓ La aplicación de SODIS es sencilla y en consecuencia, apta para uso doméstico
- ✓ SODIS reduce el riesgo de recontaminación puesto que el agua es tratada y almacenada en el mismo recipiente cerrado hasta su uso
- ✓ SODIS no requiere de la adición de sustancias químicas y consecuentemente no afecta el sabor o el olor del agua

- ✓ SODIS es una tecnología apropiada para comunidades rurales puesto que los costos de inversión son bajos y los de operación son despreciables
- ✓ SODIS es una tecnología ambientalmente sana, pues reduce la demanda de leña y carbón, reduciendo así la tasa de deforestación.

Wegelin y colaboradores han realizado una comparación de los materiales utilizados en SODIS, debido a la posible degradación de éstos al exponerlos al sol, así como la contaminación del agua a la que se desinfecta (Wegelin *et al.*, 2000).

Las botellas de plástico están hechas de PET (tereftalato de polietileno) o PVC (cloruro de polivinilo), ambos materiales contienen aditivos para incrementar su estabilidad y protegerlos de la oxidación y radiación ultravioleta (UV). El uso de botellas hechas de PET es recomendada ya que contiene menos aditivos que las botellas hechas de PVC (SANDEC, 2002).

Las botellas hechas de vidrio con bajo contenido de hierro transmiten significativamente más luz-UV, pero a comparación de las de plástico son más pesadas y costosas, en tanto que las de PET son de bajo peso, no quebradizas, transparentes y químicamente estables.

Pruebas de laboratorio y de campo realizados en Alemania y Malasia, indican que los fotoproductos de las botellas de PET se generan fuera de la superficie de las mismas. Por lo que la calidad del agua almacenada en botellas, con respecto a la concentración de aldehídos, fotoproductos orgánicos, aditivos y ftalatos no cambia con la fotoquímica. Además, las concentraciones de estos productos fueron inferiores a los límites de agua segura para beber. Por lo tanto, las botellas de PET resultaron ser prácticas y convenientes para el método SODIS (Wegelin *et al.*, 2000).

Para evaluar la eficiencia en SODIS para la inactivación de bacterias, se desarrolló, en Haití, un modelo matemático donde se necesitan de tres a cinco horas de radiación solar alrededor de 500 W/m^2 . Este modelo matemático se basa en una medición satelital de energías diarias, simuladas mensualmente, calculando la media, mínima y máxima en un promedio de cinco horas de máxima radiación solar. Para evaluar el modelo y las pruebas de eficiencia de SODIS como un tratamiento, las mediciones en campo se realizaron durante el mes de enero del año 2001. Comparando la energía total acumulada medida en

un día cualquiera con la calculada con el modelo, hay una conformidad del 99%. Los datos del satélite de la NASA fueron usados para simular la media, mínima y máxima de promedio de intensidad en cinco horas (ya que Haití tiene una máxima intensidad en el mes de enero), las cuales estaban dentro del 98.5%, 62.5% y 86.0% de conformidad con los valores medidos, respectivamente. El modelo simulado sugiere que SODIS podría ser efectivo todo el año en Haití por la radiación solar disponible. La eficiencia de SODIS en enero fue probada con la inactivación de coliformes totales, *E. coli* y bacterias que producen sulfuro de hidrógeno (H_2S). En un día de exposición se logró la inactivación bacteriana completa en la mitad del tiempo de prueba y en dos días de exposición la inactivación microbiana fue del 100%. (Oates *et al.*, 2003).

1.1.2. Experiencias en México

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) que se encuentra en Jiutepec, Mor., ha realizado diversos estudios sobre desinfección solar para validar el método y adaptarlo a zonas del país con diferentes condiciones climáticas e intensidades de radiación solar. Se desarrolló en colaboración con el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, un concentrador solar de paredes planas de fácil construcción y bajo costo (Cortés, 1999), (Martín *et al.*, 1999), (Martín *et al.*, 2000). Los experimentos que se realizaron se llevaron a cabo en días soleados y con nubes, utilizando dos tipos de recipientes (bolsas y botellas de plástico, ambas con capacidad de dos litros), color del fondo de la superficie de exposición (negro o plateado), con efluente de la planta del IMTA con turbiedad de 1.85 UNT y 540 UNT (provocada con caolín), y una concentración de 3×10^5 NMP/100mL de coniformes totales; tomando muestras cada dos horas en un tiempo de exposición total de seis horas. Los resultados mostraron que la turbiedad disminuye la eficiencia de la inactivación de coliformes totales, pero no la inhibe, al menos con turbiedades provocadas con caolín. Utilizando botellas de plástico, se requieren seis horas de exposición en días con niveles de radiación promedio arriba de los 500 W/m^2 para asegurar la desinfección del agua tratada. Esto limita su uso, porque no se puede asegurar la completa inactivación de las bacterias en días con niveles de radiación menores. Las botellas presentan la ventaja de ser un recipiente

para el agua, y al mismo tiempo exponerla al sol, también facilitar su manejo conservando su calidad después de la desinfección, y son fáciles de adquirir por los habitantes de las comunidades rurales. Las bolsas de plástico requieren un menor tiempo de exposición, pero su manipulación es delicada, ya que se rompen con facilidad.

La temperatura influye significativamente en la inactivación de coliformes totales cuando está alrededor de 45°C, pero el factor principal es la radiación ultravioleta (UV) del sol, cuando la exposición es directa (Martín *et al.*, 1999). Por ello, resulta de vital importancia favorecer la irradiación colocando las bolsas o botellas sobre un fondo plateado, que sobre un fondo negro, aunque esto último aumente la temperatura por absorción del calor.

El uso de un concentrador solar, como el que se muestra en la figura 2, al quedar orientado de tal forma que dos aletas sean perpendiculares al movimiento aparente del sol durante el día, y el fondo se incline para quedar normal a los rayos del medio día solar, con el fin de captar la mayor cantidad de radiación en las botellas, asegura una reducción de hasta cinco unidades logarítmicas de coliformes totales NMP/100 mL, en cuatro horas de exposición. Si se utilizan botellas pintadas a la mitad de negro, el tiempo de exposición puede reducirse hasta cuatro horas.



Figura 2. Concentrador solar

La radiación solar permite inactivar de forma efectiva *Vibro cholerae* con dos o tres horas de exposición en botellas transparentes sin necesidad de utilizar los concentradores (Martín *et al.*, 1999). Sin embargo, se recomienda el uso de éstos para aumentar el nivel de confianza cuando los días presentan nubosidad.

Dos aspectos importantes de la desinfección solar, utilizando el concentrador solar, son los siguientes:

- ◆ Tiene limitada capacidad de producción: de seis litros de agua por día
- ◆ Requiere de una adecuada transferencia y capacitación de los usuarios

Una desinfección inapropiada puede dar lugar al recrecimiento de bacterias. Este caso podría darse en sitios con alta nubosidad, por lo que se aconseja exponer el agua durante dos días seguidos para asegurar una desinfección completa (Martín *et al.*, 1999). Para que esta técnica de desinfección solar sea apropiada para la comunidad, se recomienda que esté siempre acompañada de una campaña de educación y de saneamiento (Martín *et al.*, 1999).

1.1.3. Otras experiencias

En Colombia se realizó un estudio para inactivar *Vibrio cholerae* en agua para consumo humano, usando radiación solar ultravioleta (UV-A que tiene un intervalo de 320-400 nm) y temperatura; inoculando *Vibrio cholerae* en botellas de vidrio, botellas de plástico y bolsas plásticas que contenían agua cruda (40 UNT), prefiltrada (23 UNT) y agua filtrada (5 UNT); se expusieron al sol durante seis horas y se midió la temperatura y la radiación UV-A. Al alcanzar un intervalo de temperatura de 30-45°C se tomaron muestras para determinar el nivel de los *vibrios* y de los coliformes termotolerantes. Se determinaron los impactos de temperatura, turbiedad, recipiente y concentración de los *vibrios*. A estas bacterias se les inactivó al alcanzar gradualmente una temperatura de 45°C en un tiempo de seis horas de exposición al sol; con temperatura constante de 30°C se necesitaron 100 W-h/m²; y con 50°C sólo 10 W-h/m². La turbiedad es un factor que interfiere con el proceso de SODIS; con 40 UNT se necesitaron 105 W-h/m², con 23 UNT, 91 W-h/m² y con 5 UNT, 36 W-h/m² de UV-A para lograr 100% de mortalidad de microorganismos. No se encontraron diferencias con el tipo de recipiente utilizado, siempre se obtuvo un 100% de inactivación; tampoco se observaron diferencias en la inactivación con diferentes concentraciones del *V. cholerae* (Solarte *et al.*, 1997).

En Maasai (pueblo de África Oriental) se realizó un estudio con 206 niños de 5 a 16 años. A cada niño se le proporcionó una botella con agua no desinfectada. Se dividieron los niños en dos grupos, uno que exponía las botellas llenas a la luz solar en el techo de la choza (grupo solar) y otro que conservara las botellas llenas dentro de la casa en la sombra (grupo control). Los resultados de este experimento fueron los siguientes, de los 108 niños del grupo solar, las diarreas reportadas fueron 439 durante un período de 12 semanas que fue el tiempo del experimento. En el grupo control (98 niños), se reportaron diarreas durante 444 veces en un período de dos semanas únicamente. En el caso de diarreas severas, el grupo solar reportó 186 casos y 222 casos en el grupo de control. Los resultados sugieren que la desinfección solar del agua para beber, puede reducir la morbilidad significativamente en comunidades que no tienen otro principio de desinfección, por la falta de recursos o eventos de un desastre natural (Conroy *et al.*, 1996).

En la región Centro-Oeste de Brasil se llevó a cabo un estudio utilizando radiación solar como agente desinfectante, considerando diferentes calidades de agua (color y turbidez), indicadores microbiológicos, tiempo de exposición necesario para la inactivación de patógenos, espesor de lámina de agua y volúmenes de tres a seis litros. Se observó que la desinfección solar fue capaz de promover una completa inactivación de *E. coli* (10^5 NMP/100mL) y coliformes fecales (10^3 NMP/100mL) en recipientes de 5 cm de lámina de agua, en tiempos de exposición al sol del orden de tres horas, en un día parcialmente nublado, mientras que en recipientes de 10 cm la inactivación se llevó a cabo en cinco horas. Si la turbiedad y el color aumentan, la inactivación de las bacterias disminuye.

Como se deduce de estos resultados, la profundidad de la lámina de agua en un recipiente influye sobre los tiempos necesarios para completar la inactivación de los organismos patógenos (Silveira *et al.*, 2000).

Otro estudio, realizado para validar la desinfección por radiación solar, se llevó a cabo utilizando tres muestras, agua no desinfectada de un perímetro urbano (muestra tipo R); efluente de un pulimento final de un Estanque de tratamiento de aguas residuales (ETE) diluido en agua embotellada (muestra tipo EP) y efluente de dos decantadores secundarios de una ETE diluido en agua embotellada (muestra tipo ED). Las muestras fueron colocadas en sacos transparentes de 30 cm x 40 cm, con volumen de un litro. En cada batería se

utilizaron diez alícuotas idénticas de muestras, donde seis fueron expuestas directamente al sol, sobre una placa de madera cubierta con una lona obscura y cuatro fueron aisladas en una incubadora de DBO a una temperatura constante de 24°C. Los tiempos de ensayo fueron de 9:00 a 16:00 horas, se tomaron alícuotas en los tiempos cero, media hora, 1 hora, 2 horas, 4 horas y 6 horas. Las variables climáticas fueron dadas por la Universidad de Brasilia y el Instituto Nacional de Meteorología en Cruzeiro Brasil. Los resultados obtenidos de la muestra tipo EP reportaron valores de turbidez alrededor de cero, pH próximo de 6.3, y temperatura máxima de 50°C, presentando un mejor comportamiento en la curva de decaimiento de coliformes. La muestra ED presentó una turbidez en torno de 18 NTU, pH de 6.7 y una temperatura máxima de 47°C, la presencia de coliformes es elevada pero a temperaturas superiores a los 40°C inició su decaimiento. En la muestra tipo R, la turbidez estuvo alrededor de 4.8 NTU, pH de 6.4 y una temperatura máxima de 67°C en exposición solar, presentando un decaimiento de coliformes que puede ser considerado excelente. En conclusión, las muestras con mayor turbidez tienen menor eficiencia en la desinfección solar, esta desinfección puede ser válida en localidades con altos índices de radiación solar. La desinfección solar de agua puede ser empleada principalmente en comunidades donde no existe tratamiento alguno de agua y en donde sean común los problemas de cólera y diarreas (Campos *et al.*, 2001).

La actividad bactericida de la fotocátalisis con TiO₂ en medios acuosos es una alternativa en la asistencia solar para el sistema de desinfección del agua. Se ha demostrado que la irradiación de *Escherichia coli* en suspensión ($\sim 10^6$ células/mL) y TiO₂ con luz UV-visible (longitudes de ondas mayores a 380 nm) la bacteria muere en minutos. Este método es considerado una alternativa viable para la cloración. (Wel *et al.*, 1994).

1.2. Materiales reflectantes

Para acelerar la desinfección solar en las botellas contenidas en el concentrador solar, se han buscado materiales que ayuden a reflejar la mayor cantidad de radiación que llega al concentrador de paredes planas. Para esta búsqueda se tienen como referencia diversos materiales utilizados para la construcción de cocinas solares.

Para su evaluación se realizó un estudio comparativo de las características de reflectancia espectral de algunos materiales que habitualmente se emplean en equipos de aprovechamiento de energía solar, especialmente en concentradores de cocinas solares. (Echazú *et al.*, 2000).

La reflectividad global (reflectividad espectral y reflectividad difusa) se midió con un espectrómetro (LI-1800) en un intervalo de 400 a 1100 nm. Para la medición de reflectividad espectral se usó un pirheliómetro LI-250 como receptor. A continuación se muestran valores de algunas muestras de materiales:

Tabla 1. Reflectancia de materiales (Echazú *et al.*, 2000)

Material	Reflectividad global (%)
PVC blanco	0.871
Aluminio de alta reflectividad (rosado)	0.853
Aluminio de alta reflectividad (verde)	0.839
Mylar (Cuba)	0.833
Aluminio de alta reflectividad (celeste)	0.820
Papel de aluminio (Cuba)	0.799
Espejo de vidrio de 2 mm	0.795
Espejo de vidrio de 3 mm	0.754
Chapadura prepintado blanco	0.741
Espejo de vidrio de 4 mm	0.712
Fibra de vidrio pintada de blanco	0.709
Chapa pintada de blanco envejecida	0.656
Chapa galvanizada	0.588
Chapa pintada de blanco nueva	0.582
Acero inoxidable	0.572

Con base en los datos de la tabla 1, se observa que los aluminios especiales son los materiales más apropiados para usar en las aplicaciones que requieren un buen índice de reflexión, montaje liviano y costo moderado. En el caso del PVC blanco su textura es muy rugosa, por lo que no es conveniente su utilización.

Es importante mencionar que el acero inoxidable aumenta su reflectividad al incrementar la longitud de onda, caso contrario con la chapa galvanizada. Por acción de la intemperie el galvanizado disminuye su reflectividad con el paso del tiempo, a diferencia del acero inoxidable que la mantiene.

En la elaboración de cocinas solares se continúa investigando la eficiencia de diferentes materiales reflectores disponibles en el medio para asegurar y aumentar su eficiencia. Por ejemplo, en Buenos Aires, Argentina se estudiaron los parámetros que afectan las cocinas solares, los ensayos se realizaron en la provincia de Salta que cuenta con buena radiación a una latitud de 24.7° S y una altura sobre el nivel del mar de 1192 m. Las mediciones se efectuaron en: diciembre 1999, febrero 2000, junio 2000 y agosto 2000, para cubrir el intervalo de radiación disponible y las variedad de condiciones del cielo (despejado y parcialmente nublado).

Los materiales reflectores a estudiar fueron:

- Placa de aluminio de alta reflectividad
- Placa de acero inoxidable
- Plástico aluminizado
- Papel de aluminio
- Espejos de vidrio (2, 3 y 4 mm de espesor)

Como parte de los estudios realizados a las cocinas solares, se hicieron pruebas acerca de las propiedades ópticas de los materiales usados en ellas, específicamente su reflectividad espectral, mediante el uso del Espectro Radiómetro LICOR 1800 (Saravia y Suarez, 2000). En la medición de estas propiedades se observó una distribución variable en el espectro, siendo los materiales aluminizados los de mayor valor de reflectividad, en donde para una longitud de onda entre 400 nm y 1050 nm se tienen valores de 0.86 a 0.9 de reflectividad y el valor mínimo corresponde a una longitud de onda de aproximadamente 840 nm; con respecto a la reflectividad del acero inoxidable para una longitud de onda de 400 nm la reflectividad es de 0.51 y aumenta a 0.64 para 1050 nm.

Este análisis es un antecedente de algunos materiales aluminizados, para captar y reflejar la mayor cantidad de radiación solar, ya que para nuestro estudio el intervalo de UV es cercano a 400 nm, utilizando en el método de desinfección solar.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

El agua que abastece a gran parte de las localidades se obtiene de fuentes superficiales, como arroyos, ríos y lagos. Este tipo de fuentes naturales, se contaminan con desechos domésticos e industriales, como lo son las aguas residuales. Al mismo tiempo, por el crecimiento de las poblaciones, los problemas de contaminación se han agudizado, cada vez se necesita mayor cantidad de agua y la usada debe ser desechada, generalmente regresándola a un cuerpo de agua que a su vez es fuente de abastecimiento de otra comunidad. Los sistemas municipales de purificación han sido diseñados para proteger a los habitantes contra la contaminación del agua. Puesto que el agua es portadora de microorganismos patógenos, puede poner en peligro la salud y la vida de los habitantes.

Los microorganismos patógenos que llegan a las fuentes de agua, proceden de las heces fecales de hombres y de los animales infectados. Ciertas especies de bacterias, particularmente *Escherichia coli*, y varios microorganismos similares, denominados coliformes, estreptococos fecales (como *Streptococcus faecalis*) y *Clostridium perfringens*, son habitantes normales del intestino grueso de hombres y animales de sangre caliente y en consecuencia siempre están en la materia fecal, por lo que la presencia de cualquiera de estas especies en el agua es evidencia de contaminación ambiental (Pelczar *et al.*, 1991).

Según la Norma Oficial Mexicana “NOM 127-SSA1-1994 modificada en el año 1999, Salud Ambiental, agua para uso humano – límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización”, el agua para uso y consumo humano no debe contener contaminantes físicos, químicos o agentes infecciosos que afecten a la salud humana.

Los requerimientos básicos del agua potable son las siguientes:

- Libre de microorganismos patógenos (causantes de enfermedades como las diarreas)
- No debe contener sustancias que den un efecto adverso a la salud, ya sea agudo o a largo plazo

- No ser salina
- Sin compuestos que proporcionen olor o sabor ofensivo
- No debe causar corrosión o incrustaciones en el sistema de abastecimiento o manchas en la ropa lavada
- El contenido de organismos resultantes del examen de una muestra simple de agua, no debe contener *E. coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes en ninguna muestra de 100 mL. Los organismos coliformes totales no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 mL.
- Las características físicas y organolépticas deberán ser las siguientes:

Características	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptará aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

En caso de que el sistema de abastecimiento utilice métodos que no incluyan cloro o sus derivados, para la desinfección de agua, la autoridad sanitaria determinará los casos en que adicionalmente deberá dosificarse cloro al agua distribuida, para mantener la concentración de cloro residual libre dentro de los límites permisibles (0.2-1.50 mg/L).

2.1. Microbiología

Los microorganismos son encontrados en el agua, en el suelo y en el aire. La cantidad de ellos, depende de una serie de factores como: humedad, temperatura y también la biodisponibilidad de nutrientes que les permita sobrevivir (López, 1990).

Las enfermedades infecciosas causadas por bacterias, virus o protozoarios patógenos o por parásitos constituyen riesgos de los mayores para la salud que conlleva consigo el agua de consumo humano (OMS, 1995). Estas enfermedades se transmiten principalmente a través de las excretas de seres humanos y animales, en particular de las heces. La contaminación fecal de fuentes de agua hará que el uso del agua para beber, preparar alimentos y su contacto directo durante el baño o el lavado de ropa puedan producir un tipo de infección. Algunas de las enfermedades que pueden ser causadas por beber agua contaminada son: cólera, hepatitis infecciosa, poliomielitis, fiebre tifoidea y paratifoidea, amibiasis, enteritis y diarreas (Pelczar *et al.*, 1991; OPS/OMS, 1995). Las bacterias patógenas que pueden estar presentes en el agua son, entre otras: *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli* patógeno, *Salmonella typhi* y *Vibro cholerae*. Los virus son: enterovirus, Hepatitis A, Rotavirus y virus de Norwalk. Protozoarios: *Entamoeba histolytica*, *Giardia intestinalis* y *Cryptosporidium parvum*. (OMS, 1995).

2.1.1. Bacterias

Grupo coliforme

Este grupo de bacterias comprende todos los bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gram negativos, no esporulados que producen ácido y gas al fermentar la lactosa. Las especies que conforman este grupo son *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* y algunas cepas de *Klebsiella pneumoniae* y especies lactosa positivas de otros géneros. Dentro del grupo coliforme se encuentran los coliformes fecales que representan a las bacterias presentes en intestinos y materia fecal del hombre y animales de sangre caliente (coliformes termotolerantes), por lo que son adecuadas como indicadores ya que proporcionan información importante sobre el origen y el tipo de contaminación (Pelczar *et al.*, 1991).

Las ventajas que presenta éste grupo como indicador de contaminación son (Jiménez, 2001):

- El 95% de los coliformes fecales resultan más en la prueba de temperatura
- Pueden estar ausentes si la contaminación no es de origen fecal
- Sobreviven menos tiempo que los coliformes totales, por lo que si se encuentran en concentraciones altas, hace suponer contaminación reciente

- Requieren de más condiciones que los coliformes totales para reproducirse en el ambiente extraintestinal
- Los procedimientos de laboratorio para su cuantificación son relativamente sencillos

2.2. Métodos de desinfección

Los métodos de desinfección de agua ayudan a inactivar a los microorganismos patógenos, disminuyendo las enfermedades causadas por el agua contaminada. Para tal desinfección se deben tener en cuenta que tipos de microorganismos están presentes en el agua. A continuación se indican las necesidades de desinfección, características deseables de un desinfectante y los tipos de desinfectantes.

2.2.1. Necesidad de la desinfección

En América Latina y el Caribe, las enfermedades diarreicas representan un grave problema de salud pública, encontrándose entre las primeras cinco causas de defunción en menores de un año, y en muchos casos son la primera causa de muerte en niños de uno a cuatro años (OMS, 1995).

El agua es uno de los medios para la transmisión de enfermedades gastrointestinales. La razón fundamental para desinfectar el agua destinada al consumo humano y uso doméstico, es asegurar la inactivación o destrucción de los agentes patógenos que representan riesgos para la salud del hombre, evitando así enfermedades como: el cólera, hepatitis infecciosa, poliomiелitis, fiebres tifoidea y paratifoidea, amibiasis, balantidiasis, campilobacteriosis, enteritis causada por rotavirus, y diarreas causadas por cepas patógenas de *E. coli*. Estas enfermedades son debilitantes y a veces mortales; imponen una pesada carga económica y física sobre todos los afectados (OMS, 1995).

