



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN  
DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON  
RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO**

**María Isabel Oliva Herrera**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN  
DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON  
RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARÍA ISABEL OLIVA HERRERA**

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de enero de 2013.



**María Isabel Oliva Herrera**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 22 de mayo de 2014

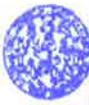
Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Ingeniero Monzón:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al trabajo de graduación titulado "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO", de la estudiante de Ingeniería Química María Isabel Oliva Herrera quien se identifica con el carné número 2008-19058.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,

Jorge Mario Estrada Asturias  
Ingeniero Químico Col. 685  
Profesor Titular  
Escuela de Ing. Química USAC

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Asesor



Guatemala, 03 de septiembre de 2014  
Ref. EIQ.TG-IF.034.2014

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **093-2012** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **María Isabel Oliva Herrera**.  
Identificada con número de carné: **2008-19058**.

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

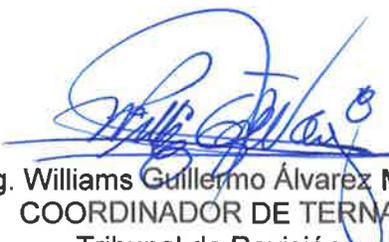
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.211.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MARÍA ISABEL OLIVA HERRERA** titulado: "**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO**".  
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre 2014

Cc: Archivo  
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUA CON RECIRCULACIÓN CONTINUA PARA CONSUMO HUMANO**, presentado por la estudiante universitaria: **María Isabel Oliva Herrera** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympto Paiz Roldán  
DECANO



Guatemala, octubre de 2014

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme recorrer este sendero y colocar en el tiempo preciso; pruebas, personas y experiencias que han aportado los elementos que componen mi esencia.
- Mi madre** Velia Lorena Oliva, por enseñarme la importancia de la perseverancia y fortaleza. Por su apoyo incondicional y su ejemplo de servicio a la sociedad. Gracias por su amor infinito, que me ha acompañado en cada una de las etapas de mi vida.
- Mis abuelos** Lubia Isabel Herrera y Ricardo Alfredo Oliva, por sus cuidados y cariño. Por colaborar a la formación de mis valores y carácter.
- Mi tío** Nelson Alfredo Oliva, por su paciencia y cariño. Por formar parte esencial de mi vida, gracias por cultivar en mí el valor de la disciplina.
- Mi hermano** Alfredo Antonio Oliva, por apoyarme y alentarme en cada una de mis decisiones. Por su cariño y complicidad en las travesuras que hemos compartido.

**Mi familia**

Mis tíos, tías, primos, padrinos y madrinas, por apoyarme siempre y estar pendientes de cada uno de mis éxitos. Por su cariño y comprensión.

**Mis amigos**

De todas las etapas de mi vida, cada uno aportó en mí, elementos valiosos para la formación de mi personalidad. Por su apoyo y consejos, por compartir alegrías y tristezas.

**Área de Salud Escuintla**

Anabella Batres, Laura Figueroa y Toribio Gómez, por su apoyo durante la ejecución de mi proyecto, sin ellos no hubiera podido ser posible llevar a cabo esta investigación. Muchas gracias por su apoyo sincero.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Desinfección solar del agua.....	5
2.1.1. Ventajas de SODIS.....	7
2.1.2. Limitaciones de SODIS.....	7
2.1.3. SODIS en Latinoamérica .....	7
2.1.4. SODIS en Guatemala .....	8
2.2. Agua potable en Guatemala .....	9
2.2.1. Transmisión de patógenos por agua .....	10
2.3. Espectro electromagnético .....	12
2.3.1. Radiación solar en Guatemala.....	13
2.3.2. Efecto de la radiación solar sobre microorganismos patógenos.....	16
2.4. Fundación TECHO .....	17
2.4.1. Vivienda de Emergencia .....	18