Las bacterias y virus contaminan las aguas superficiales y las subterráneas, mientras que los protozoos son predominantes en el agua superficial; hay más de 20 agentes infecciosos que

pueden ser transmitidos por el agua de bebida contaminada y causar enfermedades, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Agentes potencialmente infecciosos presentes en el agua que se transmiten por vía oral (OMS, 1995)

Agentes patógenos	Enfermedad	Persistencia en el agua ^a	Resistencia al cloro ^b	Dosis infecciosa relativa ^c	Reservorio animal importante
Bacterias					
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis	Moderada	Baja	Moderada	Sí
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis	Moderada	Baja	Alta	Sí
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Moderada	Baja	Alta ^d	No
<i>Salmonella</i> spp.	Gastroenteritis	Prolongada	Baja	Alta Moderada	Sí
<i>Shigella</i> spp.	Gastroenteritis	Breve	Baja	Alta	No
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Breve	Baja	Alta (?)	No
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniois	Prolongada	Baja		Sí
Virus					
Adenovirus	Enteritis	?	Moderada	Baja	No
Enterovirus	Gastroenteritis	Prolongada	Moderada	Baja	No
Hepatitis A	Hepatitis	?	Moderada	Baja	No
Hepatitis E	Hepatitis	?	?	Baja	No
Virus Norwalk	Enteritis	?	?	Baja	No
Rotavirus	Enteritis	?	?	Moderada	No (?)
Poliovirus	Poliomelitis	-	-	-	-
Coxsackievirus	Meningitis miocarditis	-	-	-	-
Protozoarios					
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disentería	Moderada	Alta	Baja	No
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Moderada	Alta	Baja	Sí
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiosis, Diarreas	Prolongada	Alta	Baja	Sí
Helmitos					
<i>Dracunculus medinensis</i>	-	Moderada	Moderada	Baja	Sí
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	-	-	-	-
? No conocida o no confirmado					
^a Periodo de detección de la fase infecciosa en el agua a 20°C: breve, hasta 1 semana; moderada, de 1 semana a 1 mes; prolongada, más de 1 mes.					
^b Cuando la fase infecciosa se encuentra en estado libre en el agua tratada con dosis y tiempo de contacto tradicionales. Resistencia moderada, el agente puede no quedar completamente destruido; resistencia baja, el agente queda completamente destruido.					
^c La dosis necesaria para causar infección en el 50% de los voluntarios adultos sanos, en el caso de algunos virus, puede bastar con una unidad infecciosa.					
^d Según los resultados de experimentos con seres humanos voluntarios.					

La mayoría de estas enfermedades pueden ser evitadas y reducir su incidencia con un tratamiento apropiado del agua (OMS, 1995).

La desinfección de los sistemas de abastecimiento de agua comunitarios sigue siendo una de las medidas de salud pública más importante que se puedan tomar para impedir brotes y epidemias de enfermedades. Las opciones tecnológicas de desinfección aplicables a comunidades rurales son: cloración, ozonación, yodación, radiación solar y ultravioleta. En

la actualidad la tecnología de desinfección de mayor uso en Latinoamérica y el Caribe es la cloración. Este tipo de desinfección ha resultado eficiente para controlar las enfermedades gastrointestinales transmitidas por el agua (OMS, 1995).

2.2.2. Características deseables en un desinfectante de agua

En la práctica no existe un desinfectante ideal, que cumple con todos los requerimientos o las necesidades para la desinfección. Cada desinfectante tiene sus ventajas y desventajas, así como un conjunto específico de condiciones que tiene que cumplir para que los resultados sean satisfactorios.

Para que un desinfectante de agua sea idóneo, debe satisfacer ciertos criterios generales entre los cuales se encuentran los siguientes:

1. Rápido y efectivo para inactivar microorganismos patógenos presentes en el agua que se va a desinfectar.
2. El análisis para determinar la concentración del desinfectante en el agua debe ser preciso, sencillo, rápido y apropiado para hacerlo tanto en el campo como en el laboratorio.
3. El desinfectante debe ser manejable para usarse dentro de las condiciones que podrían encontrarse en la fuente del agua.
4. Debe poder mantener una concentración residual adecuada en el sistema de distribución de agua para evitar la recontaminación o que los microorganismos se reproduzcan.
5. De ser posible, no debe introducir ni producir sustancias tóxicas, o en caso contrario éstas deben mantenerse por debajo de los valores guía o de los límites de las normas de calidad; no debe cambiar en ninguna otra forma las características del agua de modo que ésta no sea apta para el consumo humano, o sea estéticamente inaceptable para el consumidor.
6. El desinfectante debe ser razonablemente seguro, conveniente de manejar y aplicar en las situaciones en que se prevé su uso.

7. El costo del equipo, su instalación, operación, mantenimiento y reparación, así como la adquisición y el manejo de los materiales requeridos para sustentar permanentemente una dosificación eficaz, debe ser razonable (OMS, 1995).

2.2.3. Tipos de desinfectantes

La desinfección del agua se realiza utilizando medios físicos o químicos. Los métodos de desinfección física que pueden ser utilizados son la ebullición (no es práctica para sistemas de abastecimiento públicos) y radiación solar o con rayos ultravioleta. Las sustancias químicas que han sido usadas exitosamente para la desinfección son: compuestos de cloro, yodo, ozono, plata coloidal y la mezcla de oxidantes generados *in situ* (especies de oxígeno y cloro).

Los siguientes factores influyen en la desinfección del agua (OMS, 1995):

1. La naturaleza y número de los organismos a ser destruidos
2. El tipo y concentración del desinfectante usado
3. La temperatura del agua: cuanto más alta sea la temperatura más rápida es la desinfección
4. El tiempo de contacto: la desinfección es más completa cuando el tiempo de contacto entre el agua y el desinfectante es mayor
5. La naturaleza del agua: si el agua contiene materia particulada, especialmente de naturaleza coloidal y orgánica, el proceso de desinfección es generalmente obstaculizado
6. El pH en la disociación de especies bactericidas como en el caso del cloro
7. Mezcla: una buena mezcla del agua asegura la adecuada dispersión del desinfectante y así promueve una mejor desinfección

Radiación Ultravioleta

La luz solar es un buen desinfectante debido a la radiación ultravioleta (UV). La eficiencia del proceso depende de la penetración del rayo dentro del agua. La materia suspendida y las moléculas orgánicas disueltas absorben la energía UV interfiriendo su poder bactericida, por lo que su uso es difícil en sistemas de agua con materia particulada. La diaria entrada de Radiación Ultravioleta (RUV) solar incluidas longitudes de onda UV-A y UV-B (280 a 320 nm), son particularmente inhibidores de organismos y causa daño directo al ADN (Jacobs y Sundib, 2001).

Cloro

El cloro y sus diversas formas son uno de los desinfectantes de agua más antiguos y de uso común en América Latina y el Caribe (OPS/OMS, 1995). El costo del cloro es barato en comparación a otros desinfectantes, pero en algunas zonas rurales, el uso de este desinfectante no es aceptado debido al sabor que le confiere al agua para beber (Jiménez, 2001).

Yodo

El yodo es un elemento no metálico de color gris oscuro, tiene una baja solubilidad, siendo ésta una ventaja en los sistemas pequeños, porque impide una sobredosis extrema (OPS/OMS, 1995). El yodo no sólo es un eficaz bactericida sino también un virucida, aumentando su eficiencia al subir el pH. Actualmente, es utilizado ampliamente para volúmenes pequeños de agua, como suministro de agua individual, en condiciones de campo y de emergencia. Una de las desventajas de este desinfectante es su alto costo unitario, que es cerca de 10 veces más que el cloro (OPS/OMS, 1995).

Ozono

El ozono es un germicida potente y efectivo, empleado en tratamientos de agua. Es eficiente para eliminar virus y quistes de protozoarios; y a diferencia del cloro, el ozono mejora el sabor, color y olor del agua (EPA, 1999). El uso del ozono en América Latina ha sido muy limitado y se ha usado muy poco en comunidades pequeñas debido al costo inicial, seguido de las dificultades técnicas operacionales y de mantenimiento (OPS/OMS, 1995).

Procesos de desinfección alternativos y experimentales

Bromo

El ácido hipobromoso (HOBr) y el ión de hipobromito (OBr^-) son bactericidas eficaces, pero el uso del bromo para desinfectar agua para consumo humano ha sido utilizado en circunstancias específicas, por lo que existen pocas referencias. Además, su costo como desinfectante es alto, y se estima que es 3.5 veces más costoso que el cloro (OMS, 1995).

Iones metálicos

Se ha descubierto que los cationes de algunos metales, en particular del oro, plata, mercurio y cobre, tienen propiedades microbicidas. De este grupo de cuatro metales, sólo la plata es de alguna consideración para la desinfección de abastecimiento de agua, y aunque su aplicación es dudosa debido al costo y la eficiencia limitada contra varios agentes patógenos comunes transmitidos por el agua, una ventaja es que no produce sabores, olores, color o derivados. La toxicidad del mercurio, el costo elevado del oro y la poca eficiencia bactericida del cobre y el mercurio (el cobre es un buen algicida y el mercurio es un buen fungicida) los descartan para fines prácticos (OMS, 1995).

2.3. Radiación

La radiación es la emisión continua de energía en forma de ondas electromagnéticas a nivel atómico (rayos gamma, rayos x, onda de luz, rayos infrarrojos, ondas de radio y ondas de radar); las cuales difieren de su longitud de onda (Tippens, 1987).

2.3.1. Fundamentos de radiación térmica

La radiación térmica consta de ondas electromagnéticas emitidas por un sólido, líquido o gas en virtud de su temperatura. Todos los objetos emiten energía radiante en forma continua.

A temperaturas bajas la rapidez de emisión es pequeña. A medida que la temperatura se incrementa la velocidad de emisión aumenta con mucha rapidez.

Los objetos que son buenos emisores de radiación térmica, resultan también ser buenos absorbedores de radiación. Un objeto que absorbe toda la radiación incidente sobre su superficie se llama absorbedor ideal, el cual, además será un radiador ideal. En realidad no existe un objeto que sea un absorbedor ideal, pero en general, las superficies más negras serán las que mejor absorban energía térmica.

Un absorbedor ideal o un radiador ideal en algunas ocasiones es conocido como cuerpo negro, ya que este absorbe más energía radiante del sol que otros más claros. Por lo tanto, el cuerpo negro es también un buen emisor y su temperatura externa será mayor a la temperatura interna.

Absorbancia es la medida de la capacidad del cuerpo para absorber o emitir radiación térmica.

La absorbancia es una cantidad adimensional que tiene un valor numérico comprendido entre cero y uno, dependiendo de la naturaleza de la superficie. Para un cuerpo negro, la absorbancia es igual a la unidad; para una superficie de plata muy bien pulida, se aproxima a cero.

La rapidez de radiación R de un cuerpo se define fundamentalmente como la energía radiante emitida por unidad de área por unidad de tiempo, es decir, la potencia por unidad de área:

$$R = \frac{E}{\tau A} = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

si la potencia radiante P se expresa en watts y el área de la superficie A en metros cuadrados, la rapidez de la radiación estará en watts por metros cuadrados. Esta velocidad depende de dos factores: la temperatura absoluta T y la absorbanza e del cuerpo radiante. El postulado formal de esta dependencia se conoce como Ley de Stefan-Boltzmann y puede escribirse como:

$$R = \frac{P}{A} = e\sigma T^4 \quad (2.2)$$

donde σ es la constante de Stefan ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) y T^4 es la cuarta potencia de la temperatura absoluta (K^4) (Tippens, 1987).

2.3.2. La luz

La naturaleza de la luz no es fundamentalmente distinta de las otras radiaciones electromagnéticas (calor, ondas de radio o radiación ultravioleta); la característica que la distingue de otras radiaciones es su energía.

La luz es radiación electromagnética capaz de afectar el sentido de la visión.

El contenido de energía de la luz visible varía desde $2.8 \times 10^{-19} \text{ J}$ hasta $5.0 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Las tres principales características de la luz son:

1. Propagación rectilínea: La luz viaja en línea recta
2. Reflexión: Cuando la luz incide sobre una superficie lisa, aquella retorna al medio original
3. Refracción: La trayectoria de la luz cambia cuando entra en un medio transparente

Las leyes de reflexión y refracción de la luz suelen deducirse empleando la teoría ondulatoria de la luz introducida en el siglo XVII por el matemático, astrónomo y físico holandés Christiaan Huygens. La reflexión es una propiedad del movimiento ondulatorio por la que una onda retorna al propio medio de propagación tras incidir en una superficie. El principio de Huygens afirma que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden. Con ello puede definirse un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias. Como la luz avanza en ángulo recto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz (Tippens, 1987).

Espectro electromagnético

El intervalo de frecuencia del espectro electromagnético es muy grande. La longitud de onda λ de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia f por la ecuación general

$$c = f\lambda \quad (2.3)$$

donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s).

La región visible del espectro electromagnético se extiende desde 400 nm para luz violeta, hasta aproximadamente 700 nm para la luz roja. En orden de longitudes de onda ascendente, los colores espectrales son violeta (450 nm), azul (480 nm), verde (520 nm), amarillo (580 nm), naranja (600 nm) y rojo (640 nm) (Figura 3).

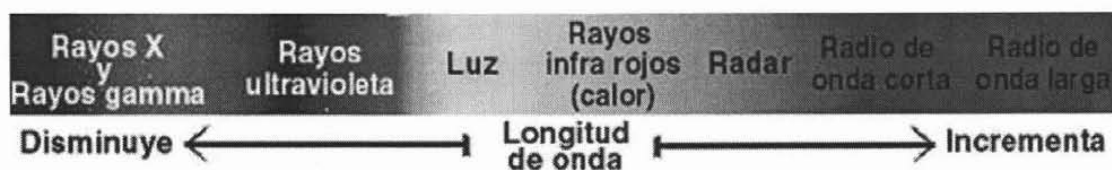


Figura 3. Espectro electromagnético

En un sentido amplio, la luz es la zona del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, e incluye la energía radiante que produce la sensación de visión.

La energía radiante tiene una naturaleza dual, y obedece leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía, los llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales. Max Planck postuló que la energía electromagnética se absorbe o se emite en paquetes o cuantos, también llamados fotones. El contenido electromagnético de dichos cuantos es proporcional a la frecuencia de la radiación. La ecuación de Planck puede escribirse:

$$E = hf \quad (2.4)$$

donde E es la energía del fotón, f es la frecuencia del fotón y h es el factor de proporcionalidad llamado constante de Planck (6.625×10^{-34} J/Hz).

El concepto de fotón se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia (Tippens, 1987).

2.3.3. Reflexión y Refracción

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido. La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia (Figura 4). El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal. Los ángulos de reflexión y refracción se definen de modo análogo (Tippens, 1987).

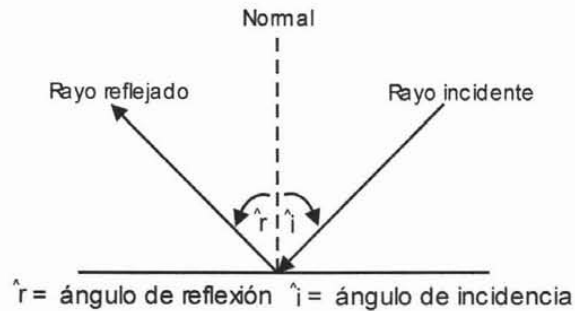


Figura 4. Leyes fundamentales de Reflexión
(Tippens, 1987)

Las leyes de la reflexión afirman que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, y que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano. Si la superficie del segundo medio es lisa, puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada. Como se observa en la figura 5, la fuente de luz es el objeto *A*; un punto de *A* emite rayos en todas las direcciones. Los dos rayos que inciden sobre el espejo en *B* y *C*, por ejemplo, se reflejan como rayos *BD* y *CE*. Para un observador situado delante del espejo, esos rayos parecen venir del punto *F* que está detrás del espejo. De las leyes de reflexión se deduce que *CF* y *BF* forman el mismo ángulo con la superficie del espejo que *AC* y *AB*. En este caso, en el que el espejo es plano, la imagen del objeto parece situada detrás del espejo y separada de él por la misma distancia que hay entre éste y el objeto que está delante.

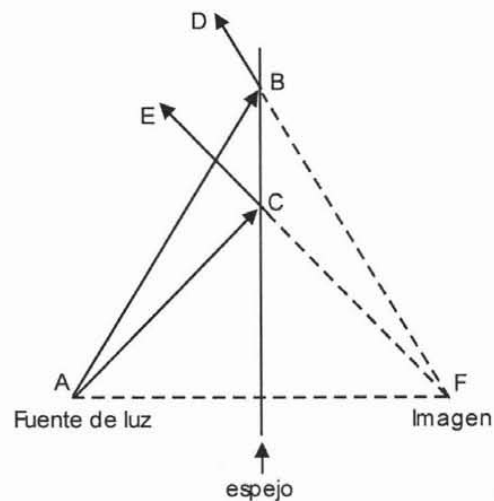


Figura 5. Reflexión en un espejo plano
(Tippens, 1987)

Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen (Tippens, 1987).

La radiación emitida por el sol presenta un amplio intervalo de longitudes de onda, la cual puede dividirse en dos regiones con base a la capacidad de ionización de los átomos:

- Ionizante: que son los rayos gamma y rayos X
- No ionizante: radiaciones ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja. (Acra *et al.*, 1997).

2.3.4. Desinfección de agua por radiación UV

La radiación UV es parte del espectro electromagnético y está entre la región visible y los rayos X. Las diferentes bandas de onda en el espectro ultravioleta muestran grandes daños bacteriológicos, y por esta razón el espectro UV es dividido en 3 regiones espectrales: UV-A, UV-B y UV-C (Orto, 1986) como se indica en la tabla 3

Tabla 3. Región espectral (Orto, 1986)

Región espectral	También conocidas como	Intervalo de longitud de onda λ (nm)
UV-A	Onda larga o luz negra	320 – 400
UV-B	Onda media	280 – 320
UV-C	Onda corta o germicida	200 - 280

Las longitudes de onda más peligrosas para las diferentes formas de vida, son las inferiores a 280 nm (vacío y UV-C), que las absorbe completamente el ozono de la estratósfera, y solamente las fracciones de UV-B y UV-A, son capaces de pasar la tropósfera y llegar hasta la superficie terrestre (Acra *et al.*, 1997).

La intensidad de la luz solar que llega a la zona biótica, varía con la latitud (que determina la inclinación del Sol), estación del año, nubosidad, contaminación atmosférica, elevación sobre el nivel del mar y la altitud solar.

Es importante hacer hincapié que a mayores altitudes, la intensidad de la radiación solar es significativamente más alta que al nivel del mar. La distribución espectral de energía solar a nivel del mar es aproximadamente 3%, UV; 44%, visible, y 53% infrarrojo. Estas variables deben ser consideradas en el uso de la energía solar (Acra *et al.*, 1997).

La radiación solar que llega a un medio transparente es parcialmente reflejada y absorbida, en donde los valores relativos dependen de las propiedades ópticas del material transparente y del espectro solar.

La energía que pasa a través del agua, también es atenuada por la reflexión y absorción. La porción de luz solar transmitida en el agua depende de la turbiedad causada por la materia orgánica y las partículas inorgánicas en suspensión; las propiedades ópticas se modifican debido a la presencia de sustancias en solución capaces de absorber luz, tales como los colorantes y sales minerales, además de modificar la longitud de onda de la radiación incidente. Más del 10% de las radiaciones solares UV-B que inciden en la superficie del mar (clara), penetran a una profundidad de 15 m, inactivando *Escherichia coli* a una profundidad de 4 m (OPS/OMS, 1984).

La muerte de los microorganismos durante la exposición del agua a la luz solar por un tiempo suficientemente prolongado, se debe en gran medida a las radiaciones UV-A y UV-B, las cuales producen mutaciones, cambios en la secuencia de su ADN (ácido desoxirribonucleico), dando lugar a alteraciones que la célula no es capaz de reparar. Las alteraciones más frecuentes producidas en el ADN son lesiones de las bases y de las cadenas de polinucleótidos. Las lesiones de las bases pueden ser unimolecular o bimolecular. Las bases más sensibles a la radiación ultravioleta (RUV) son las pirimidinas. El efecto más importante es la formación de compuestos dímeros, éste produce una torsión de la estructura helicoidal secundaria del ADN y causa desnaturalización local. Se ha observado que el número de dímeros es proporcional a la dosis de RUV y varía con la longitud de onda, con una cresta en 280 nm. (OPS/OMS, 1984).

La distorsión producida en la molécula de ADN impide a ésta llevar a cabo sus funciones, esto es, la transcripción y la replicación, pueden quedar bloqueadas, lo que puede provocar la muerte de las células, recombinación genética, mutagénesis o incluso carcinogénesis.

Se tiene conocimiento que la RUV inhibe la síntesis de ADN y se ha comprobado que esta inhibición es un parámetro sensible para evaluar los efectos de la RUV (OPS/OMS, 1984).

Los dímeros son normalmente producidos por la UV-B, pero también se pueden formar después de la exposición a la UV-A y de reacciones de fotosensibilización (OPS/OMS, 1984).

Otro tipo de lesión es causada en el ARN (ácido ribonucleico), cuya estructura es similar a la del ADN, pero como la biosíntesis es un proceso continuo y el ARN existe en múltiples ejemplares, se necesitan dosis muy elevadas de RUV para que esas lesiones tengan repercusiones graves. La RUV produce también dímeros en el ARN (OPS/OMS, 1984).

El principal responsable de la inactivación de microorganismos es la luz UV-A (320-400 nm). La luz violeta (400-450 nm) es altamente bactericida. El efecto de sinergismo de la luz UV-A y la luz violeta, es la velocidad de inactivación sobre *E. coli* que es incrementada por un factor de tres (Wegelin *et al.*, 1994).

La temperatura del agua entre 20 y 40°C no afecta la inactivación de bacterias por UV-A y radiación de luz visible. Se ha reportado que existe sinergismo de la radiación con la temperatura por arriba de 50°C, observándose incrementos en el efecto germicida de la radiación solar (Wegelin *et al.*, 1994). En el IMTA, también se estudió el efecto combinado de radiación solar y de las temperaturas superiores a los 45°C, la cual mejora el efecto de inactivación sobre microorganismos en el laboratorio y campo (Cortés *et al.*, 2000).

En la desinfección de agua mediante energía solar, el efecto letal sobre los microorganismos se debe básicamente a la radiación UV. La inactivación de microorganismos y su recrecimiento son dependientes de su concentración y de la cantidad de radiación que inciden en el agua (Cortés *et al.*, 2000).

2.4. Estadísticas de prueba y decisión

El objetivo del análisis estadístico es corroborar si existe diferencia significativa entre dos o más tratamientos.

Para el análisis de los datos obtenidos, se analizan de manera estadística, utilizando la distribución *t* Student para comparación entre dos tratamientos (Howard, 1999).

La estadística *t* tiene una variabilidad mayor y su distribución por lo tanto está más extendida que una distribución normal. La distribución de *t* depende del tamaño de la muestra (<30 observaciones); para este cálculo se utilizaron las siguientes fórmulas (Howard, 1999):

$$\text{Promedio o media muestral} \quad \bar{y} = \sum \frac{y}{n} \quad (2.5)$$

$$\text{Varianza muestral} \quad s^2 = \sum \frac{(y - \bar{y})^2}{(n-1)} \quad (2.6)$$

$$\text{Desviación estándar muestral} \quad s = \sqrt{\sum \frac{(y - \bar{y})^2}{(n-1)}} \quad (2.7)$$

Estimación mancomunada de la varianza

$$s_{pd}^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.8)$$

$$\text{Grados de libertad} \quad gl = n_1 + n_2 - 2 \quad (2.9)$$

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este trabajo, se partió de la investigación realizada en el IMTA por Martín y colaboradores, 1999 donde se planteó el diseño de experimentos 2^k para la exposición directa de las botellas a la radiación solar, k factores (tipo de recipiente, color del fondo, presencia de turbiedad y tiempo de exposición) con dos niveles cada uno, demostrándose que la turbiedad disminuye la eficiencia en la inactivación de bacterias indicadoras. Las botellas colocadas en un fondo plateado favorece la radiación, logrando una mayor eficiencia en la radiación con respecto a un fondo negro, independientemente del aumento de la temperatura por absorción del calor; al utilizar un concentrador forrado de papel aluminio y las botellas pintadas la mitad de negro, se logró reducir hasta dos horas la exposición para la inactivación total de coliformes totales y *E. coli*.

3.1. Metodología del trabajo

La metodología que se siguió para su realización fue la siguiente:

1) Búsqueda de materiales reflectantes de uso común y de fácil adquisición

Para llevar a cabo las pruebas de reflectancia planteadas en este trabajo, se obtuvieron materiales en papelerías y tiendas de abarrotes o fueron productos comerciales reciclados.

Los materiales debían cumplir las siguientes características: alto porcentaje de reflectancia, fácil adquisición, resistencia al intemperie, maleabilidad y bajo costo.

2) Determinación de la capacidad de reflectancia de los materiales

Después de obtener los materiales reflectantes se midió el porcentaje de reflectancia de los materiales en el intervalo de 300 a 700 nm, preseleccionando los mejores. Tales pruebas se llevaron a cabo en el CIE (Centro de Investigación en Energía) de la UNAM, localizado en Temixco Morelos, México, con un Espectrofotómetro UV-3101 PC, marca SHIMADZU, el

3) Intemperización y preselección de los mejores materiales reflectantes

Los materiales seleccionados, fueron también expuestos a la intemperie con el propósito de observar los cambios que ocurren sobre la superficie reflectante. La exposición se realizó con muestras de $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Estos cambios fueron medidos por el porcentaje de reflectancia con el Espectrofotómetro UV-3101 PC. Con los datos de reflectancia de los materiales (nuevos e intemperizados) se hizo una selección de los de mayor porcentaje de reflectancia y resistencia a la exposición del medio ambiente (menos opaco, sin ralladuras y conservación de la muestra completa).

4) Construcción del concentrador

El concentrador solar consta de una base de $55 \times 55 \text{ cm}^2$ y cuatro paredes de $35 \times 35 \text{ cm}^2$ cada una, que pueden ser construidas con madera de desecho o con el material de las cajas utilizadas para transportar frutas y verduras. Se requieren ocho piezas de madera en forma de triángulo de lados $8.5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 17.5 \text{ cm}$, y 2 cm de espesor para asegurar la correcta inclinación de las paredes del concentrador, la cual debe ser siempre de 60° con respecto a la horizontal. Por la geometría de este concentrador, su capacidad ideal esperada es la concentración de tres soles, calculado en trabajos previos por Martín y colaboradores, 1999. Para adherir las partes del concentrador se utilizó pegamento amarillo. Las cuatro paredes del concentrador y la base se forran con los materiales reflectantes; de tal manera que no se formen bolsas de aire y evitar que la capa reflectante sufra lesiones.

El concentrador tiene una capacidad para tres botellas transparentes de dos litros cada una, éstas deben de ser lavadas en cada prueba con agua y jabón retirando todo tipo de etiqueta que obstruya el paso de la radiación solar. Las botellas deben de ser pintadas transversalmente de color negro mate, para aumentar la temperatura y disminuir el tiempo de exposición a la radiación solar (Martín *et al.*, 2001).

5) 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)

La energía útil es la energía que entra al agua de las botellas, ocasionando la inactivación de los microorganismos presentes en ella. Ésta es calculada por medio de un actinómetro químico.

Un actinómetro químico es un sistema químico que realiza una reacción inducida por la luz de una determinada longitud de onda en la que se conoce el rendimiento cuántico o número de fotones por unidad de tiempo. El actinómetro cambia la concentración de la especie degradable dependiendo de la radiación recibida; la especie que se excita no cambia su concentración. Las determinaciones de concentración deben de ser realizadas al terminar la prueba, para evitar la generación de reacciones en la oscuridad. Para este caso, la determinación de cada concentración se hizo por medio de la titulación con permanganato de potasio.

La actinometría química empleada para la realización de este experimento es de fase líquida. El actinómetro usado en la región ultravioleta es Nitrato de uranilo ($(\text{NO}_3)_2 \text{UO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), el cual actúa sobre la descomposición o degradación del ácido oxálico a CO , CO_2 y HCOOH , por medio de la radiación solar, en el intervalo de 300 nm a 546 nm. El ácido oxálico remanente es determinado por titulación con permanganato de potasio (KMnO_4).

La preparación de la solución actinométrica y el análisis respectivo se presentan en el anexo II.

Las botellas de plástico se llenaron con la solución actinométrica y se expusieron a la radiación solar en los diferentes concentradores, cubriéndolas antes y después de la exposición. Las exposiciones fueron de 20 minutos en todas las pruebas a diferentes horas del día.

Los concentradores y la botella testigo (sin concentrador) se colocaron en una plataforma móvil que tenía un ángulo de inclinación, con respecto a la horizontal de 18° , que corresponde a la latitud Norte de la ubicación del IMTA, al medio día solar (mayor radiación del día). Se tomaron muestras en frascos de 10 mL, previamente forrados de papel aluminio para evitar que se siguiera degradando el ácido oxálico. Posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio de potabilización del IMTA, en donde se determinó, por medio de titulación, la cantidad de ácido oxálico remanente de cada botella, como se muestra en la figura 6.

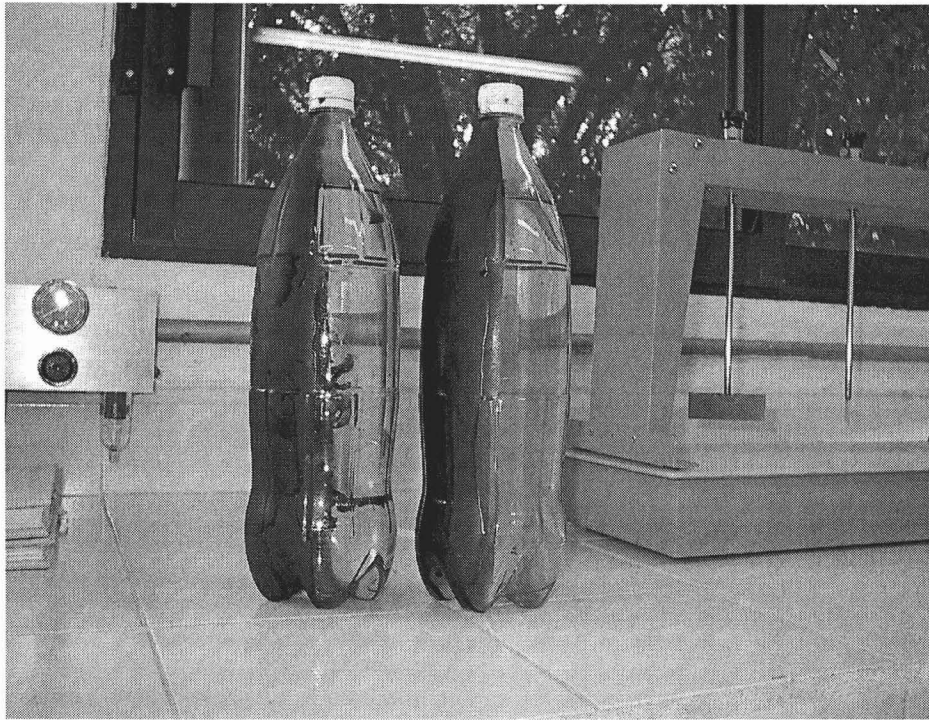


Figura 6. Color amarillo-verdoso de la solución actinométrica en las botellas de prueba.

Las pruebas actinométricas realizadas tuvieron dos objetivos:

- a).- Comparación de los materiales de mejor reflectancia al medio día solar (plástico metalizado, cinta de aluminio, papel aluminio Alupak y lámina galvanizada C-24), respecto a la radiación útil en las botellas izquierdas.
- b).- Comparación de la posición de las botellas (izquierda y central) en los concentradores al medio día solar, respecto a la radiación útil en las botellas.

Para ambas se midió la intensidad de radiación incidente en el IMTA al momento de las pruebas.

En el primer caso, las pruebas actinométricas se realizaron simultáneamente, usando los cuatro concentradores. La posición de la botella utilizada fue la misma en cada concentrador a los mismos tiempos, sin dejar de colocar las otras dos botellas para obtener resultados reales. En el segundo caso, se colocaron las tres botellas en el concentrador solar, pero las pruebas actinométricas fueron realizadas a las botellas central e izquierda (debido a que los resultados de la botella izquierda y la derecha son semejantes por simetría, la intensidad tiene un comportamiento similar antes y después del medio día solar) (Martín *et al.*, 1999).

6) Determinación de la eficiencia de la desinfección solar en la inactivación de bacterias indicadoras.

Las pruebas de desinfección se realizaron con los concentradores forrados con los materiales reflectantes seleccionados (plástico metalizado, papel aluminio y cinta de aluminio), los cuales tienen las mismas características que el diseñado por Martín y colaboradores (1999). Así mismo, se utilizó un concentrador de lámina galvanizada C-24; ya que éste es un material muy resistente a la intemperie.

El agua utilizada para estas pruebas fue tomada del clarificador secundario de la planta de aguas residuales del IMTA, por el alto contenido de coliformes y baja turbiedad.

Las pruebas de desinfección duraron 6 horas, se utilizaron tres botellas de plástico no retornable por cada concentrador. Los concentradores fueron orientados hacia el medio día solar (la base del concentrador solar perpendicular al medio día solar, con el fin de captar la mayor cantidad de radiación en las botellas) un día antes de la realización de las pruebas bacteriológicas, la botella testigo fue también orientada hacia el medio día solar (sin concentrador). Se tomaron muestras cada dos horas.

Para el conteo de coliformes totales y *E. coli* se utilizó el método de sustrato definido (Colilert) ver anexo III.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

Los datos experimentales obtenidos del presente trabajo son los siguientes:

4.1. Búsqueda de materiales reflectantes

Los materiales que se adquirieron para la optimización del concentrador fueron los siguientes:

- Papel aluminio (Alupak, Reynolds Wrap, Aluplus)
- Plástico metalizado (amarillo y sin color; envoltura de alimentos: papas fritas. Amarilla, anaranjada y galletas)
- Papel metálico (plateado y dorado; papel bond y Al UNIFOIL VEROE)
- Envase tetra pak
- Lata de aluminio
- Lámina de aluminio calibre-22
- Lámina de aluminio calibre-26
- Lámina galvanizada calibre-24
- Lámina Zintro-Alum calibre-26
- Cinta de aluminio

A continuación en la figura 7 se muestran los materiales nuevos:

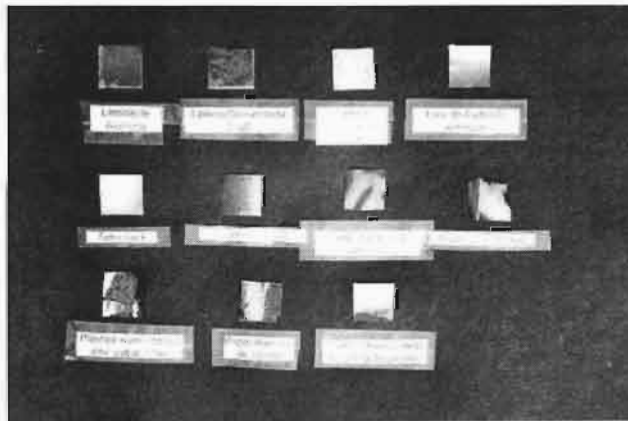


Figura 7. Foto que muestra los materiales nuevos (no usados)

La posición de los materiales en la figura 7 es la siguiente, de izquierda a derecha:

Lámina de aluminio, lámina Galvanizada, lámina Zintro-Alum, lata de aluminio, tetra pak, papel metálico plateado, plástico metalizado amarillo, plástico metalizado sin color, envoltura de papas fritas, papel aluminio y envoltura de galletas. La muestra de lata de aluminio se desprendía fácilmente de cualquier superficie debido a la curvatura del material, por lo que no fue reportada en las pruebas siguientes.

Las características generales de algunos materiales reflectantes se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Característica de los materiales nuevos antes de usar

Tipo de material	Características	Tamaño (m x m)	Precio \$/m ²	No. Pliegos /Concentrador	Disponibilidad
Plástico metalizado (papel regalo)	Plástico metalizado/polipropileno o polietileno/aluminio para alimentos	0.53 x 0.70	6.74	5	Alta (mercerías y papelerías)
Plástico metalizado amarillo	Una cara pintada de amarillo y otra sin color	0.53 x 1.0	10.94	5	Alta (papelerías)
Papel metálico	Una cara blanca y la otra de color (plateada o dorada) (papel Bond y Al UNIFOIL VEROE)	0.63 x 1.0	7.14	5	Alta (papelería)
Papel aluminio	Dos caras, una brillante y una opaca	0.45 x 15	4.44	1 rollo	Alta (tienda de abarrotes)
Envase Tetra pak	Recipiente de cartón aseptico, cubierto con una capa de aluminio y plástico.	0.46 x 0.32	0	5	Alta (tienda de abarrotes)
Lámina de aluminio	Inalterable a las radiaciones solares. Al contacto con el aire húmedo se cubre rápidamente con una capa dura muy delgada y transparente de óxido de aluminio	0.91 x 2.44	134.21	1 lámina	Baja (tienda de material en aluminio)
Lámina Zintro-Alum	Lámina de acero Zinc-Aluminizada. Acero recocido y recubierto en continuo por inmersión en caliente con una aleación de Zinc - Aluminio que proporciona una excelente protección contra la corrosión	0.91 x 2.44	54.04	1 lámina	Baja (ferreterías)
Lámina galvanizada	Lámina con acabado galvanizado, pasado por un tratamiento seco que protege de la humedad ambiental durante el almacenaje.	0.91 x 2.44	80.00	1 lámina	Alta (ferreterías)
Cinta de aluminio	100% aluminio itIdeal Tape Co, cinta adherible de 5 cm de ancho por 30 m de largo que asegura una alta resistencia a la intemperie	0.05 x 30	67.00	1 rollo	Baja (tiendas de aire acondicionado y ferreterías)

4.2. Determinación de la reflectancia de los materiales

Los resultados de las pruebas de reflectancia de los siguientes materiales nuevos se muestran en la tabla 5 y en la figura 8.

Nomenclatura que presentan los materiales nuevos en la tabla 5 y las figuras 8a, 8b y 8c:

- (1) Lámina de aluminio C-22
- (2) Lámina de aluminio C-26
- (3) Lámina galvanizada C-24
- (4) Envoltura de galletas
- (5) Papel aluminio Reynolds Wrap
- (6) Papel aluminio Alupak
- (7) Papel aluminio Aluplus
- (8) Envoltura de papas (amarilla)
- (9) Envoltura de papas (anaranjada)
- (10) Papel metálico plateado
- (11) Papel metálico dorado
- (12) Plástico metalizado amarillo (lado sin color)
- (13) Plástico metalizado doble sin color
- (14) Plástico metalizado amarillo (lado amarillo)
- (15) Plástico metalizado sin color
- (16) Lámina Zintro-Alum C-26
- (17) Tetra pak
- (18) Cinta de aluminio

Tabla 5. Reflectancia de los materiales nuevos

Longitud de Onda (nm)	Reflectancia (%)																	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
700	21.6	26.9	43.2	56.9	19.5	56.9	50.3	54.1	73.1	63.2	90.4	75.2	77.2	67.6	91.5	5.6	4.1	98.6
690	21.2	26.4	42.6	56.5	19.3	56.9	49.6	53.5	72.7	62.8	88.7	75.1	76.6	67.1	91.2	5.5	4.1	96.7
680	20.9	25.9	42	56.1	19.1	56.7	48.9	52.9	72.6	62.6	87.1	75.2	75.9	66.6	90.9	5.4	3.9	94.8
670	20.6	25.5	41.4	55.6	18.9	56.7	48.3	52.3	72.4	62.5	85.5	74.5	75.4	66.1	90.6	5.3	3.9	92.6
660	20.3	25	40.9	55.3	18.8	56.6	47.6	51.7	72.1	62.3	84.2	74.5	74.8	65.6	90.3	5.2	3.9	90.5
650	19.9	24.6	40.4	54.8	18.6	56.4	47	51.1	71.8	62.1	83.1	73.9	74.3	65.1	89.9	5.1	3.8	89
640	19.7	24.1	39.9	54.5	18.4	56.2	46.4	50.6	71.5	61.8	82.3	73.8	73.8	64.5	89.5	5.1	3.8	86.9
630	19.5	23.6	39.6	53.5	18.3	57.3	46.1	50	72.7	61.5	81.9	73.2	73.4	64.3	89.4	5.1	3.8	85.6
620	19.2	23	39.2	53	18.3	57.4	45.6	49.4	72.2	61.2	81.1	72.7	72.9	63.9	88.9	4.9	3.7	83.2
610	18.9	22.8	38.8	52.9	18.1	56.6	44.9	48.9	71.6	60.9	80.8	72.4	72.4	62.7	88.3	4.9	3.7	81.8
600	18.7	22.5	38.5	52.5	17.9	56.5	44.5	48.4	71.5	60.7	80.2	71.9	71.9	61.7	87.8	4.9	3.6	80.4
590	18.5	22.1	38.2	52	17.8	56.3	44.2	48.1	71.2	60.4	79.1	71.5	71.4	60.4	87.3	4.8	3.6	79.4
580	18.3	21.7	37.9	51.6	17.8	56.2	43.9	47.8	70.8	60.1	77.1	71	70.9	58.7	86.8	4.8	3.5	78.4
570	18.1	21.3	37.8	50.9	17.6	56.6	43.5	47.2	71.1	60	74.2	70.5	70.6	56.9	86.6	4.8	3.5	76.7
560	17.8	20.9	37.4	50.7	17.6	56.1	43.1	46.8	70.6	59.8	68.9	70	70.1	54.8	85.8	4.7	3.5	75.4
550	17.6	20.6	37	50.3	17.7	55.8	42.8	46.4	70.3	59.6	60.8	69.4	69.8	52.5	85.3	4.7	3.4	75.1
540	17.4	20.2	36.8	49.9	17.5	55.8	42.5	46	70.1	59.3	51.8	68.9	69.4	49.6	84.9	4.7	3.4	73.1
530	17.1	19.8	36.3	49.4	17.4	55.2	42.1	45.7	69.6	59	46.1	68.5	68.9	44.6	84.4	4.6	3.4	71.6
520	16.9	19.5	36	49	17.3	55.5	41.8	45.3	69.8	58.9	41.6	68	68.6	37.3	84.1	4.6	3.4	70.3
510	16.8	19.1	35.5	48.7	17.2	55.2	41.4	44.9	69.5	58.8	35.4	67.5	68.2	27.6	83.6	4.6	3.3	69
500	16.6	18.8	35.1	48.3	17.1	55	41.1	44.5	69.3	58.6	29.5	67	67.9	19.2	83.1	4.5	3.3	67.8
490	16.3	18.5	34.6	47.9	17	54.7	40.8	44.1	69	58.4	24.8	66.5	67.5	14.8	82.6	4.5	3.3	66.6
480	16.1	18.1	34.1	47.6	16.9	54.5	40.5	43.7	68.7	58.3	21.1	66	67.1	12.6	82.1	4.4	3.2	65.2
470	15.9	17.8	33.6	47.3	16.9	54.4	40.2	43.4	68.5	58.2	18.5	65.5	66.8	11.3	81.7	4.4	3.2	63.9
460	15.7	17.4	33.2	46.7	16.8	54.7	40.1	43.1	68.7	58.1	16.8	65	66.5	11.2	81.3	4.4	3.4	63
450	15.5	17.1	32.5	46.7	16.7	53.9	39.7	42.7	67.9	57.9	16.3	64.6	66.1	12.4	80.8	4.3	3.1	61.7
440	15.3	16.8	31.9	46.3	16.7	53.7	39.5	42.4	67.7	57.8	16.8	64.1	65.8	14.3	80.4	4.3	3.1	60.4
430	15.1	16.4	31.3	45.9	16.6	53.5	39.3	42.1	67.6	57.8	17.8	63.7	65.5	17.1	80	4.2	3.1	59.2
420	14.9	16.1	30.6	45.7	16.6	53.4	39	41.8	67.4	57.8	19.3	63.2	65.2	20.5	79.7	4.2	3	58
410	14.7	15.8	29.9	45.3	16.5	53.1	38.8	41.4	67.1	57.7	21.2	62.6	64.9	23.9	79.3	4.1	3	56.9
400	14.5	15.4	29.2	45	16.5	52.8	38.6	41.1	66.8	57.8	23.9	62.1	64.6	26.5	78.9	4.1	2.9	55.7
390	14.3	15.1	28.6	44.7	16.5	52.8	38.4	40.8	66.6	57.9	27.6	61.6	64.3	27.9	78.6	4	2.9	54.6
380	14.1	14.8	28.2	44.5	16.5	52.6	38.3	40.6	66.5	57.9	31.2	61.1	64.1	28.3	78.3	3.9	2.9	53.6
370	13.9	14.5	28.1	44.1	16.6	52.7	38.4	40.4	66.6	58	32.8	60.5	63.9	28	78.2	3.9	2.9	52.7
360	13.5	14.3	28.6	41.8	18.1	55.9	37.3	36.4	68.2	59.5	32	58.4	64.2	26.8	79.2	4.1	2.9	48.1
350	12.8	14.5	29.3	39.9	20.5	61.9	34.8	30	70.3	61.6	30.5	55.5	65.3	24.7	81.2	4.2	2.9	45.5
340	12.7	14.1	29.5	39.4	20.6	62.7	34.7	29.8	70.8	61.9	29.3	54.8	65.3	23.3	81.9	4.2	2.9	44.7
330	12.5	13.9	29.5	38.6	20.7	63.7	34.9	29.6	71.1	62.5	29.4	54.2	65	22.7	82.4	4.3	2.9	44
320	12.4	13.6	29.3	38.3	20.9	63.7	35.3	29.2	70.6	63.5	29.9	53.5	64.8	20.5	82.6	4.3	2.8	45.2
310	12.3	13.4	28.8	38.2	20.9	63.7	35.5	29.2	69.7	63.8	28.3	52.9	64.8	15.5	83.1	4.3	2.8	43.8
300	12.2	13.1	27.9	37.6	21.3	64	35.9	28.9	68.2	64.2	25.5	52.3	64.6	9.4	84.3	4.2	2.8	45.4
Promedio	16.6	19.1	34.7	48.1	18.0	56.4	41.6	43.6	69.9	60.2	48.4	66.2	68.8	38.3	84.3	4.6	3.3	68.4
Promedio (400-300)	13.2	14.2	28.8	41.1	19.0	58.8	36.6	34.2	68.7	60.8	29.1	57.0	64.6	23.1	80.8	4.1	2.9	48.5

Los datos de la tabla 5 se presentan en las siguientes figuras (8a, 8b y 8c)

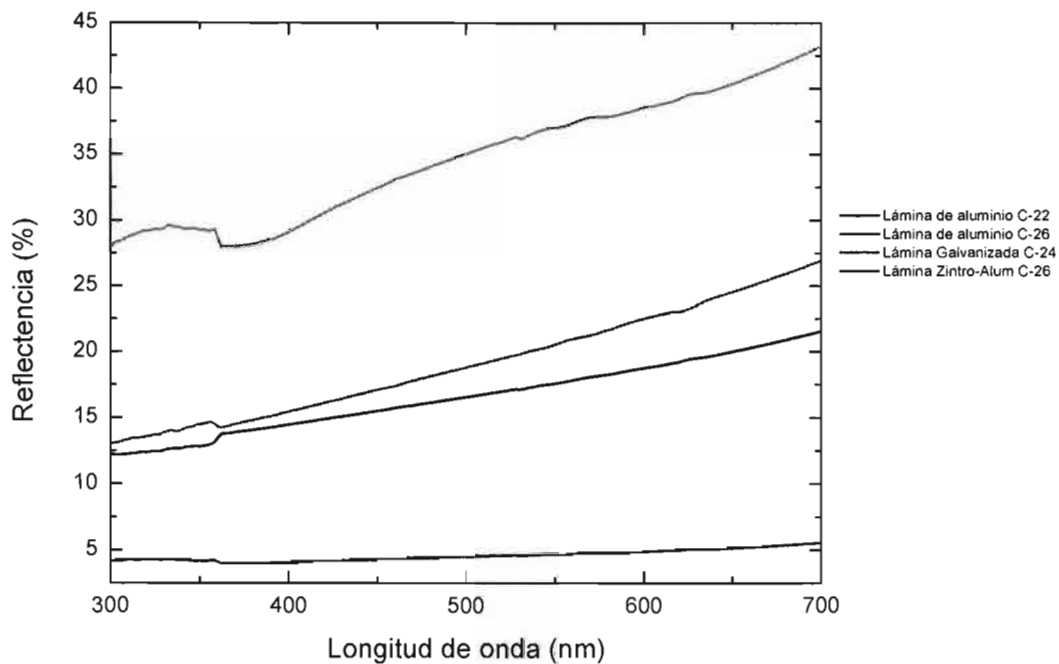


Figura 8a. Gráfica de reflectancias de las láminas nuevas

En la figura 8a se observa que la lámina galvanizada C-24 es la que obtuvo mayor porcentaje promedio de reflectancia de 34.7 en el intervalo de 300-700 nm y 28.8 en el intervalo de 300-400 nm. Las demás láminas (aluminio C-22, C-26 y Zintro-Alum C-26) presentaron un promedio de reflectancia, en ambos intervalos, menor del 20%.