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	21
3.1.	Variables .....	21
3.1.1.	Tiempo de muestreo .....	21
3.1.2.	Temperatura.....	22
3.1.3.	Conteo de coliformes totales .....	22
3.1.4.	Conteo de coliformes fecales .....	22
3.1.5.	Flujo volumétrico .....	22
3.1.6.	Potencia de la bomba.....	24
3.1.7.	Orientación .....	26
3.1.8.	Ángulo de inclinación .....	26
3.1.9.	Materiales transparentes .....	27
3.1.10.	Área efectiva de irradiación .....	30
3.2.	Clasificación de las variables .....	31
3.2.1.	Variables independientes .....	31
3.2.2.	Las variables dependientes.....	31
3.3.	Delimitación de campo de estudio .....	31
3.4.	Recursos humanos disponibles .....	33
3.5.	Recursos materiales disponibles.....	34
3.6.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	35
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información .....	35
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	36
3.9.	Análisis estadístico.....	36
3.9.1.	Número de muestras.....	36
3.9.2.	Media muestral.....	38
3.9.3.	Desviación estándar .....	38
3.9.4.	Varianza .....	39
3.9.5.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov .....	39
3.9.6.	Prueba de Kruskal Wallis .....	41

4.	RESULTADOS .....	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
	CONCLUSIONES .....	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	APÉNDICES .....	65
	ANEXOS .....	75



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diseño de las bases laterales externas de la estufa solar.....	3
2.	Rutas de transmisión de patógenos.....	10
3.	Espectro electromagnético.....	13
4.	Mapa de radiación solar directa anual en Guatemala.....	15
5.	Modelos 3D de la Vivienda de Emergencia.....	19
6.	Análisis de porcentaje de transmitancia en el espectro UV-A para manguera atóxica de PVC.....	28
7.	Porcentaje de radiación UV-A disponible para diferentes materiales transparentes.....	28
8.	Manguera de PVC atóxica.....	29
9.	Vista de planta del área efectiva de irradiación.....	30
10.	Localización de la oficina de TECHO, Guatemala.....	32
11.	Localización de la aldea Buena Vista, Iztapa.....	33
12.	Diseño del sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua.....	43
13.	Vista de planta del diseño del sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua.....	44
14.	Vista 3D del diseño del sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua.....	44
15.	Sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua construido.....	45
16.	Sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua construido.....	45

17.	Válvulas para eliminar agua remanente del sistema de desinfección solar al terminar el ciclo de desinfección .....	46
18.	Relación entre el porcentaje de remoción de coliformes totales con la temperatura e intensidad de radiación solar promedio .....	50
19.	Relación entre el porcentaje de remoción de coliformes totales con intensidad de radiación solar y coliformes totales iniciales .....	51
20.	Relación del porcentaje de remoción con el tiempo de exposición.....	52

## TABLAS

I.	Resultados de la encuesta sobre la aceptación de SODIS.....	6
II.	Enfermedades transmisibles por el agua.....	12
III.	Resistencia térmica de los microorganismos.....	17
IV.	Intervalos para agrupar datos .....	21
V.	Velocidad de fluidos en tuberías.....	23
VI.	Recolección de datos tomados por día.....	35
VII.	Resultados de las muestras analizadas por día .....	36
VIII.	Datos y resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov .....	41
IX.	Estadísticos de contraste de los datos correspondientes al porcentaje de reducción.....	42
X.	Consolidado de los resultados del muestreo (día 1 y 2) .....	47
XI.	Consolidado de los resultados del muestreo (día 3, 4 y 5) .....	48
XII.	Consolidado de los resultados del muestreo (día 6 y 7) .....	49
XIII.	Estadísticos de contraste de los datos correspondientes al porcentaje de reducción de coliformes totales.....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>hp</b>	Caballo de fuerza
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetros cúbicos
<b>°</b>	Grados
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>h</b>	Hora
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>kPa</b>	Kilopascal
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>m</b>	Metro
<b>µm</b>	Micrómetro
<b>mL</b>	Mililitro
<b>mmHg</b>	Milímetros de mercurio
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>NMP</b>	Número más probable
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>Pa</b>	Pascal
<b>”</b>	Pulgada
<b>s</b>	Segundo
<b>TWh</b>	Teravatio-hora
<b>UC</b>	Unidad de color
<b>UNT</b>	Unidad nefelométricas de turbidez
<b>W</b>	Vatio



## GLOSARIO

<b>ADN</b>	Ácido desoxirribunucleico. Ácido nucleico que contiene las instrucciones genéticas para el desarrollo y funcionamiento de todos los organismos vivos.
<b>Agua potable</b>	Aquella que por sus características de calidad especificadas en la Norma COGUANOR 29001, es adecuada para el consumo humano.
<b>Coliformes</b>	Bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gramnegativas, no formadoras de esporas y con forma de bastón que fermentan la lactosa, produciendo gas y ácido en 48 horas a 35 °C.
<b>Contaminación Bacteriológica</b>	Presencia de microorganismos en el agua y la formación de biopelículas en los sistemas de distribución.
<b>Contaminación fecal</b>	Contaminación producida a causa de heces de animales o humanos.
<b>Coliformes fecales</b>	Bacterias que forman parte del grupo coliforme total y que indican contaminación fecal.