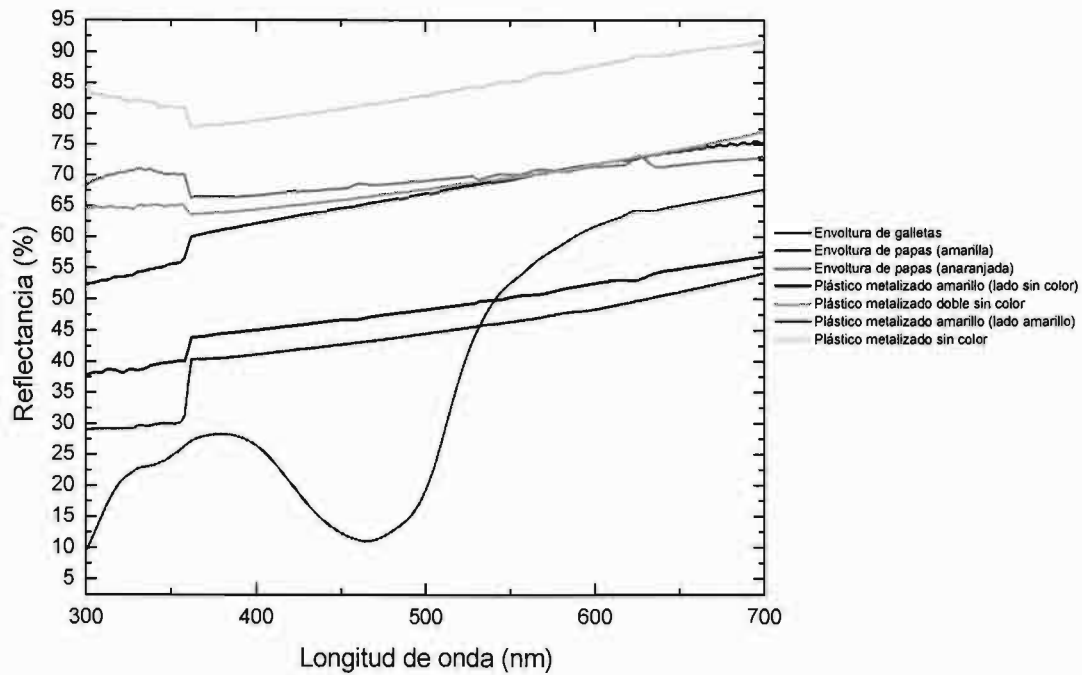


Figura 8b. Gráfica de reflectancia de los plásticos metalizados

En la figura 8b, se comparan los plásticos metalizados y las envolturas de alimentos, que también son plásticos metalizados, donde se observa que el plástico metalizado sin color es el de mayor promedio de reflectancia con 84.3% (intervalo 300-700 nm) y 80.8% (intervalo 300-400 nm); el material que sigue es la envoltura de papas anaranjada con 69.9% (intervalo de 300-700 nm) y 68.7% (intervalo 300-400 nm). El plástico metalizado doble sin color presentó un promedio de reflectancia menor que el plástico metalizado sin color, de 68.8% (intervalo 300-700 nm) y 64.6% (intervalo 300-400 nm). El plástico metalizado amarillo (medido del lado sin color) presentó un promedio de reflectancia de 66.2% (intervalo 300-700 nm) y 57.0% (intervalo de 300-400 nm). Los demás materiales (envolturas de galletas, de papas amarilla; y el plástico metalizado amarillo medido del lado amarillo) presentaron reflectancias promedios menores del 50%.

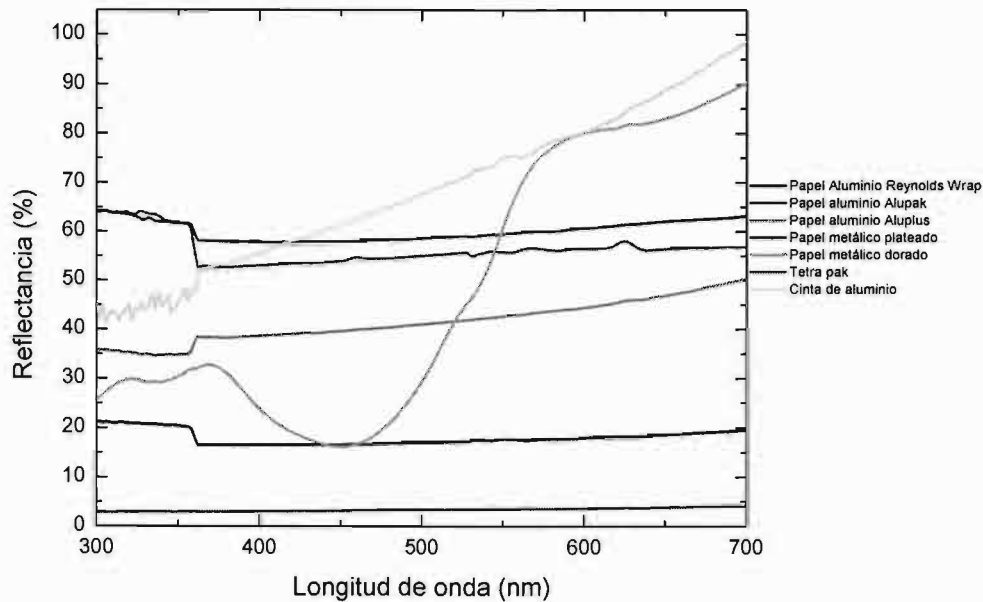


Figura 8c. Gráfica de reflectancias de los papeles de aluminio

Como se observa en la figura 8c la cinta de aluminio obtuvo el mayor promedio de reflectancia de 68.8% (intervalo de 300-700 nm) y 48.5 (intervalo 300-400 nm), siguiendo el papel plateado con un promedio de 60.2% (intervalo 300-700 nm) y 60.8% (intervalo 300-400 nm), siguiendo el papel aluminio Alupak con un promedio de reflectancia de 56.4% (intervalo 300-700 nm) y 58.8% (intervalo 300-400 nm). Los demás materiales (papeles aluminio, papel metálico dorado y Tetra pak) presentan promedios de reflectancia menores del 50%.

Analizando las tres figuras anteriores (8a, 8b y 8c), se observó que el mejor material fue el plástico metalizado sin color con un promedio de reflectancia mayor en ambos intervalos de longitud de onda con respecto a los todos los materiales analizados, seguido de la cinta de aluminio, ya que la envoltura de papas anaranjada presenta el problema de limpieza, y no es posible quitar toda la grasa sin dañar la parte del plástico metalizado (fácil de rayar). En esta prueba se concluye que el material adecuado para la construcción del concentrador solar es el plástico metalizado sin color.

4.2.1. Análisis estadístico de las reflectancia de los materiales

Para observar estadísticamente si existen diferencia significativa entre los materiales, se utilizó la distribución t, comparando el papel aluminio Alupak (de mayor porcentaje de reflectancia en comparación a los otros dos papeles de aluminio) con todos los demás materiales, ya que el papel de aluminio fue utilizado en pruebas anteriores por Martín y colaboradores, 1999. El cálculo se realizó con la ayuda del programa STATISTICA y Origin. Este análisis se realizó planteando las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): La media del porcentaje de reflectancia del papel aluminio Alupak es igual a las medias de los demás materiales reflectantes.

Hipótesis alterna (H_a): La media del porcentaje de reflectancia del papel aluminio Alupak no es igual a las medias de los demás materiales reflectantes.

Los resultados del análisis estadístico se muestran en la siguiente tabla 6.

Tabla 6. Representación de las medias y varianzas de las reflectancia de los materiales nuevos

Materiales (1 vs 2)	Media 1	Media 2	Varianza 1	Varianza 2	Valor de t	p
Lámina aluminio C-22 vs Papel aluminio Alupak	16.588	56.394	7.094	9.945	136.717	0
Lámina aluminio C-26 vs Papel aluminio Alupak	19.132	56.394	16.225	9.945	103.269	0
Lámina galvanizada C-24 vs Papel aluminio Alupak	34.711	56.394	21.488	9.945	54.831	0
Envoltura de galletas vs Papel aluminio Alupak	48.186	56.394	28.008	9.945	18.888	0
Papel aluminio Reynolds Wrap vs Papel aluminio Alupak	18.018	56.394	1.979	9.945	157.555	0
Papel aluminio Aluplus vs Papel aluminio Alupak	41.564	56.394	17.636	9.945	40.034	0
Envoltura de papas (amarilla) vs Papel aluminio Alupak	43.587	56.394	48.675	9.945	23.715	0
Envoltura de papas (anaranjada) vs Papel aluminio Alupak	69.861	56.394	3.709	9.945	51.667	0
Papel metálico plateado vs Papel aluminio Alupak	60.105	56.394	3.888	9.945	14.145	0
Papel metálico dorado vs Papel aluminio Alupak	48.184	56.394	717.698	9.945	4.315	0
Plástico metalizado amarillo (lado sin color) vs Papel aluminio Alupak	66.222	56.394	44.721	9.945	18.846	0
Plástico metalizado doble si color vs Papel aluminio Alupak	68.745	56.394	15.529	9.945	34.747	0
Plástico metalizado amarillo (lado amarillo) vs Papel aluminio Alupak	38.247	56.394	434.059	9.945	12.210	0
Plástico metalizado sin color vs Papel aluminio Alupak	84.214	56.394	16.496	9.945	76.701	0
Lámina Zintro-alum C-26 vs Papel aluminio Alupak	4.574	56.394	0.182	9.945	230.855	0
Tetra pak vs Papel aluminio Alupak	3.336	56.394	0.135	9.945	236.924	0
Cinta de aluminio vs Papel aluminio Alupak	68.352	56.394	250.558	9.945	10.503	0

Nota: p es la probabilidad de que las medias comparadas sean iguales, y el número de datos de cada material es de 201

El valor de t de tablas para todos los casos el mismo, ya que se tienen el mismo número de datos: $t_{0.05,400} = 1.645$; a un nivel de significancia del 95% (Tabla IV del libro Howard, 1999)

El resultado del análisis estadístico indica que la Hipótesis nula se rechaza, ya que existe diferencia significativa entre las medias de los materiales y la media del papel aluminio Alupak, y por consecuencia se acepta la hipótesis alterna.

4.3. Intemperización de los materiales

Con el objeto de observar el efecto de la interperización sobre la reflectancia de los materiales, se tomaron muestras de cada material ($2 \times 2 \text{ cm}^2$).

Las muestras de los materiales fueron colocadas en un lugar donde no había sombra a ninguna hora del día. El tiempo de exposición a la intemperie fue 141 días (1/10/2001 – 18/02/2002). Para comparar los cambios producidos por la intemperie se colocaron muestras testigo de los materiales sobre una base, la cual se colocó en el interior del laboratorio.

Los resultados observados de los materiales a la intemperie se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Observación de los materiales expuestos a la intemperie

Materiales	Observaciones por Meses				
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Papel aluminio	Polvo	Opaco	Opaco y poco arrugado	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado
Tetra pak	Polvo	Desprendimiento de la capa de plástico	Capa de plástico desprendida y la película de aluminio con polvo	Película de aluminio opaca	Película de aluminio opaca
Papel metálico (plateado)	Polvo	Opaco	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado
Envoltura de galleta (Suandy)	Polvo	Opaco	Opaco y arrugado	Opaco, arrugado y desprendimiento de la capa de aluminio	Opaco y arrugado y en algunas zonas se perdió la capa de aluminio
Plástico metalizado sin color	Polvo	Opaco	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado
Plástico metalizado color amarillo hacia la intemperie	Polvo, color opaco	Opaco	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado	Opaco, arrugado y roto
Plástico metalizado color amarillo hacia abajo (no a la intemperie)	Polvo	Opaco y arrugado	Opaco y arrugado	Opaco arrugado y roto	Muestra desecha
Cinta de aluminio	Polvo	Polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo
Lámina galvanizada C-24	Polvo	Polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo
Lámina aluminio C-22	Polvo	Polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo
Lámina Zintro-Alum C-26	Polvo	Polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo	Opaco por el polvo

Las condiciones climáticas de los meses de intemperización de los materiales se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Condiciones climáticas de los meses de prueba de intemperización (promedios)

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Energía acumulada (W-h/m ²)	Lluvia (mm/mes)
Octubre, 2001	20.38	66.86	4828.193	82.7
Noviembre, 2001	19.71	51.09	4785.598	0
Diciembre, 2001	19.72	48.18	4708.226	1.85
Enero, 2002	18.84	43.40	5162.859	21.47
Febrero, 2002	20.39	42.96	5969.336	1.77

En la siguiente figura 9 se presentan las muestras de los materiales utilizados y expuestos a la intemperie:

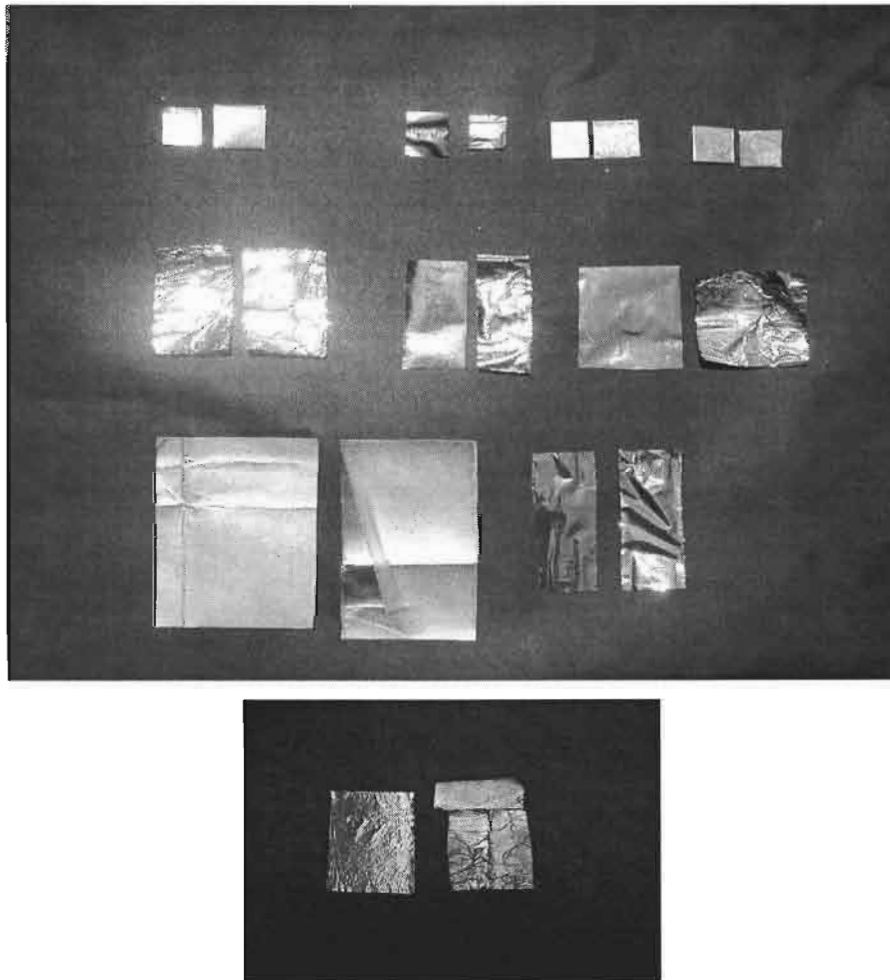


Figura 9. Materiales expuestos a la intemperie (antes y después)

La posición de los materiales en la figura 9 es la siguiente, de izquierda a derecha:
 Lámina de aluminio, plástico metalizado amarillo, lámina Zintro-Alum, lámina Galvanizada, papel aluminio, papel metálico plateado, envoltura de galletas, tetra pak, plástico metalizado sin color y cinta de aluminio.

Nomenclatura de los materiales expuestos a la intemperie representada en la tabla 9 es la siguiente:

- (1) Papel aluminio (Alupak, de mayor porcentaje de reflectancia que los otros papeles de aluminio mencionados anteriormente)
- (2) Plástico metalizado amarillo (lado sincolor)
- (3) Envoltura Swandy
- (4) Tetra pak (sin plástico a la intemperie)
- (5) Tetra pak (con plástico a la intemperie)
- (6) Plástico metalizado sin color
- (7) Papel metálico plateado
- (8) Lámina galvanizada C-24
- (9) Lámina Zintro-Alum C-26
- (10) Lámina de aluminio C-22
- (11) Lámina de aluminio C-26
- (12) Cinta de aluminio

Las envolturas de papas se eliminaron por que presentaban una gran cantidad de grasa.

En la tabla 9 se presentan los resultados de la prueba de reflectancia a los materiales intemperizados y en la figura 10 se grafican los mismos.

Tabla 9. Reflectancia de los materiales seleccionados expuestos a la intemperie

Longitud de Onda (nm)	Reflectancia (%)											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
700	28.3	14.6	10.5	11.7	4.7	70.7	9.2	40.6	4.4	22.2	22.2	33.5
690	27.9	14.4	10.4	11.5	4.6	69.7	9	39.9	4.4	21.7	21.7	32.9
680	27.6	14.3	10.2	11.3	4.5	68.7	8.9	39.2	4.3	21.2	21.2	32.4
670	27.2	14.1	10.1	11.1	4.4	67.6	8.7	38.6	4.2	20.7	20.7	31.9
660	26.9	13.9	9.9	10.9	4.3	66.7	8.6	37.9	4.2	20.2	20.2	31.4
650	26.5	13.7	9.8	10.8	4.3	65.7	8.5	37.4	4.1	19.8	19.8	30.9
640	26.2	13.6	9.6	10.6	4.2	64.8	8.3	36.8	4.1	19.4	19.4	30.4
620	25.5	13.2	9.6	10.5	4.1	63.9	8.1	36.1	4	18.7	18.7	29.9
610	25.2	13.1	9.3	10.3	4	62.6	7.9	35.5	3.9	18.3	18.3	29.4
600	24.9	12.9	9.2	10.1	3.9	61.9	7.8	35.1	3.9	18.1	18.1	29
590	24.7	12.8	9	9.9	3.9	61.6	7.8	34.7	3.9	17.7	17.7	28.5
580	24.5	12.6	8.9	9.9	3.8	61.6	7.7	34.4	3.8	17.4	17.4	28.1
560	23.9	12.2	8.7	9.7	3.7	60.1	7.5	33.6	3.8	16.9	16.9	27.5
550	23.8	12	8.6	9.6	3.7	60.2	7.4	33.2	3.8	16.8	16.8	27.1
540	23.5	11.6	8.6	9.6	3.7	59.5	7.4	32.9	3.8	16.6	16.6	26.9
530	23.2	11.2	8.4	9.5	3.6	58.9	7.3	32.3	3.7	16.3	16.3	26.5
520	22.9	10.6	8.4	9.4	3.6	58.5	7.3	32	3.7	16.1	16.1	26.3
510	22.7	9.9	8.3	9.4	3.5	58	7.2	31.5	3.7	15.9	15.9	26
500	22.5	9.3	8.2	9.3	3.5	57.6	7.2	31	3.6	15.6	15.6	25.7
490	22.2	8.9	8.1	9.2	3.4	57.2	7.1	30.5	3.6	15.4	15.4	25.4
480	21.9	8.5	7.9	9.1	3.4	56.8	7	30	3.6	15.2	15.2	25.1
450	21.3	8.2	7.7	8.9	3.2	55.9	6.9	28.6	3.5	14.5	14.5	24.2
440	21.1	8.4	7.6	8.9	3.2	55.6	6.9	28.2	3.5	14.3	14.3	23.9
430	20.8	8.5	7.5	8.8	3.2	55.3	6.8	27.8	3.4	14.1	14.1	23.6
420	20.6	8.7	7.4	8.8	3.1	55.1	6.7	27.4	3.4	13.9	13.9	23.4
410	20.4	8.8	7.3	8.7	3.1	54.8	6.7	27.1	3.4	13.7	13.7	23.1
400	20.2	8.8	7.2	8.7	3	54.6	6.6	26.8	3.4	13.5	13.5	22.8
390	19.9	8.7	7.1	8.6	2.9	54.4	6.5	26.5	3.3	13.3	13.3	22.6
370	19.7	8.5	6.9	8.7	2.9	54.7	6.4	26.4	3.3	13	13	22.2
360	19.7	8	6.9	8.7	2.9	57.2	6.6	26.7	3.3	12.9	12.9	21.6
350	19.6	7.6	7.1	8.9	2.8	59.7	6.8	27.3	3.4	12.7	12.7	21.2
340	19.6	7.4	7.1	9.1	2.8	61.3	6.7	27.8	3.5	12.7	12.7	21.3
320	19.7	6.8	6.9	9.4	2.7	63.2	6.5	28.9	3.6	12.6	12.6	21.3
310	19.8	6.1	6.6	9.6	2.6	64.2	6.3	29.5	3.6	12.6	12.6	21.3
300	19.7	5.1	6.2	9.6	2.5	64.4	5.8	29.8	3.6	12.4	12.4	21.1
Promedio	22.8	10.4	8.3	9.6	3.5	60.5	7.3	31.9	3.7	16.0	16.0	26.1
Promedio (400-300)	19.8	7.5	6.9	9.0	2.8	59.2	6.5	27.7	3.4	12.9	12.9	21.7

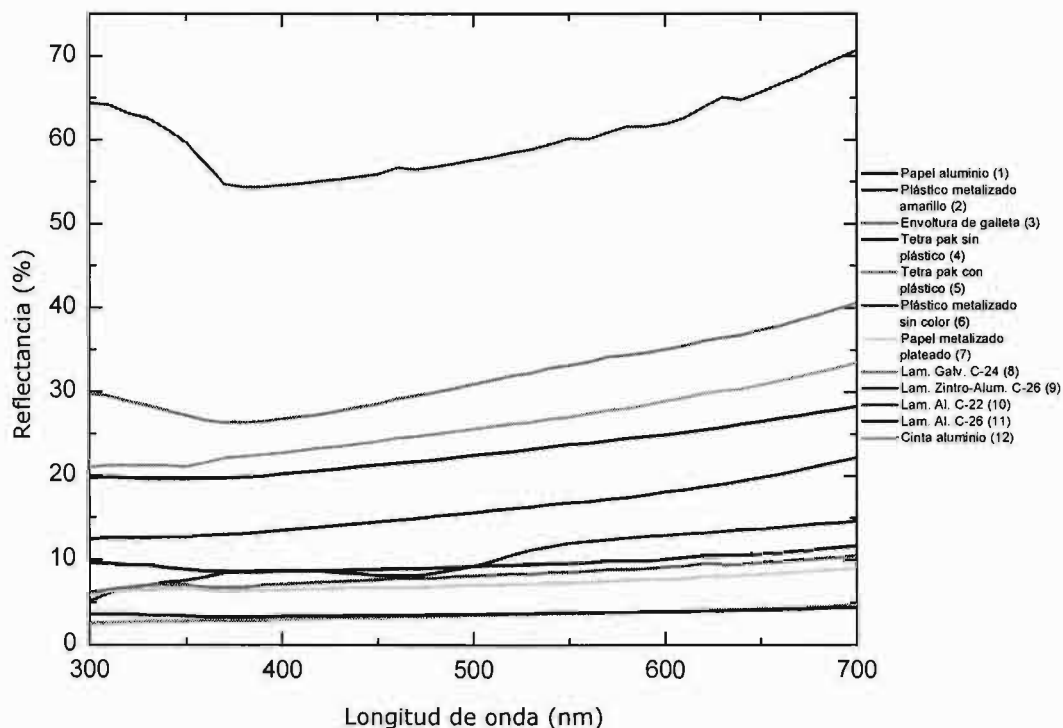


Figura 10. Gráfica de reflectancias de los materiales seleccionados expuestos a la interperie 141 días

El material menos afectado por la intemperie (porcentaje de reflectancia) fue el plástico metalizado sin color (60.5%), siguiéndole la lámina galvanizada (31.9%), la cinta de aluminio (26.1%), el papel aluminio (22.8%) y las láminas de aluminio (16.0%), y el de menor porcentaje fue el Tetra pak (3.5%) en el intervalo de 300 a 700 nm.

En el intervalo de UV-A 300 a 400 nm, el plástico metalizado obtuvo el mayor promedio de reflectancia (59.2%); el cual se redujo aproximadamente 21.6 unidades respecto al material nuevo (no usado). Seguido de la lámina galvanizada C-24 con un promedio de porcentaje de 27.7%, que redujo aproximadamente 1.1 unidades y en tercer lugar la cinta de aluminio con un porcentaje de reflectancia del 21.7% la cual se redujo 26.8 unidades y finalmente, el papel aluminio Alupak con un promedio de porcentaje de reflectancia de 19.8% que se redujo aproximadamente 39 unidades, todos respecto a las muestras de materiales nuevos no usados.

Con base a estos resultados el mejor material es el plástico metalizado sin color, por su alta reflectancia en la prueba de intemperización, seguido de la lámina galvanizada C-24, la cinta de aluminio y el papel aluminio Alupak; ya que los demás materiales estuvieron por debajo del 20% por ciento de reflectancia después de la intemperización.

Se seleccionaron tres materiales, los cuales son: plástico metalizado sin color, por ser el mejor en la prueba de reflectancia de los materiales nuevos y de igual forma en la prueba de intemperización (porcentaje de reflectancia); la cinta de aluminio por ser mejor que los papeles de aluminio en ambas pruebas de reflectancia, observando solo polvo en la muestra expuesta a la intemperie como en el caso de las láminas (Tabla 7); y el papel aluminio Alupak por ser el material utilizado en trabajos previos por Martín y colaboradores (1999).

Se hizo una comparación del porcentaje de reflectancia inicial (material nuevo), y después de la intemperización, de los tres materiales seleccionados (tabla 10). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 11.

Nomenclatura de la tabla 10 y figura 11:

- (1) Cinta de aluminio nueva
- (2) Cinta de aluminio intemperizada
- (3) Papel aluminio Alupak nuevo
- (4) Papel aluminio Alupak intemperizado
- (5) Plástico metalizado sin color nuevo
- (6) Plástico metalizado sin color intemperizado

Tabla 10. Reflectancia de los tres mejores materiales seleccionados puestos a la intemperie

Longitud de Onda (nm)	Reflectancia (%)					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
700	98.6	33.5	56.9	28.3	91.5	70.7
690	96.7	32.9	56.9	27.9	91.2	69.7
680	94.8	32.4	56.7	27.6	90.9	68.7
670	92.6	31.9	56.7	27.2	90.6	67.6
660	90.5	31.4	56.6	26.9	90.3	66.7
650	89.0	30.9	56.4	26.5	89.9	65.7
640	86.9	30.4	56.2	26.2	89.5	64.8
630	85.6	30.2	57.3	25.8	89.4	65.1
620	83.2	29.9	57.4	25.5	88.9	63.9
610	81.8	29.4	56.6	25.2	88.3	62.6
600	80.4	29.0	56.5	24.9	87.8	61.9
590	79.4	28.5	56.3	24.7	87.3	61.6
580	78.4	28.1	56.2	24.5	86.8	61.6
570	76.7	27.9	56.6	24.2	86.6	60.9
560	75.4	27.5	56.1	23.9	85.8	60.1
550	75.1	27.1	55.8	23.8	85.3	60.2
540	73.1	26.9	55.8	23.5	84.9	59.5
530	71.6	26.5	55.2	23.2	84.4	58.9
510	69.0	26	55.3	22.7	83.6	58.0
500	67.8	25.7	55	22.5	83.1	57.6
490	66.6	25.4	54.7	22.2	82.6	57.2
480	65.2	25.1	54.5	21.9	82.1	56.8
460	63.0	24.6	54.7	21.5	81.3	56.7
450	61.7	24.2	53.9	21.3	80.8	55.9
440	60.4	23.9	53.7	21.1	80.4	55.6
430	59.2	23.6	53.5	20.8	80.0	55.3
420	58.0	23.4	53.4	20.6	79.7	55.1
410	56.9	23.1	53.1	20.4	79.3	54.8
400	55.7	22.8	52.9	20.2	78.9	54.6
390	54.6	22.6	52.8	19.9	78.6	54.4
380	53.6	22.4	52.6	19.8	78.3	54.4
370	52.7	22.2	52.8	19.7	78.2	54.7
360	48.1	21.6	55.9	19.7	79.2	57.3
350	45.5	21.2	61.9	19.6	81.2	59.7
340	44.7	21.3	62.7	19.6	81.9	61.3
330	44.0	21.3	63.7	19.6	82.4	62.6
320	45.2	21.3	63.7	19.7	82.6	63.2
310	43.8	21.3	63.7	19.8	83.1	64.2
300	45.4	21.1	64.0	19.7	84.3	64.4
Promedio	68.4	26.1	56.4	22.8	84.2	60.3
Promedio (400-300)	48.48	21.74	58.79	19.75	80.79	59.16

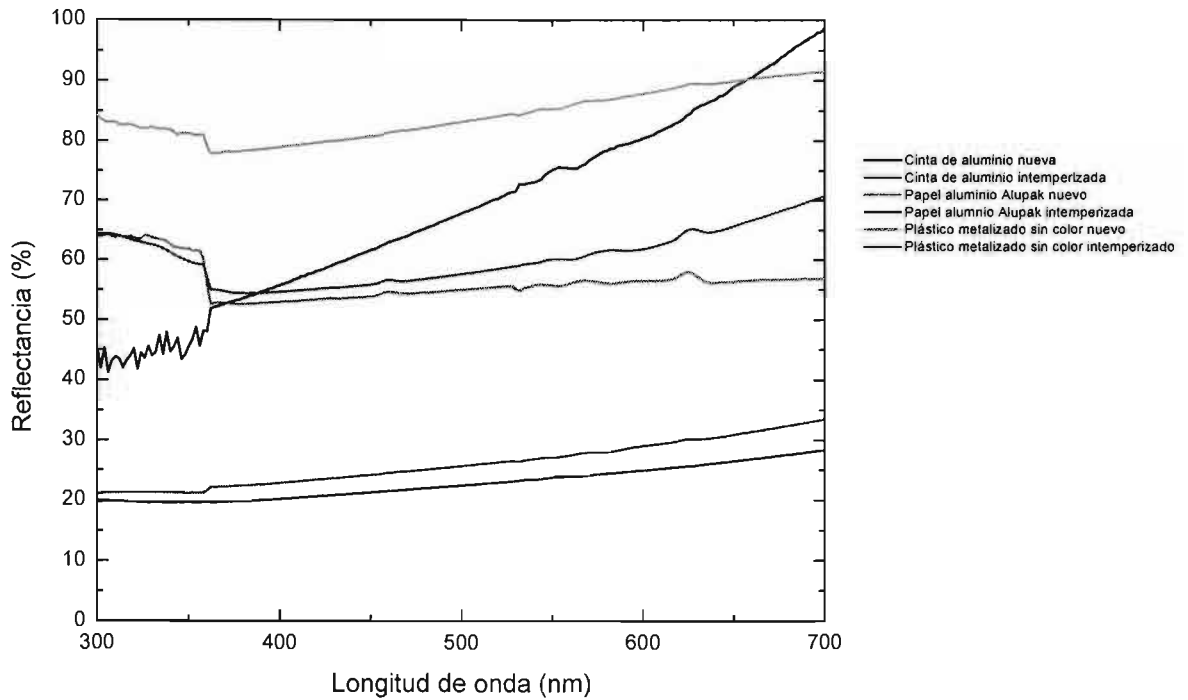


Figura 11. Gráfica de la reflectancia de los tres materiales seleccionados antes y después de la intemperización

4.3.1. Análisis estadístico de las reflectancia de los materiales seleccionados

Para comparar todos los materiales seleccionados con respecto al papel aluminio, se utilizó la distribución t, se plantea las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): La media del porcentaje de reflectancia del papel aluminio Alupak es igual a las medias de los demás materiales reflectantes seleccionados.

Hipótesis alterna (H_a): La media del porcentaje de reflectancia del papel aluminio Alupak no es igual a las medias de los demás materiales reflectantes seleccionados.

En la tabla 11 se muestran los resultados:

Tabla 11. Resultados de la distribución t, comparando el papel aluminio nuevo con los demás materiales seleccionados

Materiales (1 vs 2)	Media 1	Media 2	Varianza 1	Varianza 2	Valor de t	p
Papel aluminio vs Cinta de aluminio nueva	56.39448	68.35164	9.94548	250.55797	10.503	0
Papel aluminio vs Cinta de aluminio intemperizada	56.39448	26.06856	9.94548	13.26944	89.234	0
Papel aluminio vs Papel aluminio intemperizado	56.39448	22.83050	9.94548	7.19912	114.923	0
Papel aluminio vs Plástico metalizado nuevo	56.39448	84.21423	9.94548	16.49696	76.701	0
Papel aluminio vs Plástico metalizado intemperizado	56.39448	60.31826	9.94548	19.82568	10.195	0

Nota: p es la probabilidad de que las medias comparadas sean iguales, y el número de datos de cada material es de 201

El valor de t de tablas para todos los casos el mismo, ya que se tienen el mismo número de datos: $t_{0.05,400} = 1.645$; a un nivel de significancia del 95% (Tabla IV del libro Howard, 1999)

El resultado del análisis estadístico indica que la Hipótesis nula se rechaza, ya que existe diferencia significativa entre las medias de los materiales y la media del papel aluminio; y por consecuencia se acepta la hipótesis alterna.

Este análisis nos indica que los materiales están fabricados con diferentes compuestos que los distinguen uno del otro, como se observa en la textura de cada material.

4.4. Construcción de los concentradores solares

Se fabricaron tres concentradores solares con madera tipo triplay y un concentrador con lámina galvanizada C-24. Los concentradores de madera se forraron de: plástico metalizado sin color (figura 12), cinta de aluminio (figura 13), papel aluminio (figura 14) y lámina galvanizada C-24 (figura 15). Para forrar los concentradores de papel aluminio y el plástico metalizado se cortaron cinco pliegos de cada material de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ y fueron cuidadosamente adheridos sobre las cuatro paredes de cada concentrador y su base con cinta adhesiva.



Figura 12. Concentrador forrado de plástico metalizado

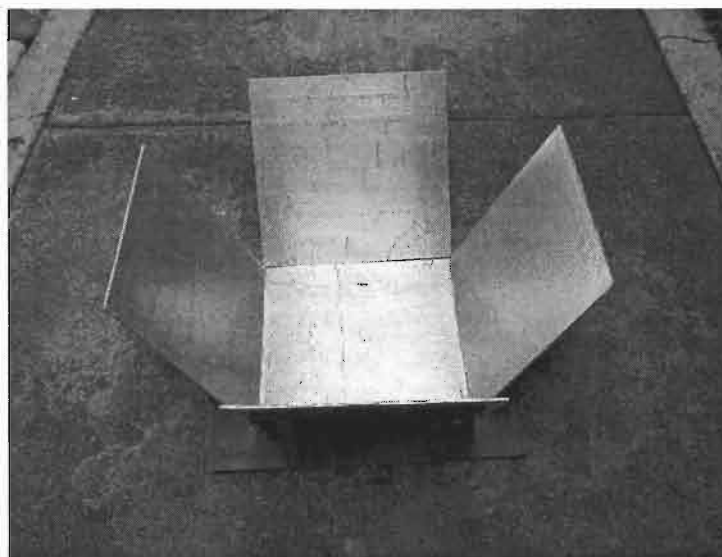


Figura 13. Concentrador forrado de cinta de aluminio

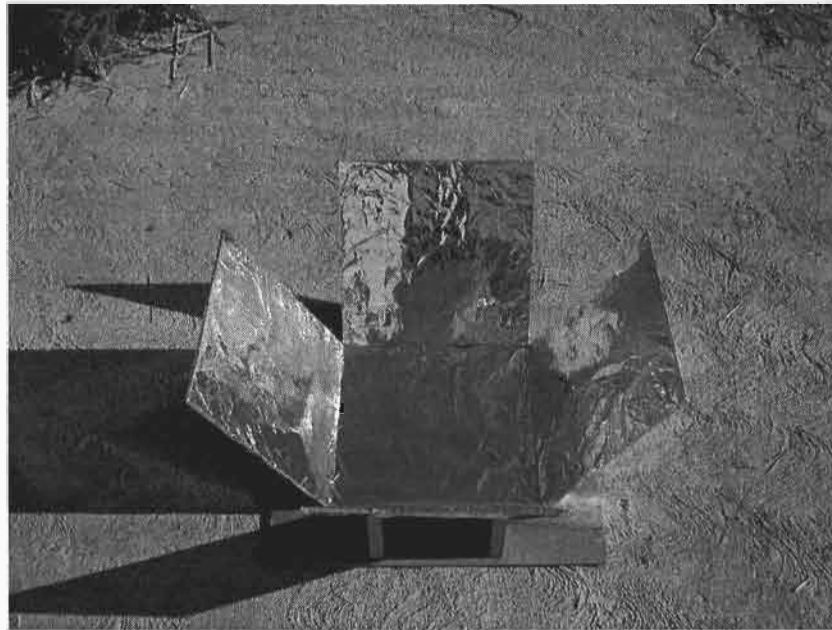


Figura 14. Concentrador forrado de papel aluminio

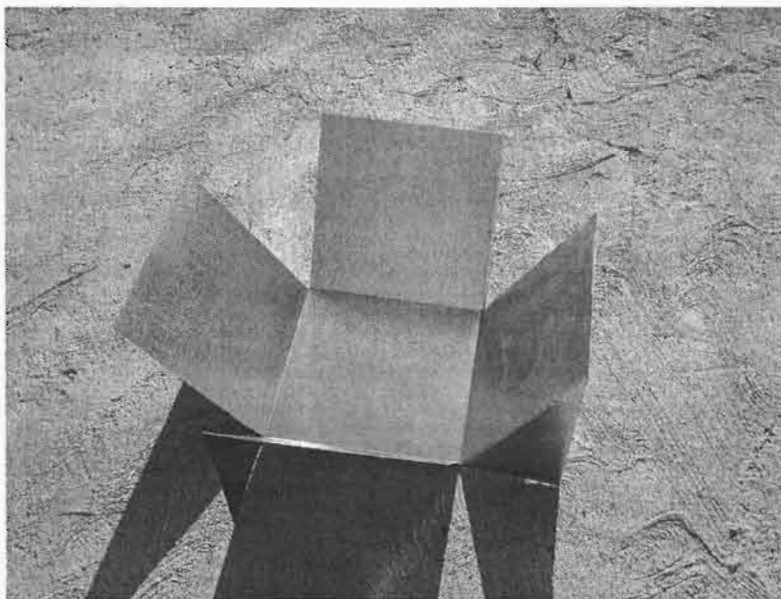


Figura 15. Concentrador de lámina galvanizada C-24

Durante el uso de los concentradores se observó que al limpiar el de plástico metalizado (con papel higiénico y algodón) se rayaba fácilmente y esto ocasiona la pérdida de reflectancia.

Desde el punto de vista de fabricación y uso, la cinta de aluminio adherible, comparada con el papel aluminio y el plástico metalizado, resultó ser más fácil de limpiar para conservar su color y brillo inicial.

Una de las grandes ventajas de la cinta de aluminio, es ser altamente resistente a la intemperie, al mismo tiempo su maleabilidad al forrar el concentrador de paredes planas, ya que no se rompe tan fácilmente y es autoadherible.

El concentrador de lámina galvanizada es muy resistente a la intemperie pero su fabricación resulta ser complicada debido al corte y dobleces de la misma.

4.5. Prueba de Transmitancia

La prueba de transmitancia fue realizada a una botella de plástico nueva, utilizada para las pruebas de desinfección (plástico de refresco no retornable marca conocida), con el fin de observar qué tanto pueden pasar los rayos solares a través del plástico de ésta. Se utilizó el mismo espectrofotómetro con el que se realizaron las pruebas de reflectancia. Como se puede observar, la transmitancia de la botella PET es mejor (>80%) para longitudes de onda del espectro visible; sin embargo, el intervalo de UV se encuentra entre 5.5 y 79 por ciento (tabla 12 y Figura 16).

Tabla 12. Transmitancia de la botella de plástico coca cola

Longitud de Onda (nm)	Transmitancia (%)	L. Onda (nm)	Transmitancia (%)
700	85.19	500	83.78
690	85.16	490	83.64
680	85.13	480	83.48
670	85.12	470	83.26
660	85.08	460	83.04
650	84.99	450	82.75
640	84.95	440	82.39
630	84.84	430	81.79
620	84.8	420	81.18
610	84.75	410	80.32
600	84.68	400	79.32
590	84.59	390	78.16
580	84.48	380	76.76

570	84.42	370	73.87
560	84.42	360	68.5
550	84.25	350	61.17
540	84.23	340	52.85
530	83.92	330	39.63
520	84.03	320	5.539
510	83.89		

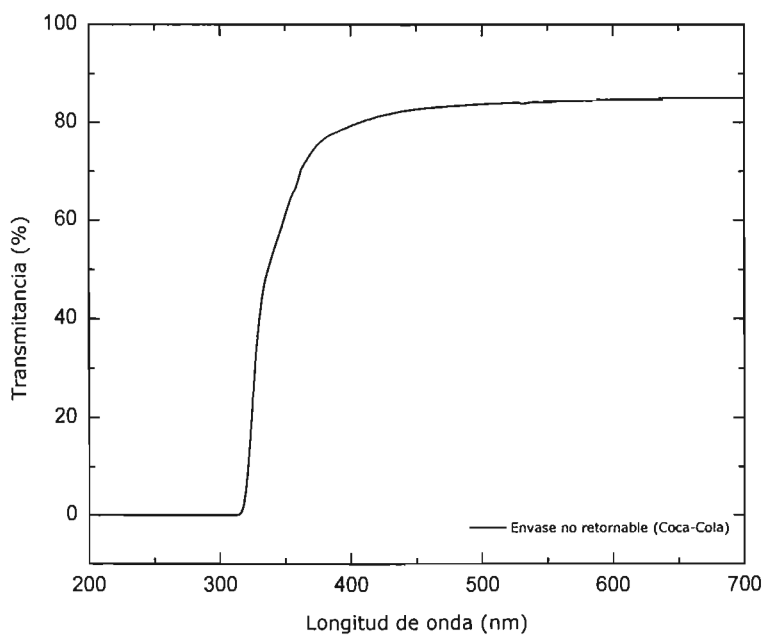


Figura 16. Gráfica de transmitancia de la botella de plástico utilizada en las pruebas actinométricas y bacteriológicas

4.6. Determinación de la radiación útil

Después de las pruebas de reflectancia y de haber seleccionados los materiales con mayor porcentaje de reflectancia, se realizaron las pruebas actinométricas. Los resultados de las pruebas actinométricas se muestran en la tabla 14 en donde C_0 es concentración inicial y C_t es concentración remanente de ácido oxálico, así como la radiación acumulada (W_T) para

cada día en que se realizaron las pruebas, la hora estándar (hora local) y la condición climática de cada prueba.

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 intervalo de medición espectral es de 305 nm a 2800 nm, de la cual el intervalo de 300 a 546 nm de la densidad de potencial corresponde aproximadamente el 35% (Blanco y Malato, 2000).

Se calculó la energía absorbida en las botellas contenidas dentro del concentrador, utilizando las fórmulas de la metodología de Curcó y colaboradores, 1996.

La relación entre la radiación entrante y la radiación que llega al sistema en la superficie del concentrador solar puede ser establecida a través de dos factores: factor de eficiencia (Φ_{ef}) y factor de transmitancia ($\Phi_{T\lambda}$). El factor de eficiencia está relacionado con las características geométricas del concentrador y la posición con respecto al sol y es independiente de las longitudes de onda. El factor de transmitancia depende del material de la botella y de las longitudes de onda.

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

$$\Phi_{ef} = \frac{(C_0 - C_t)}{W_t} \left[\frac{(V_T NahCv)}{S_{mod} n_{mod}} \right] \left[\frac{1}{\sum_{300}^{546} \{ \lambda_1 f_{\lambda} [1 - \exp(-\alpha D)] \phi_{\lambda} \Phi_{T\lambda} \}} \right] \quad (4.1)$$

$$F_{abs} = \frac{\Phi_{ef} S_{mod} n_{mod}}{NahCv} W_T \sum \lambda f_{\lambda} [1 - \exp(-\alpha_{\lambda} D)] \Phi_{T\lambda} \quad (4.2)$$

$$F_e = \Phi_{col} \Phi_{ef} W_T \quad (4.3)$$

$$\Phi_{col} = \frac{n_{mod} S_{mod}}{NahCv} \sum_{300}^{546} \lambda f_{\lambda} \Phi_{T\lambda} \quad (4.4)$$

Donde:

C_0 = concentración inicial del ácido oxálico a t_0 (tiempo inicial), mol/L

C_t = concentración del ácido oxálico al tiempo de exposición t , mol/L

W_T = energía total acumulada en el lapso de t_0 a t , J/m^2

N_a = número de Avogadro, $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ o $eins^{-1}$

h = constante de Plank, $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

C_v = velocidad de la luz, $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

V_t = volumen total del reactor (una botella = 0.002 m^3)

S_{mod} = superficie de colección, 0.375 m^2

n_{mod} = número de módulos, igual a 1

D = diámetro promedio de la botella, 0.093 m

λ = longitud de onda, de 300 a 540 nm

f_λ = distribución espectral

α_λ = Coeficiente de absorción del líquido, cm^{-1}

ϕ_λ = producción cuántica

$\Phi_{T\lambda}$ = transmitancia del plástico de la botella

Φ_{col} = eficiencia del colector

Los valores de f_λ , α_λ , y ϕ_λ se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Valores de la distribución espectral (Curcó *et al.*, 1996)

λ (nm)	f_λ	α_λ	ϕ_μ
300	0.001375	13	0.55
310	0.00631	13	0.55
320	0.01305	13	0.55
330	0.017716	8	0.55
340	0.019208	5	0.55
350	0.020648	2.7	0.55
360	0.024171	1.3	0.55
370	0.026008	0.65	0.55
380	0.024858	0.39	0.55
390	0.028971	0.37	0.55
400	0.043274	0.37	0.55
410	0.047135	0.37	0.55
420	0.046025	0.37	0.55
430	0.047172	0.35	0.55
440	0.054951	0.34	0.55
450	0.059268	0.31	0.55
460	0.060053	0.24	0.55

470	0.060916	0.17	0.47
480	0.059879	0.09	0.37
490	0.060366	0.04	0.29
500	0.059887	0.022	0.22
510	0.05825	0.014	0.18
520	0.058636	0.08	0.12
530	0.060175	0.06	0.08
540	0.041641	0.04	0.02

Con el coeficiente de eficiencia y el valor de la energía solar acumulada durante las pruebas bacteriológicas, se puede estimar la radiación útil o dosis recibida por el agua dentro de las botellas (F_{abs}).

Es importante calcular el tiempo solar basado en el movimiento angular del sol. Éste no coincide con la hora local. Es necesario para convertir el tiempo estándar a tiempo solar, aplicar dos correcciones (diferencias de longitudes y la ecuación del tiempo):

- Primera, hay una corrección constante por la diferencia de longitudes entre los meridianos observados (longitud) y el meridiano sobre el cual el tiempo local estándar está basado. Al sol le lleva 4 minutos transcurrir 1° de longitud.
- La segunda corrección es desde la ecuación del tiempo, la cual se toma contando la perturbación en la velocidad de rotación de la tierra y afecta el tiempo del sol cruzando el meridiano del observador.

El tiempo solar es el tiempo basado en el aparente movimiento angular del sol en el cielo, cuando el sol atraviesa el meridiano del observador.

La diferencia en minutos entre el tiempo solar y el tiempo estándar (Duffie y Beckman, 1991):

$$\text{Tiempo solar} = \text{Tiempo estándar} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (4.5)$$

donde L_{st} es el meridiano estándar para la zona del tiempo local, L_{loc} es la longitud de la locación en cuestión (en el este gradualmente) y E es la ecuación de tiempo (en minutos);

$$E = 229.9[0.000075 + 0.00188 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B] \quad (4.6)$$

donde
$$B = (n-1) \frac{360}{365} \quad (3.7)$$

y n es el número de día $1 \leq n \leq 365$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4.10)$$

donde:

R_b = Factor geométrico

Y los ángulos adicionales que describen la posición del sol en el cielo son los siguientes:

θ_z = ángulo cenit, es el ángulo entre la vertical y la línea del sol ejemplo, el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie horizontal (figura 17a)

ϕ = latitud: es la localización angular norte o sur del ecuador, norte positiva $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

δ = declinación: es la posición angular del sol al medio día solar (por ejemplo, cuando el sol está sobre el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte positivo, $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

β = inclinación: es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ($\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene un componente inclinado hacia abajo).