<b>Desinfección del Agua</b>	Eliminación de organismos productores de enfermedades en el agua.
<b>Espectro electromagnético</b>	Rango de las ondas electromagnéticas.
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
<b>PET</b>	Tereftalato de polietileno.
<b>Radiación UV-A</b>	Radiación ultravioleta que no es absorbida por la capa de ozono.
<b>SODIS</b>	Solar Water Disinfection, desinfección solar del agua.
<b>TECHO</b>	Organización integrada por jóvenes voluntarios de distintas disciplinas y ocupaciones, presente en Latinoamérica y el Caribe.
<b>Vivienda de Emergencia</b>	Módulo prefabricado de madera de 18 metros cuadrados.

## RESUMEN

El presente estudio consistió en diseñar, implementar y evaluar el funcionamiento de un sistema de desinfección de agua con recirculación continua, para la reducción de coliformes totales y fecales por medio de la radiación ultravioleta proveniente del Sol. Este sistema de desinfección se instaló en un modelo de Vivienda de Emergencia de la Fundación TECHO, las muestras de agua a tratar provenían de la aldea Buena Vista del municipio de Iztapa, Escuintla.

El agua tratada mediante el sistema de desinfección, se evaluó a través del análisis bacteriológico de las muestras antes y después de ser procesadas en el mismo. El proceso de desinfección de agua tuvo una duración de 8 horas continuas, en 7 días distintos. Para fines de este estudio se documentó la intensidad de radiación solar reportada en los días que se llevó a cabo el experimento, utilizando los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH); asimismo, se documentaron las temperaturas del agua durante el tratamiento y la turbidez de la muestra inicial de agua.

Los resultados de este estudio no son estadísticamente significativos para los análisis de coliformes fecales, debido a la variación en las cargas iniciales y al resultado luego de la desinfección. También se identificaron las condiciones para obtener resultados de remoción arriba del 81 por ciento en el caso de coliformes totales según su carga inicial, intensidad de radiación solar y temperatura.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Diseñar, construir, implementar y evaluar un sistema de desinfección de agua con recirculación continua; para la reducción en más del 99,99 por ciento de coliformes totales y fecales por medio de la radiación ultravioleta proveniente del sol.

### **Específicos**

1. Diseñar un sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua.
2. Construir el sistema de desinfección solar de agua diseñado.
3. Implementar el sistema de desinfección solar de agua diseñado.
4. Evaluar el funcionamiento del sistema de desinfección solar de agua diseñado, por medio del conteo de coliformes totales y fecales en las muestras tratadas con este método.
5. Determinar las condiciones óptimas de operación del sistema de desinfección solar de agua diseñado.

## **Hipótesis**

El sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua diseñado, reduce en más del 99,99 por ciento las coliformes totales y fecales presentes en las muestras de agua provenientes de la aldea Buena Vista del municipio de Iztapa, Escuintla; tratadas en la zona 15 de la ciudad de Guatemala.

### **Hipótesis nula:**

El sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua, no reduce en más del 99,99 por ciento las coliformes totales y fecales presentes en las muestras de agua provenientes de la aldea Buena Vista del municipio de Iztapa, Escuintla.

### **Hipótesis alternativa:**

El sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua, sí reduce en más del 99,99 por ciento las coliformes totales y fecales presentes en las muestras de agua provenientes de la aldea Buena Vista del municipio de Iztapa, Escuintla.

## INTRODUCCIÓN

El agua es imprescindible para la supervivencia del ser humano, la misma debe ser suficiente en cantidad y calidad, por lo que el agua destinada al consumo humano debe estar libre de patógenos para prevenir daños en la salud de las personas.