γ = ángulo acimutal de la superficie: es la desviación de la proyección sobre un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero directamente al Sur; Este negativo y Oeste positivo (figura 17b);

$$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ.$$

ω = ángulo hora, es el desplazamiento angular del sol del Este u Oeste, del meridiano local directamente a la rotación de la tierra sobre ésta, ejemplo: 15° por hora en la mañana negativo y en la tarde positivo.

θ = ángulo de incidencia, es el ángulo entre el rayo de radiación sobre una superficie y la normal a esa superficie.

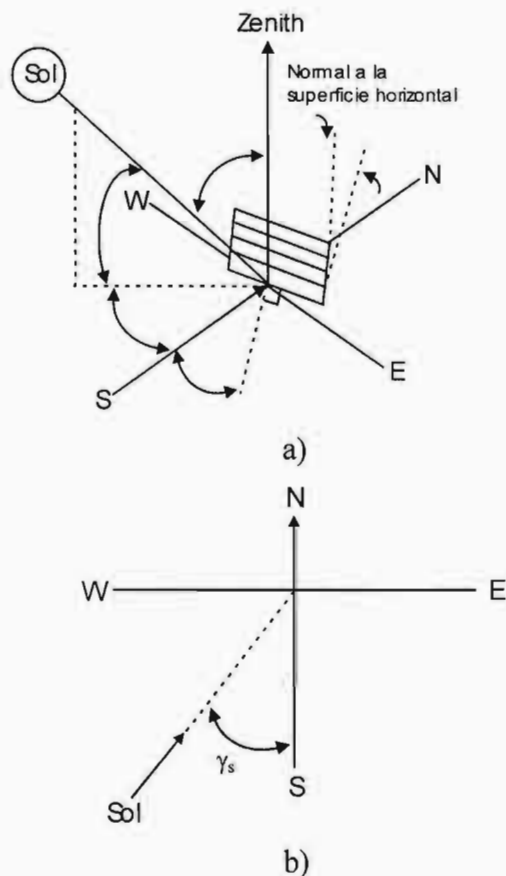


Figura 17. (a) ángulo Cenit, inclinación, ángulo de la superficie azimutal y ángulo solar azimutal para una superficie inclinada. (b) Vista del plano observado por el ángulo solar azimutal

Para nuestro caso estos son los valores de cada ángulo:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (4.11)$$

$$\gamma = 0^\circ$$

$$\beta = 16.1^\circ$$

$$\phi = 18.87^\circ \text{ (IMTA)}$$

los demás ángulos dependen de la hora en la que se realizaron las pruebas.

Para calcular la radiación acumulada real que llega al IMTA (realización de pruebas actinométricas y de desinfección), se multiplica el factor geométrico (R_b) con el valor de la radiación acumulada medida en el tiempo de prueba:

$$R_{real} = R_{acumulada} * R_b \quad (4.12)$$

Estos cálculos se realizan para cada hora en que se llevarán a cabo pruebas actinométricas y bacteriológicas.

Los resultados finales de la radiación útil dentro de botellas en función de su ubicación, día, condiciones climáticas, hora y tipo de material reflectante, se presenta en la tabla 14

Tabla 14. Resultados de las radiaciones de entrada (F_e) y útil (F_{abs}) en las botellas puestas en los concentradores

Tiempo solar	Botella	Concentrador	Día	Hora estándar	WT (J/m^2)	Co (mol/m^3)	Ct (mol/m^3)	Co - Ct (mol/L)	Φ_{ef}	Φ_{col}	Fe (eins)	F _{abs} (eins)
9:21-9:41	Testigo		15/01/02	10:08-10:28	298626	48.655	45.79	2.86	0.296	2.2E-07	0.0192	0.0127
10:43-11:03	Testigo			11:30-11:50	378325	45.79	42.45	3.34	0.272	2.2E-07	0.0224	0.0148
12:13-12:33	Testigo			13:00-13:20	388490	42.45	38.637	3.81	0.303	2.2E-07	0.0256	0.0169
12:20-12:40	BIZQ	Papel	9-10/01/02	13:00-13:20	381446	62.01	53.9	8.11	0.148	9.6E-07	0.0545	0.0358
12:26-12:46	BCEN	aluminio		13:00-13:20	385135	53.9	47.22	6.68	0.121	9.6E-07	0.0449	0.0295
12:20-12:40	BIZQ	Lámina	9-10/01/02	13:00-13:20	381446	62.01	56.76	5.25	0.096	9.6E-07	0.0353	0.0232
12:26-12:46	BCEN	galvanizada		13:00-13:20	380966	49.85	43.403	6.45	0.118	9.6E-07	0.0433	0.0285
9:31-9:51	BIZQ	Plástico	18/01/2002	10:08-10:28	270462	45.315	42.9315	2.38	0.061	9.6E-07	0.0160	0.0105
10:53-11:13		metalizado	18/01/02	11:30-11:50	364091	38.64	31.48	7.16	0.137	9.6E-07	0.0481	0.0316
12:23-13:43			18/01/02	13:00-13:20	382713	39.59	33.512	6.07	0.111	9.6E-07	0.0408	0.0269
9:31-9:51	BCEN	Plástico	18/01/2002	10:08-10:28	270462	45.555	42.213	3.34	0.086	9.6E-07	0.0224	0.0148
10:53-11:13		metalizado	18/01/02	11:30-11:50	364091	37.68	31.48	6.2	0.119	9.6E-07	0.0416	0.0274
12:23-13:43			18/01/02	13:00-13:20	382713	38.89	33.39	5.5	0.100	9.6E-07	0.0369	0.0243
9:31-9:51	BDER	Plástico	18/01/2002	10:08-10:28	270462	46.508	43.407	3.10	0.079	9.6E-07	0.0208	0.0137
10:53-11:13		metalizado	18/01/02	11:30-11:50	364091	38.16	31.48	6.68	0.128	9.6E-07	0.0449	0.0295
12:23-13:43			18/01/02	13:00-13:20	388629	31.48	24.566	6.91	0.124	9.6E-07	0.0464	0.0306
10:43-11:03	BIZQ	cinta	02/04/02	11:30 - 11:50	389316	41.31	32.35	8.96	0.161	9.6E-07	0.0602	0.0396
11:43-12:03		adherible de		12:30 - 12:50	410842	32.35	25.39	6.96	0.118	9.6E-07	0.0467	0.0308
12:43-13:03		aluminio		13:30 - 13:50	406502	25.39	18.42	6.97	0.119	9.6E-07	0.0468	0.0308
10:43-11:03	BCEN	cinta	02/04/02	11:30 - 11:50	389316	41.56	34.84	6.72	0.120	9.6E-07	0.0451	0.0297
11:43-12:03		adherible de		12:30 - 12:50	410842	34.84	29.37	5.47	0.093	9.6E-07	0.0367	0.0242
12:43-13:03		aluminio		13:30 - 13:50	406502	29.37	24.89	4.48	0.077	9.6E-07	0.0301	0.0198
10:44-11:04	Testigo		03/04/02	11:30 - 11:50	384871	48.27	44.29	3.98	0.319	2.2E-07	0.0267	0.0176
11:44-12:04				12:30 - 12:50	376214	44.29	39.82	4.47	0.367	2.2E-07	0.0300	0.0198
12:44-13:04				13:30 - 13:50	402440	39.82	36.33	3.49	0.268	2.2E-07	0.0234	0.0154

Nomenclatura:

BIZQ Botella izquierda

BCEN Botella central

BDER Botella derecha

F_e radiación de entrada

F_{abs} radiación absorbida

En la tabla 15 se resumen las condiciones climáticas de los días de las pruebas actinométricas.

Tabla 15. Condiciones climáticas de los meses de prueba de intemperización (promedio)

Fecha	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Energía acumulada (W-h/m ²)	Lluvia (mm/día)
09/01/02	17.77	33.28	4923.394	0
10/01/02	17.95	28.23	4991.122	0
11/01/02	22.40	21.00	4892.235	0
15/01/02	16.20	58.24	5204.024	0
18/01/02	19.36	40.5	5134.878	0
02/04/02	26.19	39.70	6508.694	0
03/04/02	25.83	32.25	6797.949	0

Como se puede observar en la tabla 16 y en la figura 18 el material que registró mayor radiación útil o absorbida (botella izquierda) fue el papel aluminio Alupak con un valor de radiación útil de 0.0358 eins (ein es un mol de fotones), siguiéndole la cinta de aluminio con 0.0308 eins, después el plástico metalizado con 0.0269 eins y por último la lámina galvanizada con 0.0232 eins. Las condiciones climáticas fueron similares en los días de pruebas.

Tabla 16. Comparación de la radiación útil de la botella izquierda, utilizando cuatro tipos de materiales reflectantes

eins	Botella izquierda (13:00-13:20)			
	Plástico Metalizado (18/01/02)	Lámina galvanizada C-24 (9/01/02)	Papel aluminio (9/01/02)	Cinta aluminio (2/04/02)
Fabs	0.0269	0.0232	0.0358	0.0308

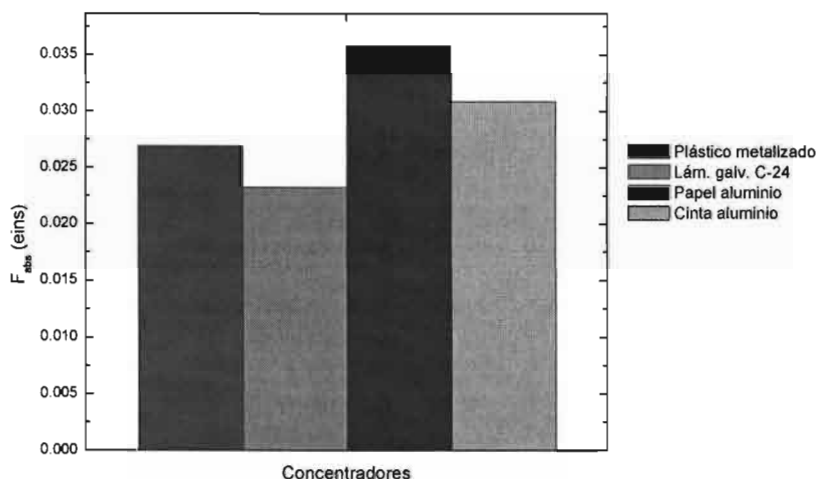


Figura 18. Comparación de la radiación útil de la botella izquierda, utilizando cuatro concentradores con diferentes materiales reflectantes

En la tabla 17 y en la figura 19 se observa que la radiación útil varió con respecto a cada posición de las botellas dentro del concentrador, de plástico metalizado, resultando mejor la botella central en la primera hora de muestreo (0.0148 eins); en la segunda hora de muestreo la mejor botella fue la izquierda (0.0316 eins) y a la tercer hora la botella derecha (0.0306 eins). Lo que se esperaba era que: en la primera hora de medición, la botella

izquierda recibiera mayor radiación solar que las demás, debido a la reflexión de la pared opuesta, mientras que para la botella central fuera en el medio día solar. Esto posiblemente sucedió debido a una nube que obstaculizó la llegada de los rayos solares a esas horas de medición.

Tabla 17. Radiación útil, utilizando el plástico metalizado en el concentrador el día 18/01/02, (medio día solar 12:03 hrs.)

Botella	F_{abs} (eins)		
	10:18	11:40	13:10
Izq.	0.0105	0.0316	0.0269
Cent.	0.0148	0.0274	0.0243
Der.	0.0137	0.0295	0.0306
Testigo	0.0127	0.0148	0.0169

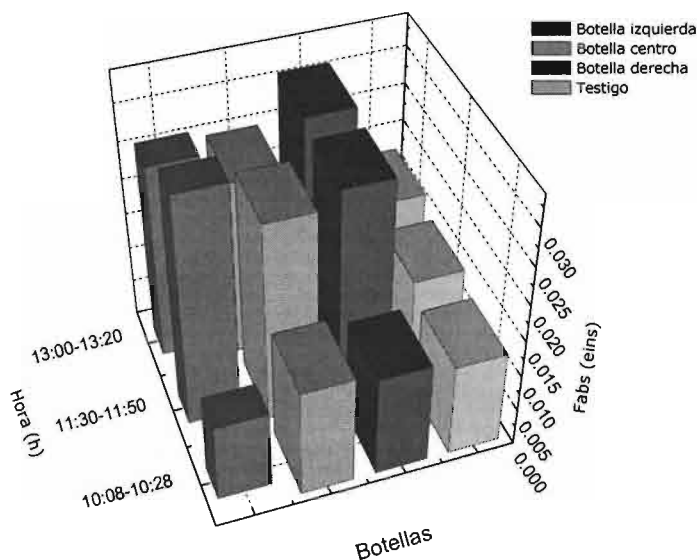


Figura 19. Radiación útil, utilizando el plástico metalizado en el concentrador

En la tabla 18 y en la figura 20 se observa el comportamiento de las botellas en el concentrador de cinta de aluminio; donde la botella que resultó con mayor radiación absorbida o útil, fue la botella izquierda, a cualquier hora. La botella izquierda recibió en la primera hora de medición 2.25 veces la F_{abs} que el testigo, en la segunda hora 1.555 veces mejor y en la tercera hora de 2 veces. En la primera hora de medición la botella central recibió 1.6875 veces la F_{abs} de la testigo, en la segunda hora de medición 1.2222 veces y en

la tercer hora 1.286 veces. Esto se debe, a la irradiación solar y a la reflectancia que ejerce la pared lateral de la botella izquierda, hacia la botella, ya que es la primera que recibe los rayos solares durante la prueba (antes y durante el tiempo solar).

Esto indica que utilizando el concentrador se incrementa la radiación útil en las botellas dentro de éste, acelerando la inactivación de microorganismos presentes en el agua de las botellas, con una energía total acumulada incidente de 406502 J/m^2 (112.917 W-h/m^2) al medio día solar (12:40 hrs).

Tabla 18. Radiación útil, utilizando la cinta de aluminio en el concentrador el día 2/04/02

Botella	F _{abs} (eins)		
	11:40	12:40	13:40
Izq.	0.0396	0.0308	0.0308
Cent.	0.0297	0.0242	0.0198
Testigo	0.0176	0.0198	0.0154

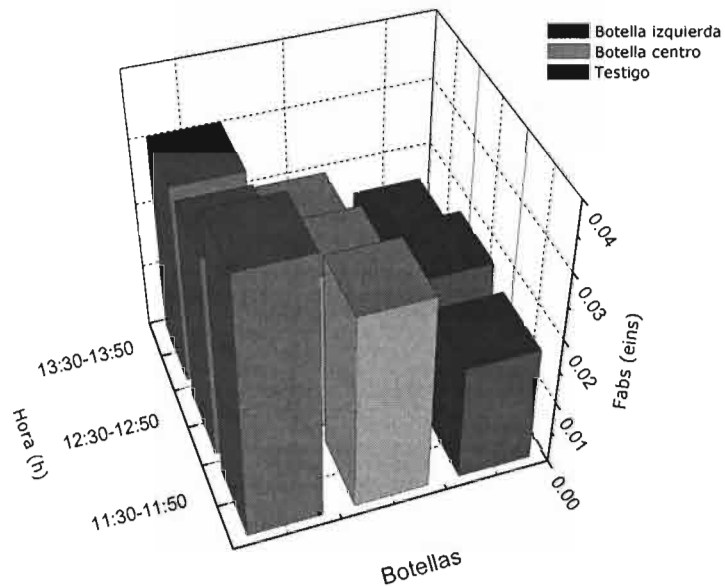


Figura 20. Radiación útil, utilizando la cinta de aluminio en el concentrador

A continuación se muestra la foto de las pruebas actinométricas con la cinta de aluminio (material con mayor radiación útil), figura 21:



Figura 21. Exposición del concentrador de cinta de aluminio con las tres botellas, en la prueba actinométrica

4.7. Pruebas de Desinfección

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de desinfección utilizando los concentradores con los diferentes materiales seleccionados (la referencia o testigo para cada prueba fue el concentrador de papel aluminio).

Para estas pruebas se utilizaron solo las botellas izquierdas y centrales en los concentradores, ya que el comportamiento de las botellas derechas fue similar a las primeras, durante los tiempos de exposición de estas (Martín *et al.*, 1999).

En la tabla 19 y 20 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de desinfección de los coliformes totales y *E. coli*, respectivamente y en la tabla 21 las temperaturas alcanzadas del agua dentro de las botellas en los diferentes concentradores.

Tabla 19. Comportamiento de coliformes totales (NMP/100mL) en las botellas izquierdas con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía recibida el día 15/01/02

Hora (h)	Materiales Reflectantes			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Plástico metalizado	Papel aluminio	Lámina galvanizada	
	(NMP/100mL)			
10:00	241920	241920	241920	0
12:00	155307	98040	198628	1054
14:00	1	1	1935	2603
16:00	1	1	63.8	4058

Tabla 20. Comportamiento de *E. Coli* (NMP/mL) en las botellas izquierdas con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía recibida el día 15/01/02

Hora (h)	Materiales Reflectantes			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Plástico metalizado	Papel aluminio	Lámina galvanizada	
	(NMP/100mL)			
10:00	43520	43520	43520	0
12:00	10360	18920	8370	1054
14:00	1	1	888	2603
16:00	1	1	22.6	4058

Tabla 21. Temperaturas (°C) alcanzadas en las botellas izquierdas en los diferentes concentradores el día 15/01/02

Hora (h)	Materiales Reflectantes			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Plástico metalizado	Papel aluminio	Lámina galvanizada	
	°C			
10:00	24	24	24	0
12:00	41.4	38.2	44.7	1054
14:00	52.7	56.4	46	2603
16:00	44	50.2	39.5	4058

Como se muestra en la figura 22, las botellas izquierdas que contiene el concentrador de papel aluminio y el plástico metalizado lograron disminuir cinco unidades logarítmicas de coliformes totales en cuatro horas, con una energía acumulada incidente de aproximadamente 2500 W-h/m². En el concentrador de papel aluminio se obtuvo una mayor temperatura (56.4°C a las 14:00 hrs.) que la observada en el plástico metalizado y la lámina galvanizada C-24. A pesar de que la lámina es un material muy resistente, no se logró una desinfección adecuada. Para la inactivación de *E. coli* (figura 23) en el concentrador de plástico metalizado empezó a decaer más rápidamente que en el de papel aluminio, pero a las cuatro horas de exposición se había logrado la inactivación total de *E. coli* en ambos casos, en tanto que en la lámina galvanizada no se había logrado la inactivación total en seis horas.

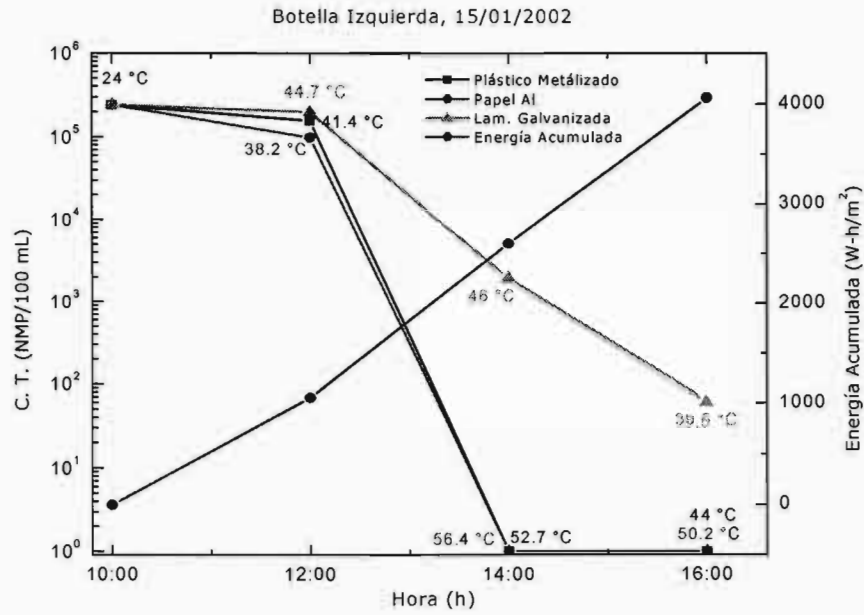


Figura 22. Coliformes totales registrados en la botella izquierda en tres concentradores diferentes

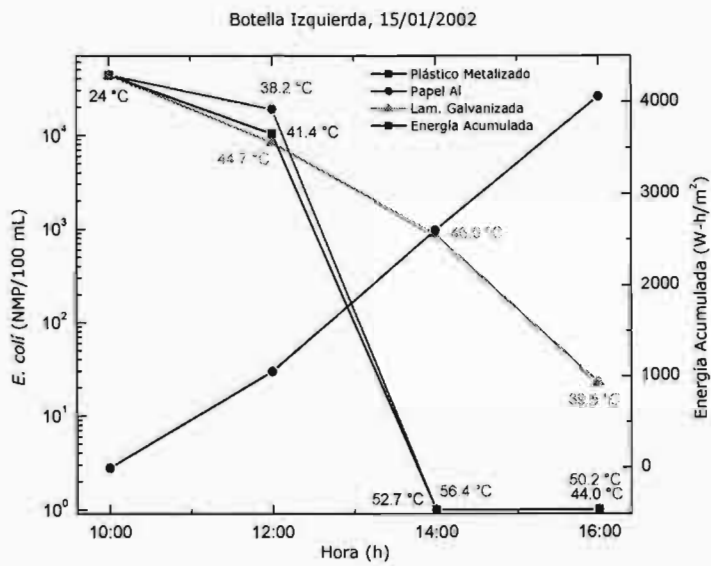


Figura 23. *E. coli* registrados en la botella izquierda en tres concentradores diferentes

En la tabla 22, 23 y 24 se presentan los valores para coliformes totales, *E. coli* y temperaturas de las botellas centrales con los tres materiales reflectantes seleccionados.

Tabla 22. Comportamiento de coliformes totales (NMP/mL) en las botellas centrales con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía acumulada el día 15/01/02

Hora (h)	Materiales Reflectantes			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Plástico metalizado	Papel aluminio	Lámina galvanizada	
	(NMP/100mL)			
10:00	241920	241920	241920	0
12:00	198628	198628	141360	1054
14:00	10	1	748	2603
16:00	1	1	11	4058

Tabla 23. Comportamiento de *E. coli* (NMP/mL) en las botellas centrales con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía recibida el día 15/01/02

Hora (h)	Materiales Reflectantes			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Plástico metalizado	Papel aluminio	Lámina galvanizada	
	(NMP/100mL)			
10:00	43520	43520	43520	0
12:00	7950	12420	5980	1054
14:00	10	1	314	2603
16:00	1	1	5.2	4058

Tabla 24. Temperatura (°C) de las botellas centrales con los tres materiales reflectivos seleccionados y energía acumulada el día 15/01/02

Hora (h)	Materiales Reflectantes			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Plástico metalizado	Papel aluminio	Lámina galvanizada	
	°C			
10:00	24	24	24	0
12:00	38.7	37.5	39.3	1054
14:00	52.2	53.0	47.4	2603
16:00	48.4	52.0	43.3	4058

Como se puede observar en la figura 24 el concentrador forrado con el papel aluminio logró inactivar el total de coliformes totales en cuatro horas con una temperatura final de 53°C, siendo ésta, la temperatura más alta registrada durante la prueba; con el concentrador de plástico metalizado se logró la total inactivación a las seis horas de exposición con una temperatura final 48.4°C, en tanto que con la lámina galvanizada no se logró su total inactivación. En la figura 25 se muestra la inactivación de *E. coli* en la que el papel aluminio logró la total inactivación en cuatro horas y los demás materiales se comportaron de igual manera que en la inactivación de coliformes totales.

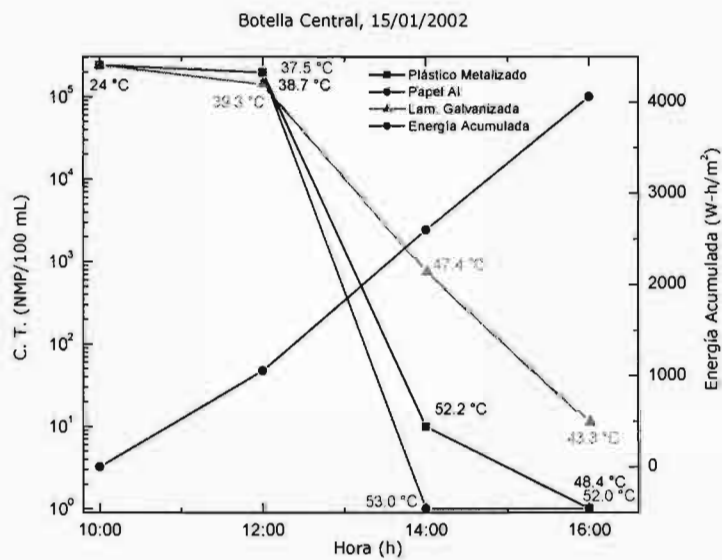


Figura 24. Coliformes totales registrados en la botella central en tres concentradores diferentes

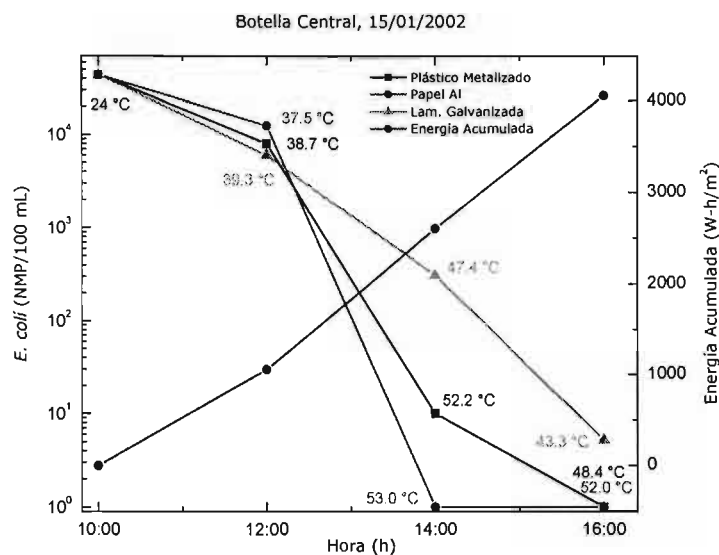


Figura 25. *E. coli* registrados en la botella central en tres concentradores diferentes

Comparando las cuatro gráficas anteriores (botellas izquierda y central de los materiales plástico metalizado, papel aluminio y lámina galvanizada) se observa que se alcanza una temperatura mayor en las botellas izquierdas que en las centrales en las dos primeras horas de exposición, a las cuatro horas de exposición las botellas centrales incrementan su temperatura, muy semejante a las de las botellas izquierdas, y a las seis horas de exposición las botellas centrales presentan mayor temperatura que las botellas izquierdas; en tanto que el concentrador de lámina galvanizada disminuyó gradualmente la temperatura de la botella izquierda, siendo mayor la temperatura en la botella central a las 16:00 horas.

En las botellas izquierdas se logró una inactivación total de coliformes totales y *E. coli* en cuatro horas sólo en los concentradores de plástico metalizado y papel aluminio, mientras que en el concentrador de lámina galvanizada no se logró tal inactivación como se esperaba, debido a que la lámina galvanizada no tiene un alto porcentaje de reflectancia.

En las siguientes figuras (26-28) se muestran las fotos de los tres concentradores utilizados en las prueba anteriores:

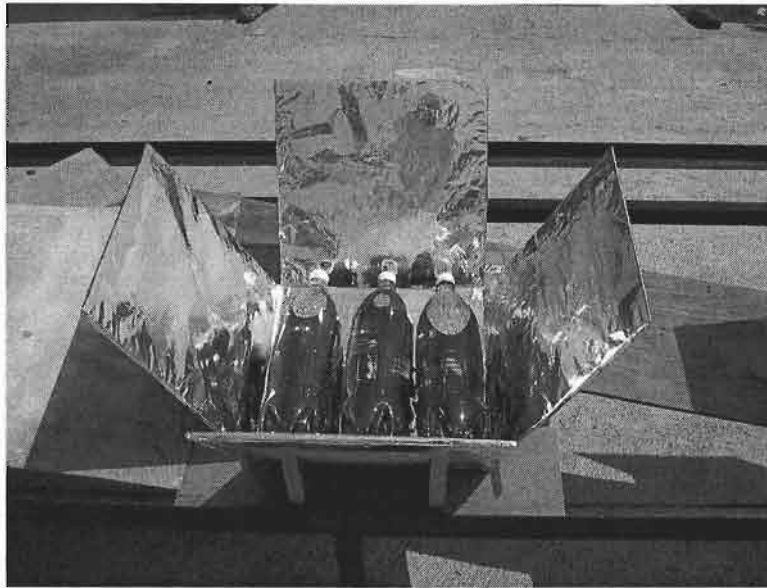


Figura 26. Prueba bacteriológica utilizando el concentrador con plástico metalizado



Figura 27. Botellas contenidas en el concentrador de plástico metalizado

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

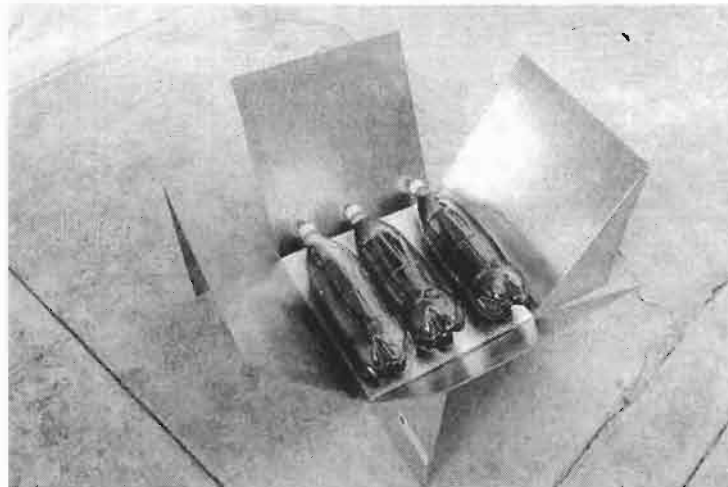


Figura 28. Botellas contenidas en el concentrador de lámina galvanizada

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de decaimiento de coliformes totales, *E. coli* y de temperatura utilizando las tres botellas en el concentrador con cinta de aluminio, tablas 25, 26 y 27 respectivamente.

Tabla 25. Comportamiento de coliformes totales (NMP/100mL) en las tres botellas del concentrador de cinta aluminio el día 27/05/02

Hora (h)	Botellas				Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Izquierda	Central	Derecha	Testigo	
	(NMP/100mL)				
09:55	37300	37300	37300	37300	0
11:55	1100	9620	15980	15150	1419
12:55	1	1	1	3180	2258
13:55	1	1	1	160	2770
15:55	1	1	1	1	4387

Tabla 26. Comportamiento de *E. coli* (NMP/100mL) en las tres botellas del concentrador de cinta aluminio el día 27/05/02

Hora (h)	Botellas				Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Izquierda	Central	Derecha	Testigo	
	(NMP/100mL)				
09:55	11800	11800	11800	11800	0
11:55	260	650	1310	2880	1419
12:55	1	1	1	510	2258
13:55	1	1	1	121	2770
15:55	1	1	1	1	4387

Tabla 27. Temperaturas (°C) en las tres botellas del concentrador de cinta aluminio el día 27/05/02

Hora (h)	Botellas				Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Izquierda	Central	Derecha	Testigo	
	(°C)				
09:55	25.8	25.8	25.8	25.8	0
11:55	48.0	44.8	40.3	41.4	1419
12:55	56.0	53.8	52.1	44.7	2258
13:55	61.2	60.9	59.9	47.2	2770
15:55	56.5	62.4	64.7	49.4	4387

Como se observa en la figura 29 las tres botellas alcanzaron la inactivación de coliformes totales a las tres horas de exposición solar, iniciando la botella izquierda, posteriormente la botella central y por último la botella derecha. En cambio la botella testigo (sin concentrador) requirió de seis horas de exposición a la radiación solar para llegar a la inactivación de coniformes totales, El mismo comportamiento se presentó para inactivar *E. coli* (figura 30), llegando a una temperatura de 56°C en la botella izquierda a las tres horas de exposición, logrando así la mayor temperatura registrada en el tiempo de prueba, comparado con las otras dos botellas expuestas (53.8°C botella central y 52.1°C botella derecha).

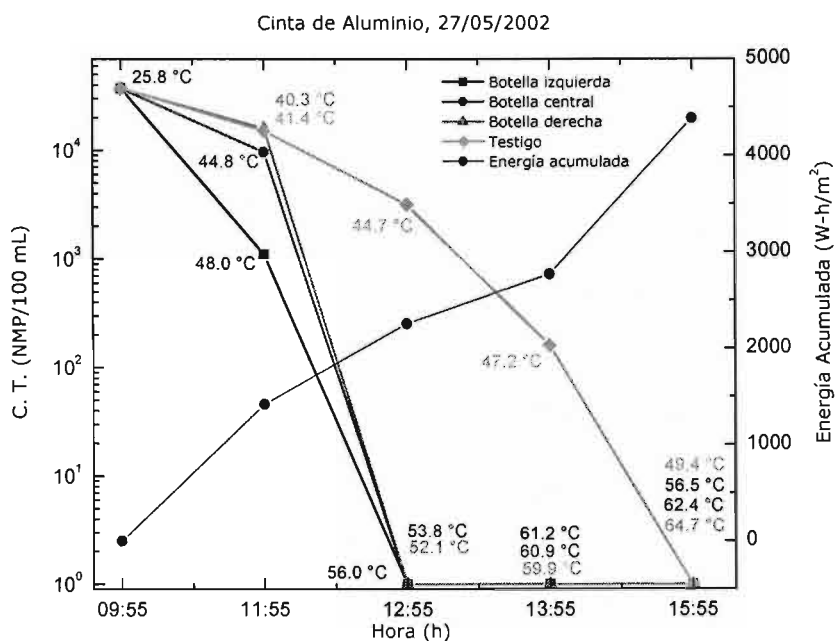


Figura 29. Coliformes totales registrados en las botellas contenidas en el concentrador de cinta de aluminio

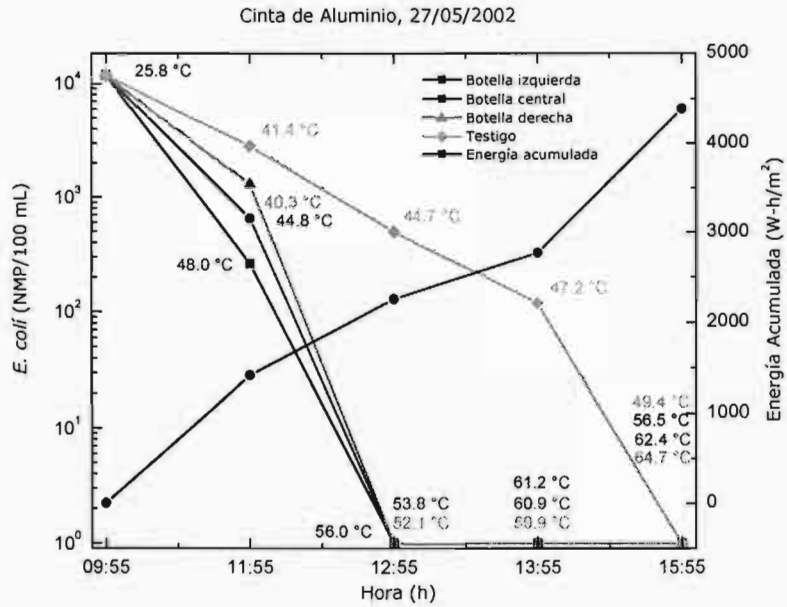


Figura 30. *E. coli* registrados en las botellas contenidas en el concentrador de cinta de aluminio

A continuación se muestran en las figuras 31 a la 33 las fotos de esta prueba:

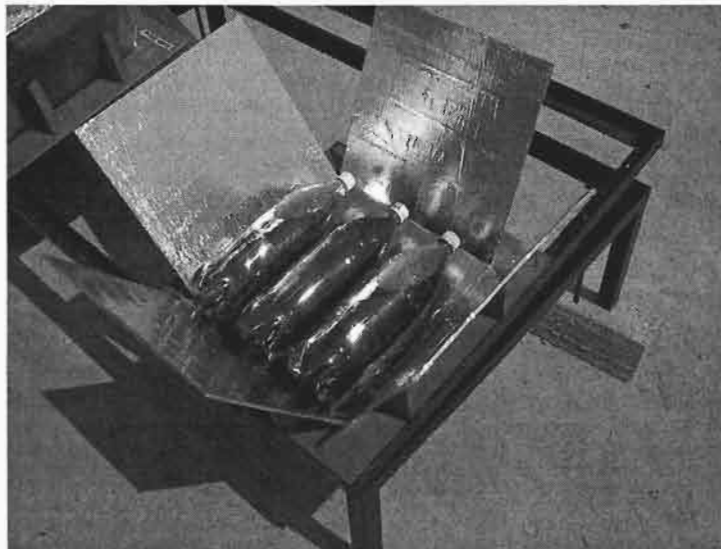


Figura 31. Prueba de desinfección solar utilizando el concentrador con cinta de aluminio



Figura 32. Botellas contenidas en el concentrador de cinta de aluminio



Figura 33. Comparación del plástico metalizado y la cinta de aluminio colocadas en el concentrador solar después de realizar las pruebas

En las tablas 28 a la 30 se observan los valores de coliformes totales y *E. coli* de los concentradores de cinta de aluminio, papel aluminio, al igual que el testigo (que es una botella expuesta a la radiación solar sin concentrador) en la inactivación de coliformes totales, *E. coli* y temperaturas alcanzadas en cada caso.

Tabla 28. Comportamiento de coliformes totales (NMP/100mL) en las botellas centrales con los dos mejores materiales seleccionados, el día 13/05/02

Hora (h)	Materiales			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Cinta aluminio	Papel aluminio	Testigo	
	(NMP/100mL)			
09:45	187200	187200	187200	0
11:45	92080	61310	68670	1271
12:45	1725	327	29090	2126
13:45	1	1	2400	3037
15:45	1	1	1	4759

Tabla 29. Comportamiento de *E. coli* (NMP/100mL) en las botellas centrales con los dos mejores materiales seleccionados, el día 13/05/02

Hora (h)	Materiales			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Cinta aluminio	Papel aluminio	Testigo	
	(NMP/100mL)			
09:45	17100	17100	17100	0
11:45	7230	5730	7030	1271
12:45	298	63	4190	2126
13:45	1	1	428	3037
15:45	1	1	1	4759

Tabla 30. Temperatura (°C) de las botellas centrales con los dos mejores materiales seleccionados, el día 13/05/02

Hora (h)	Materiales			Energía Acumulada (W-h/m ²)
	Cinta aluminio	Papel aluminio	Testigo	
	°C			
09:45	25	25	25	0
11:45	41.8	43.4	39.2	1271
12:45	50.8	50.7	43.3	2126
13:45	56.8	56.5	46.0	3037
15:45	63.2	60.1	49.4	4759

En ambos concentradores (Figura 34 y 35) la inactivación total de coliformes totales y *E. coli* se logró en cuatro horas de exposición con temperaturas similares y energías acumuladas de 3000 W-h/m². La temperatura más alta fue en la botella que contenía el concentrador de cinta de aluminio a las seis horas de exposición (63.2°C), siguiendo el concentrador de papel de aluminio (60.1°C) y por último la botella testigo (49.4°C). En las

dos primeras horas de exposición la botella central del concentrador de aluminio registró una mayor temperatura (43.4°C) que el concentrador de cinta de aluminio (41.8°C) y en las tres y cuatro horas de exposición las temperaturas de los dos concentradores fueron similares, pero a las seis horas la cinta de aluminio registró la mayor temperatura.

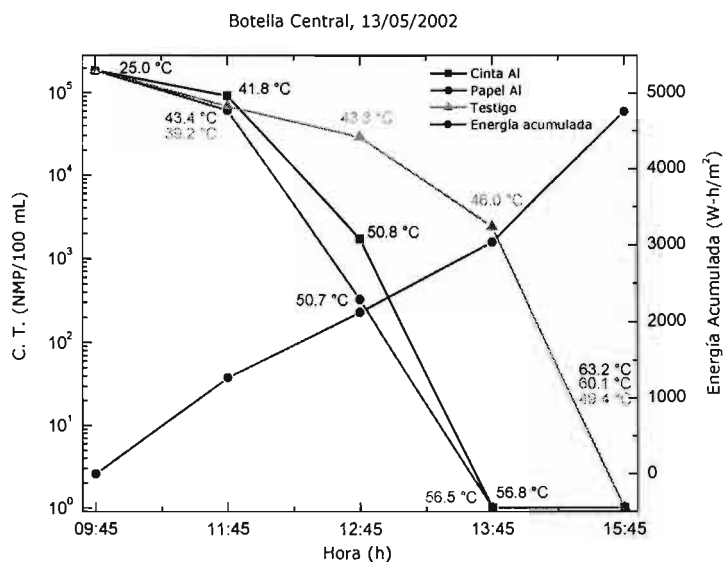


Figura 34. Coliformes totales registrados en las botellas centrales en dos concentradores

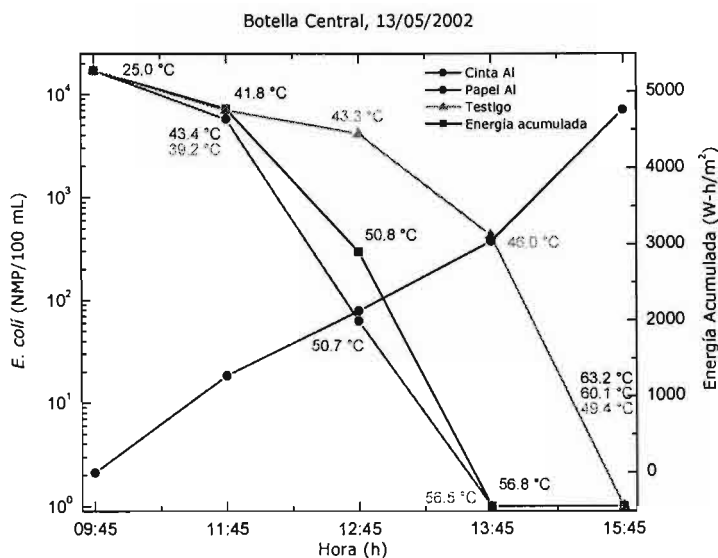


Figura 35. *E. coli* registrados en las botellas centrales en dos concentradores

En la siguiente tabla 31 se resume los valores obtenidos de las pruebas realizadas a los cuatro materiales seleccionados:

Tabla 31. Resumen de las pruebas realizadas a los cuatro materiales seleccionados

Material Reflectante	%Reflectancia nuevo (X_1)	%Reflectancia intemperie(X_2)	Diferencia (X_1-X_2)	F_{abs} (eins)	Tiempo desinfección (h)	Limpieza	Costo/ concentrador \$
Plástico metalizado	84.3	60.5	23.8	0.0269	4	delicada	42.5
Cinta de aluminio	68.4	26.1	42.3	0.0308	4	Fácil	70.83
Papel aluminio	56.4	22.8	33.6	0.0358	4	Delicada	32.72
Lámina galvanizada C-26	34.7	31.9	2.8	0.0232	>6	fácil	50.00

Nota: la radiación útil (F_{abs}) pertenece a la botella izquierda (misma hora)

Se observa en la tabla 31 que el mejor material reflejante para optimizar el concentrador solar es la cinta de aluminio, ya que la radiación absorbida es mayor que los dos materiales probados (plástico metalizado y lámina galvanizada C-26), y la limpieza de éste material es fácil y es un material durable al manejo.

CONCLUSIONES

Después de haber realizado las pruebas de reflectancia, intemperización, radiación útil y de desinfección, de los diferentes materiales reflectantes, se concluye lo siguiente:

- El material nuevo de mayor reflectancia fue el plástico metalizado (con un promedio de 84.3%); sin embargo, se deteriora con el uso, perdiendo su capacidad reflectiva al limpiarlo; el material que siguió fue la cinta de aluminio con una reflectancia del 68.4% en promedio, y cuya capacidad al exponerse a la intemperie disminuye al opacarse; y por último la lámina galvanizada C-24, que si bien es muy resistente a la intemperie, presenta poca capacidad reflectiva (34.7%). El papel aluminio (utilizado como referencia) obtuvo un promedio de 56.4% de reflectancia.
- La cinta de aluminio tiene una mayor resistencia a la intemperie y de manejo fácil por parte del usuario, en comparación con el papel aluminio y el plástico metalizado, sin embargo, la cinta de aluminio debe ser renovada una vez que se opaca. El único inconveniente que presenta el concentrador de cinta de aluminio con respecto al concentrador de papel aluminio es que es más costoso (aproximadamente 45% más). Por lo tanto, el mejor material reflectante y duradero fue la cinta de aluminio, y por ende el material adecuado para el concentrador solar de paredes planas.
- La mayor radiación útil (que penetra en las botellas y se absorbe por el agua) se presentó en la botella izquierda en el concentrador de cinta de aluminio con $F_{abs} = 0.0396$ eins; siguiéndole el papel aluminio con $F_{abs} = 0.0358$ eins en la botella izquierda. En tercer lugar fue el plástico metalizado con $F_{abs} = 0.0316$ eins en la botella izquierda y la botella testigo fue de 0.0176 eins, las pruebas se realizaron en días diferentes. Estos resultados sugieren que las botellas laterales reciben mayor radiación útil, independientemente del material con que esté forrado el concentrador, al observar que la radiación absorbida por el agua en una botella dentro del concentrador de cinta de aluminio puede incrementar hasta 2.25 veces

respecto a la botella testigo fuera del concentrador, dependiendo de la posición de la botella y de la hora del día, lo que concuerda con el diseño teórico del colector, que tiene una capacidad ideal de concentración de tres soles.

- Utilizando el concentrador forrado con cinta de aluminio se requiere un tiempo de exposición del agua de tres a cuatro horas para la disminución de cinco unidades logarítmicas de coliformes totales (total desinfección), en días soleados o con poca nubosidad, registrándose en la botella central una temperatura máxima de hasta 67.4°C y en el testigo una temperatura máxima de 52°C con un tiempo de exposición de seis horas, con el que se logra la completa inactivación de las bacterias.
- Para la desinfección total (reducción de 4-5 unidades logarítmicas) de coliformes totales y *E. coli* se requiere, en las botellas de los concentradores de plástico metalizado, cinta aluminio y papel aluminio, en todos los casos una energía acumulada entre 2500 y 3000 W-h/m², sin embargo, el testigo requiere de una radiación acumulada mayor de 4000 W-h/m².
- Esta técnica puede ser implementada en zonas rurales en donde las condiciones climáticas permitan el uso eficiente de este método, previa capacitación de promotores de salud y de los usuarios.

La desinfección de agua por medio de la radiación solar, utilizando el concentrador de paredes planas forrado con cinta de aluminio es una alternativa adecuada para las comunidades rurales, ya que no se requiere de una gran inversión para implementarla y mantenerla en funcionamiento; y así poder ayudar a las personas que no tienen otro medio para desinfectar agua, disminuyendo la incidencia de enfermedades causadas por el agua no desinfectada.

RECOMENDACIONES

Para una mayor duración del concentrador forrado con cinta de aluminio (material seleccionado) se recomienda limpiarlo suavemente con algodón, evitando acumulación de polvo. También es importante que el concentrador solar este en un lugar despejado donde siempre de el sol, asegurando así una mayor vida útil al concentrador. Reemplazar la cinta de aluminio cuando esté opaca o rota para evitar que la eficiencia de reflexión del concentrador disminuya. El concentrador debe utilizarse cuando haya cielo despejado o seminublado, pero no cuando llueva.

Repetir las pruebas actinométricas con el mismo material de acuerdo a la posición, hora y concentración, para una repetibilidad de la prueba.

Las pruebas de desinfección realizadas en este trabajo solo se realizaron para bacterias indicadoras (coliformes totales y *E. coli*), por lo que recomendamos hacer pruebas para virus y protozoarios que aseguren una desinfección completa, así como determinar los tiempos de exposición requeridos para su inactivación.

También es conveniente desarrollar un dispositivo o indicador que cambie de color cuando la energía recibida sea mayor de 2500 W-h/m^2 , para la gente que implemente este método.

Cambiar las botellas cuando las paredes se opaquen o se rayen ya que disminuye la transmitancia al agua.

ANEXO I

Características del Espectrofotómetro y procedimiento de análisis de transmitancia y reflectancia [37]

El equipo usado fue un Espectrofotómetro UV-3101, marca SHIMADZU-CORPORATION.