En Guatemala, el cuarenta y cuatro por ciento de los municipios del país reporta contaminación bacteriológica en los abastecimientos de agua vigilados<sup>1</sup> y las enfermedades transmitidas por el agua se incluyen en las primeras diez causas de morbilidad y mortalidad en el país. La contaminación bacteriológica del agua comúnmente presenta microorganismos pertenecientes al grupo coliforme. Un indicador para determinar la naturaleza de la contaminación bacteriológica del agua, es la presencia en la misma de bacterias pertenecientes al grupo de coliformes fecales, de las cuales la *Escherichia coli* es el indicador comúnmente utilizado.

La desinfección solar del agua (SODIS por la abreviación de su nombre en inglés Solar Water Disinfection) es una alternativa de desinfección en áreas que no cuentan con agua segura, por lo que existen muchas iniciativas y actividades a nivel mundial para la difusión de este método.

El método SODIS utiliza la energía solar para eliminar microorganismos patógenos que se encuentran en el agua, por medio de la combinación de radiación ultravioleta y radiación infrarroja; dado que el aumento de la

---

<sup>1</sup> Centro Nacional de Epidemiología. *Sala situacional desnutrición aguda (moderada y severa) <5 años*. p.15.

temperatura y la exposición a la luz son condiciones adversas para la supervivencia de los patógenos. El método SODIS convencional utiliza botellas de Polietilentereftalato (PET) de dos litros, lo cual es una desventaja pues solo maneja volúmenes pequeños.

## 1. ANTECEDENTES

La desinfección solar del agua fue una idea presentada por Aftim Acra, en un folleto de UNICEF en 1984 (Meierhofer y colaboradores, 2003). Esta idea motivó a un equipo de investigación del Departamento de Agua y Saneamiento en países en desarrollo (SANDEC), del Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuática (EAWAG); a evaluar la posibilidad de inactivar bacterias y virus en el agua tras el uso combinado de radiación ultravioleta y el incremento de temperatura.

Los resultados del uso de SODIS (Solar Water Disinfection), para inactivar microorganismos patógenos en el agua fueron positivos tanto a nivel laboratorio como a nivel de campo, lo que ha motivado la implementación y el estudio de SODIS por varias instituciones y personas a nivel mundial.

La desinfección solar del agua se ha implementado en varios países, incluida Guatemala, que inició su uso a partir del 2005. Dentro de los estudios que se han desarrollado en el país sobre este método de desinfección, se encuentra el presentado por la ingeniera Mildred Carmina López Orizabal (2002), en el cual evaluó el efecto que tiene el color y la turbiedad, en la eficiencia de remoción de coliformes fecales en agua cruda, al utilizar el método de desinfección solar convencional (botellas de PET de dos litros).

La metodología de este estudio consistió en evaluar las condiciones iniciales y finales de seis muestras de agua cruda provenientes de los vertederos de Acatán, Teocinte 18" y Canalitos, que abastecen la planta potabilizadora Santa Luisa de la Ciudad de Guatemala.

A estas muestras se les midieron parámetros físicos y biológicos de interés; tales como: temperatura, color, turbiedad y coliformes fecales. Las variaciones de estos parámetros se midieron en intervalos de dos horas de exposición a la luz solar, para evaluar la inactivación de las coliformes fecales presentes en la muestra, tras el incremento o descenso de la radiación solar.

Los resultados de este estudio determinaron que las condiciones de radiación solar y temperatura predominantes en la ciudad de Guatemala en época seca, son efectivas para la remoción del 97 al 100 por ciento de coliformes fecales en agua cruda de turbiedad menor de 30 unidades nefelométricas de turbidez y un rango de color de 9 a 158 unidades de color. Asimismo se determinó que, la eficiencia de la desinfección solar se reduce después de las 14:00 horas, pues disminuye la intensidad de la radiación solar y la temperatura. Se demostró que no existe correlación entre el color y la turbiedad inicial de la muestra, con la eficiencia de SODIS en la remoción de coliformes fecales.

Otro aporte de este estudio fue la observación de variaciones en los porcentajes de remoción de coliformes fecales, al comparar los resultados obtenidos del método de membranas de filtración con el método de tubos de fermentación por diluciones múltiples. El método de tubos de fermentación por diluciones múltiples presentó porcentajes de remoción mayores, en los seis días muestreados.