Especificaciones del espectrofotómetro:

- Intervalo de medición de longitud de onda:
200 ~ 3000 *nm* (en series de UV-3100 con diámetro cubiertos en 15 *mm*).
- Ángulo de incidencia para la muestra: 5°.
- Tamaño de muestras medidas: Max. 140X160X10 *mm* (en series de UV-260/265, 2100(S), 3100).
- La abertura del accesorio de la muestra: 2 tamaños de 5 *mm* y 15 *mm*.
- Espejos standard: espejos cubiertos de Aluminio, 2 piezas por S y R cada cara.

Procedimiento para el análisis de las muestras es el siguiente:

- 1) Remover la boquilla de la celda rectangular estándar desde el compartimiento de la muestra, y en su lugar instalar el accesorio de la reflectancia especular al principio del cuerpo, ajustar este en la posición del alfiler, y fijar éste con firmeza con el tornillo ajustador (punto 9 en la figura I.1). A este tiempo, el lado de la muestra del accesorio podría estar enfrente de lado del compartimiento de la muestra.
- 2) El tornillo que se encuentra en el tablero donde está la muestra (punto 10 y 11 en la figura I.1) con 5 *mm* o 15 *mm* de apertura, esta apertura depende del tamaño de la muestra y de la posición de la muestra en el tablero (punto 12 en la figura I.1). El tablero de la muestra de diámetro pequeño podría estar sobre el lado de referencia, y la más larga sobre el lado de la muestra. Debe de estar seguro que el tornillo se encuentra completamente sujeto por el posicionador.
- 3) Montar el espejo ensamblado (por el estándar de reflectancia) sobre el tablero de la muestra respectiva (punto 10 y 11 en la figura I.1), con sus fases bajas del espejo. En este punto avisa que el lado de referencia del espejo tiene una marca el blanco sobre su lado para ser fijado por éste sobre el tablero de la muestra.

- 4) Cerrar el compartimento de la tapa de la muestra, y entonces hacer una corrección en la línea base para ajustar el intervalo de longitud de onda.
- 5) Después de finalizar la corrección de la línea base, se remueve el espejo reflectante del lado de la muestra, y el siguiente paso es instalar una muestra no conocida. Después de esto, comienza una medición de la reflectancia relativa especular de esa muestra.

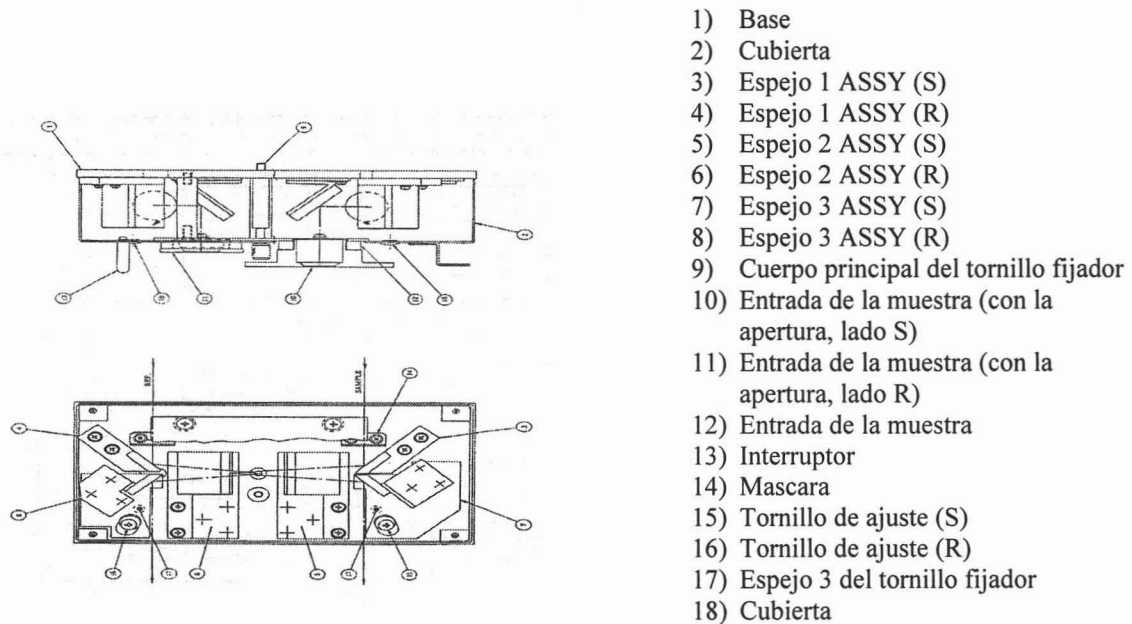


Figura I.1. Esquema del espectrofotómetro

El equipo se muestra a continuación:

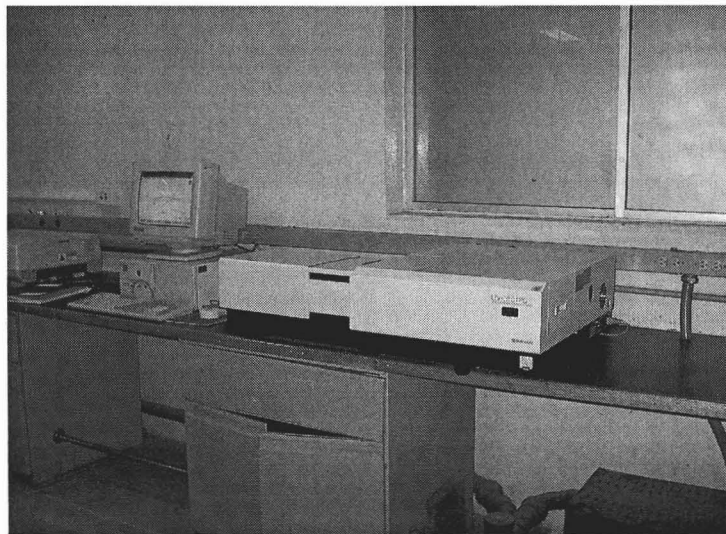


Figura I.2. Espectrofotómetro utilizado en las pruebas de reflectancia

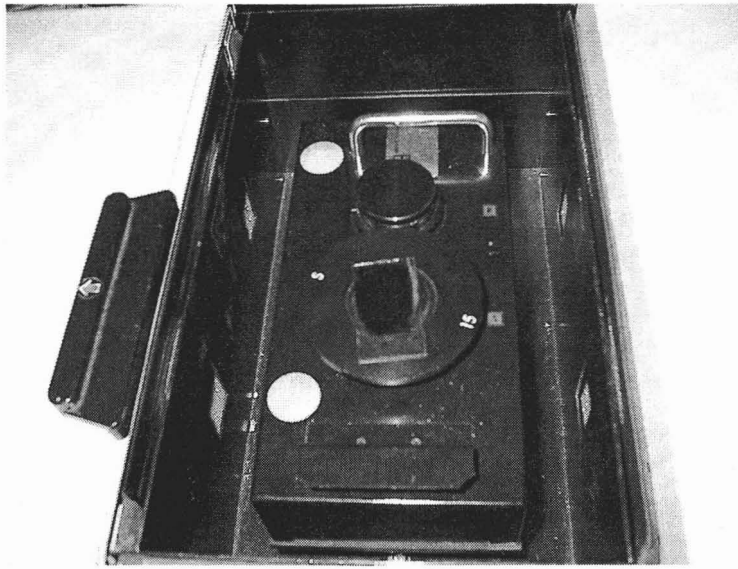


Figura I.3. Soporte de muestras del espectrofotómetro

A N E X O II

Actinometría Química [44]

Para realizar las pruebas actinométricas primero se prepara una solución valorada de permanganato de potasio (KMnO_4 , al 0.05N), de la siguiente manera:

Material:

- 1 matraz aforado de 1 L
- 1 matraz aforado de 100 mL
- 5 vasos Elemeyer de 250 mL
- 1 vaso Elemeyer de 125 mL
- 1 bureta de 50 mL
- 1 vaso de precipitado de 50 mL
- 1 pipeta volumétrica de 10 mL
- 1 parrilla eléctrica y magnética
- 1 cronómetro
- 3 magnetos

Reactivos:

- Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Oxalato de sodio anhidro ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$)
- Permanganato de sodio (KMnO_4)

Se disuelven 1.6gr. de KMnO_4 en 1000 mL de agua desionizada. Posteriormente se decanta cuidadosamente el sobrenadante. Y se valora esta solución por el siguiente procedimiento: pesar varias muestras de oxalato de sodio anhidro $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, en vasos de 400 mL. Las muestras deben pesar entre 100 y 200 mg; a cada vaso, por turno, 100 mL de agua desionizada y agitar hasta disolver. Añadir 10 mL de H_2SO_4 1:1 (5 mL de agua desionizada y 5 mL de H_2SO_4) y calentar rápidamente a 90 – 95 °C. Determinar de inmediato con la solución de permanganato, agitando continuamente, hasta un color rosa pálido que perdure por lo menos un minuto. No se debe permitir que la temperatura baje de 85°C. Si es

necesario, calentar el vaso durante la determinación; 100 mg de oxalato de sodio consumirán aproximadamente 30 mL de permanganato. Correr un testigo con el agua desionizada y H₂SO₄.

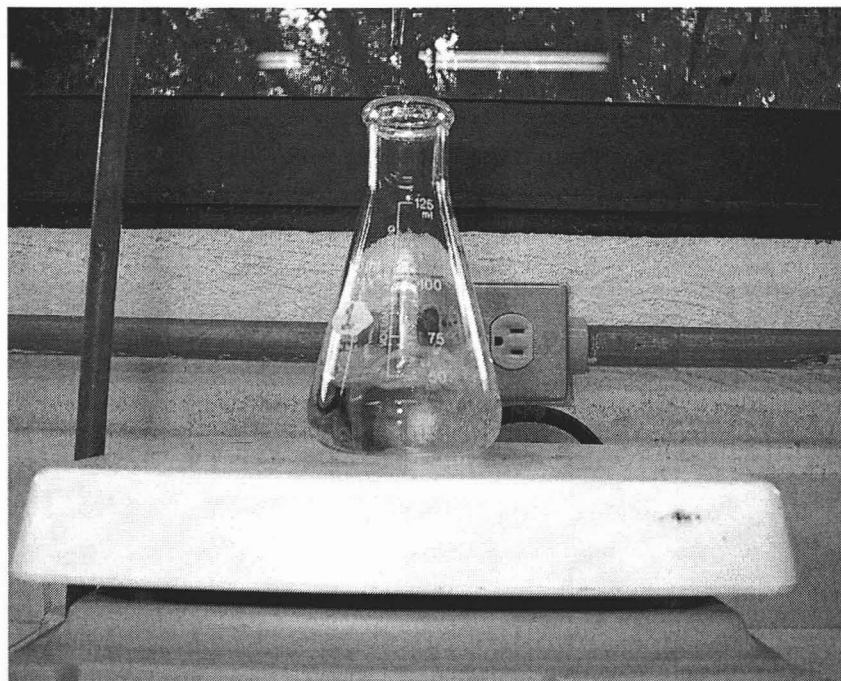


Figura II.1. Muestra el color que toma la solución actinométrica al ser titulada

La fórmula para el cálculo de la Normalidad del permanganato de sodio es la siguiente:

$$\text{Normalidad del } KMnO_4 = \frac{\text{gr } Na_2C_2O_4}{(A - B) * 0.06701} \quad (\text{II.1})$$

A = mL de valoración para la muestra

B = mL de valoración para el testigo

(Promediar los resultados de varias determinaciones)

Solución actinométrica (0.05 M de sal ácido oxálico y sal de uranilo al 0.01 M)

Material:

1 matraz aforado de 2 L

1 parrilla magnética

1 magneto

1 balanza analítica

Reactivos:

Ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Nitrato de Uranilo ($(\text{NO}_3)_2\text{UO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Agua destilada y deionizada

Procedimiento

Se pesan 12.607 g de ácido oxálico y 10.2476 g de uranilo en la balanza analítica, se agregan en el matraz aforado con un poco de agua deionizada, hasta llegar a la marca del matraz aforado de 2 litros. Posteriormente se coloca el magneto dentro del matraz y se coloca el matraz en la parrilla magnética, agitando por 15 minutos para asegurar la homogenización de la solución. Después de la agitación se cubre el matraz con la solución actinométrica con papel aluminio para evitar la llegada de radiación y se refrigera hasta el momento que va a ser ocupada.

Determinación del Ácido Oxálico remanente

Después de haber calculado la normalidad del permanganato de sodio y de haber tomado las muestras de las soluciones actinométricas expuestas al sol y tituladas con KMnO_4 , se utiliza la siguiente fórmula para la determinación del ácido oxálico remanente:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (\text{II.2})$$

$$C_1 = \frac{C_2 V_2}{V_1} \quad (\text{II.3})$$

C_1 = Concentración de *ác. Oxálico*

V_1 = mL de la muestra (*5 mL*)

C_2 = Concentración de KMnO_4 (*0.0477 M*)

V_2 = mL de KMnO_4 gastados en la titulación

Relación de las concentraciones:

$$N = nM \quad (\text{II.4})$$

$$M = \frac{N}{n} \quad (\text{II.5})$$

N = normalidad (*eq. químico/L*)

M = molaridad (*mol/L*)

n = número de equivalentes químicos

A N E X O III

Procedimiento para la determinación de la concentración de bacterias indicadoras (coliformes totales y *E. coli*) [45].

A una muestra de 100 mL, se le añade una cápsula de reactivo Colilert[®], se homogeniza y se vierte en una placa Quanti-Tray[™] 2000 previamente identificada y etiquetada. Posteriormente, se pasa por el sellador y se incuba 24 horas a 35°C. A continuación se describen paso por paso las instrucciones del dispositivo Quanti-Tray 2000.

1. Se desprende con cuidado un paquete de tira, sin abrir inadvertidamente el paquete contiguo.
2. Golpee el paquete ligeramente para cerciorarse de que todo el polvo de Colilert se encuentre en el fondo del paquete.
3. Sostenga en la mano la placa en posición vertical, con el lado de la celda orientado hacia la palma.
4. Apriete la parte superior de el dispositivo Quanti-Tray de modo de doblarla hacia la palma.
5. Abra la placa desprendiendo la lengüeta metálica del lado que contiene las celdas. Evite tocar el interior del metal o del dispositivo.
6. Vierta la mezcla de reactivo y la muestra directamente dentro de la placa, evitando tocar la lengüeta metálica. Golpear los pequeños pocillos 2 o 3 veces para eliminar posibles burbujas de aire. Deje reposar la espuma.
7. Coloque la placa llena de muestra sobre el portadispositivo de goma del sellador Quanti-Tray, orientando el lado de las celdas (plásticas) del dispositivo hacia debajo de manera que quepa en el portadispositivo.
8. Selle el dispositivo según las instrucciones del sellados.
9. Incube el dispositivo a 35°C ± 5°C por 24 horas.
10. Cuento las celdas positivas. Para determinar el número más probable, recurra a la tabla NMP que se encuentra en la caja de los dispositivos.
11. Desechar las placas esterilizadas en el recipiente indicado dentro del laboratorio.

Si es necesario se hacen diluciones seriadas de las muestras, en condiciones asépticas con agua estéril (puede ser buffer de fosfato o del agua del grifo).

Al término del período de incubación, se examinan las placas y se toma como positivo para coliformes totales los cuadros grandes y pequeños que presenten coloración amarilla. La concentración de *E. coli* se obtiene contando los cuadros grandes y pequeños que presentan fluorescencia, para esto se utiliza una lámpara de UV de 6 watts. La densidad de coliformes se expresa como NMP por 100 mL, se obtiene de la tabla de resultados IDEXX Quanti-Tray™ 2000 NMP al buscar el valor que corresponde al número de cuadros grandes y pequeños positivos, dichos valores presentan un límite de confianza del 95%.

REFERENCIAS

- Acra A. M. Jurdi, H, Mu' allem, Y. Karahagopian, Z. Raffoul (1997), *Water disinfection by solar radiation*, International Developent Research Center, Ottawa, Canada,.
- Arafa S. y Cotis M. C. (1988), *Solar Disinfection of Water for Rural Communities*. Proceedings of a Workshop Heald at the Brace Research Institute, 15-16 agosto; Montreal, Que., Canada.
- American Water Works Association (AWWA) (1949), *Standard Methods of Water and Wastewater Analysis* 19 Edition pp. 4-83. Washintongton, D.C., USA.
- Blanco J., Malato s. (2000), *Solar Detoxification*, World Solar Program, John Wiley and Sons, UNESCO.
- Boletín Epidemiológico (2003) SSA. <http://www.dgepi.salud.gob.mx/boletin.htm>
- Campos P., Monteiro B., Silveira C. C., Almeida de Souza M. A. (2001), *Viabilidade do uso da radiação solar na desinfecção da água*, Universidade de Brasilia- UnB.
- CGiAB (Comisión para la Gestión integral del Agua en Bolivia) *Opini3n*, 19 de octubre del 2000 <http://www.aguabolivia.org/prensaX/Prensa/2000/Octubre/14-20/MCa191000.htm>
- CONAPO (2004), *Carpeta Informativa 11 de julio Día Mundial de la Poblaci3n*, México, Consejo Nacional de la Poblaci3n.
- Conroy R. M., Eimore-Meegan M., Joyce T., McGuigan K. G., Barnes J. (1996), *Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial*, THE LANCET, vol. 348 December 21/28.
- Cort3s Mu3oz J. E. (1999), *Potabilizaci3n de Agua para Uso y Consumo Humano. Informe final de actividades TC-9906*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Morelos, México.
- Cort3s J., Mart3n A., V3zquez S., Fonseca O., Gonz3lez A. (2000), *Radiaci3n solar para desinfectar agua en comunidades rurales*, Coordinaci3n de Tratamiento de agua y Calidad del agua, Subcoordinaci3n de Potabilizaci3n, Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA), Morelos, México.
- CNA (2002), *Estadística del agua en México*, C3p. Uso del agua e Infraestructura, Comisi3n Nacional del Agua, pp. 68-72.
- Curc3 D., Malato S., Blanco J., Jim3nez J., Marco P. (1996), *Photocatalytic degradation of phenol: comparaci3n between pilot-plant-scale and laboratory results*, Solar Energy Vol. 56 No. 5, pp 387-400.
- Duffie J. A., Beckman W. A. (1991), *Solar Engineering of Termal Proceses*, 2nd. Edition.

Echazú R., Cadena C., Saravia L. (2000), *Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares*, INENCO, Universidad Nacional de Salta Buenos Aires, Argentina.

Enriquez de Madrid M. L., Joyce A., Loureiro D., Mendez C. (1995), Efecto de la radiación ultravioleta solar sobre las bacterias de agua, XIX Semana Nacional de Energía Solar, Memorias ANES, pp 39-43.

EPA (1999) United States Environmental Protection Agency, *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*, Office of Water (4607), EPA 815-R-99-014.

Howard B. C. (1999), *Estadística paso a paso*, cuarta edición, trillas, México, D.F.

IMTA (2001-2002) Datos meteorológicos medidos en la estación meteorológica del IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), Morelos, México

Instructivo colilert, 2000.

Instruction Manual, SPECULAR REFLECTANCE ATTACHMENT (For 5° Incidence Angle) for UV-1200 series/160(A)/240/250/260/265, UV-2200 series/2100(S)/3100 series, MPS-2200; SHIMADZU CORPORATION Chromatographic & Spectrophotometric, Instrumental Division; Shimadzu Corporation 1994.

Jacobs J. L. y Sundin G. W. (2001), *Effect of Solar UV-B Radiation on a Phyllosphere Bacterial Community*, Department of Plant Pathology and Microbiology, Texas A&M University, College Station, Texas, Applied and Environmental Microbiology, Dec., pp. 5488-5496.

Jiménez-Cisneros B. E., (2001), *La Contaminación Ambiental en México causas, efectos y tecnología apropiada*, Limusa Noriega Editores, México D. F., pp. 146, 147.

López C. O., (1990), *Desinfección del agua*, Ministerio De salud (OPS/OMS), Lima, Perú, pp. 23-35.

Martín A., Cortés J., Ramírez V., Rodríguez M. (1999), *Desinfección del agua por radiación solar*, Informe de proyecto, Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA), Morelos, México.

Martín A., González A., Cortés J., Rodríguez M., Vázquez S., Montellanos L. (2000), *Validación Técnico-social de la desinfección solar*, Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA), Morelos, México.

Martín A., Fonseca-Moreno O., González-Herrera A., Cortés J. E., Mundo- Molina A., Montellano-Palacios L., Estrada C. A. (2001); *Estudio piloto para la desinfección solar de agua de consumo humano en cuatro comunidades rurales*, IMTA Jiutepec Morelos, México.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 modificada en el año 1999, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para potabilización. (<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>.)

Oates M. P., Shanahan P., Polz M. F. (2003), *Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haití*, Water Research 37, pp. 47-54.

OMS (1995), *Guías para la calidad del agua potable, Segunda edición, Volumen 1 Recomendaciones*, Organización Mundial de la Salud Ginebra, Suiza, pp. 8-31.

OPS/OMS (1984), *Criterios de salud ambiental 14, Radiación Ultravioleta*, Publicación Científica No. 466, Washington, D.C. E. U. A.

OPS/OMS (1995), *Manual De desinfección*, pp. 23-39, anexo 2, Washington D.C., E.U.A.

Origin 6.0, Copyright© 1984-2001, Microcal Software, Inc.

Orto C. G. (1986), *Radiation Dosimetry Physical and Biological Aspects*, Impreso por Plenum Publishing Corporation, New York,.

Pelczar M. J., Reid R. D., Chan E.C.S., (1991), *Microbiología*, Cuarta edición (Segunda edición en español), Mc-Graw-Hill, México D. F., pp. 329-358, 681-684.

SANDEC (1998), *SODIS NEWS No. 3 August 1998*, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANEC).

SANDEC (1999), *Solar Water Disinfection – A water Treatment Option for the year 2000 and Beyond*, Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology (EAWAG), Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANEC).

SANDEC (2000), *SODIS Nota técnica No. 5 Condiciones climáticas: Radiación solar*, Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology (EAWAG), Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANEC).

SANDEC (2002), *Solar Water Disinfection. A Guide for the Application of SODIS*, Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology (EAWAG), Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANEC).

Saravia L. R. y Suarez H. (2000), *Testeo de materiales para cocina solar tipo caja*, INENCO-Universidad Nacional de Salta-CONICET Buenos Aires, Salta, Argentina.

Silveira C. C., Campos P., Medeiros B., Arantes C. (2000), *Avaliação da desinfecção solar na região centro-oeste do Brasil usando diferentes organismos indicadores de contaminação*; XXVI Congresso Internacional de Engenharia Sanitaria e Ambiental (ABES), Brasil.

Solarte Y., Salas M. L., Sommer B., Dierolf C., Wegelin M. (1997), *Uso de la radiación solar (UV-A y temperatura) en la inactivación del Vibrio cholerae en agua para consumo humano. Factores que condicionan la eficiencia del proceso*, CINARA y EAWAG, Colombia.

STATISTICA 6.0, Copyright© 1991-1999, Microcal Software, Inc.

Tippens P. E., (1987) *Física Conceptos y aplicaciones*, Tercera edición (Segunda en español), México D. F.

Wegelin M. (1999), EAWAG/SANDEC, Duebendorf, Suiza, MW/ms/SP, *Desinfección solar de agua – Una opción de tratamiento de agua para el año 2000 y más allá*, Traducido por C.F. Dierolf - CINARA, Cali, Colombia.

Wegelin M., Canonica S., Alder A.C., Marazuela D. (2000), *Does sunlight change the material and content of polyethylene terephthalate (PET) bottles?*, JOBNAME: AQUA.

Wegelin M., Sommer B., Mariño A., Solarte Y., Salas M. L., Dierolf C., Valiente C., Mora D., Rechsteiner R., Setter P., Wirojanagud W., Ajarmeh H., Al-Hassam A., (1997), *SODIS-un emergente proceso en el tratamiento de agua* Swiss, Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC), Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), Journal Water SRT- Aqua Vol. 46 No. 3, pp. 127-137.

Wegelin M., Canonica S., Mechsner K., Fleischmann T., Pesaro F., and Metzler A., (1994), *Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments*, J. Water SRT-Aqua. 43, pp. 154-169.

Wel, Lin W., Zainai Z., Williams N. E., Zhu K., Kruzic A. P., Smith R. L., y Rajeshwar K. (1994), *Bacterial Activity of TiO₂ Photocatalyst in Aqueous Media: Toward a Solar-Assisted Water Disinfection System*, Arlington, Texas, Environ. Sol. Technol, 28, 934-938.