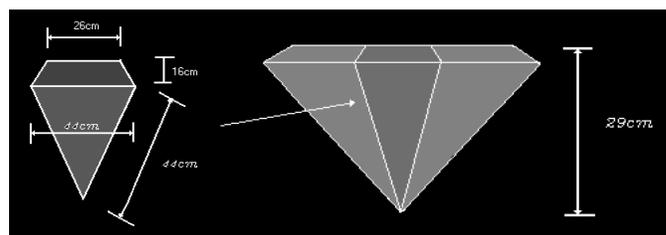
Con el método de membranas de filtración, cinco de las seis muestras analizadas cumplieron con la Norma guatemalteca obligatoria para agua potable (COGUANOR 29001) (DRPSA, 2003). En el caso del método de tubos de fermentación por diluciones múltiples, solo cuatro cumplieron con dicha

norma, por lo que este estudio recomienda evaluar los resultados de las muestras desinfectadas con SODIS por ambos métodos.

El químico biólogo, José Rodrigo Loarca Umaña, basó su trabajo de graduación en el diseño de una estufa solar para el aprovechamiento de la radiación solar como método de desinfección de agua (Loarca, 2005), la forma de la estufa era piramidal con una ventana de vidrio en la parte superior.

Las muestras de agua provenían del río Guacalate, el cual presentaba contaminación fecal. El estudio se realizó durante el invierno y las muestras de agua fueron tratadas durante un período de 4 horas de exposición (entre las 10:00 y 14:00 horas). Se lograron alcanzar temperaturas entre los 38 y 87 grados centígrados, también se observó que de las diez muestras analizadas, seis de ellas mostraron crecimiento de *Escherichia coli* (*E. coli*) a las cuarenta y ocho horas después del tratamiento, por lo que la estufa solar no logró una eliminación completa de *E. coli* y de coliformes. Por tanto, este estudio no pudo asegurar que el uso de la estufa solar fuera una alternativa segura, para la desinfección de agua en los días en que no se alcancen estas condiciones climáticas y de radiación.

Figura 1. **Diseño de las bases laterales externas de la estufa solar**



Fuente: LOARCA UMAÑA, José Rodrigo. *Evaluación de una estufa solar como método para desinfección de agua proveniente del río Guacalate de San Bartolomé Becerra, Sacatepéquez*. p.30.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Desinfección solar del agua**

La posibilidad de la desinfección solar del agua fue presentada por primera vez por Aftim Acra en un folleto publicado de UNICEF en 1984 (Meierhofer y colaboradores, 2003). Esta idea fue el punto de partida para que en 1991 un equipo de investigación del Departamento de Agua y Saneamiento en países en desarrollo (SANDEC), del Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuática (EAWAG), diera inicio a experimentos de laboratorio para evaluar la posibilidad de inactivar bacterias y virus en el agua, tras el uso combinado de radiación UV-A y el incremento de temperatura. Los resultados de las pruebas de laboratorio demostraron un gran potencial en la inactivación de microorganismos patógenos con este método.

Luego de obtener resultados satisfactorios a nivel laboratorio, la propuesta de este método fue evaluado en el campo, dando resultados positivos no sólo en la inactivación de bacterias y virus al utilizar energía solar, sino también en la aceptación cultural por parte de las personas que utilizaron este método en agua para su consumo. Debido a estos resultados EAWAG/SANDEC empezó a difundir el método SODIS a nivel mundial, para promover el uso de esta alternativa de desinfección en áreas que no cuentan con agua segura.

A partir de 1999 se lanzaron iniciativas de aplicación de SODIS en países de América Latina.

Según el estudio de campo de EAWAG/SANDEC (Meierhofer y colaboradores, 2003) en cuanto a la aceptación sociocultural del método SODIS, los usuarios indicaron que aprecian la sostenibilidad y simplicidad de esta alternativa. Un promedio de 84 por ciento de los usuarios señaló que definitivamente continuaría usando SODIS luego de concluidos los proyectos de demostración. Aproximadamente 13 por ciento de ellos señaló que consideraría usarlo en el futuro y solo 3 por ciento de los usuarios se rehusó a usar SODIS en la medida que su salud no se veía afectada por la calidad del agua que consumen.

Tabla I. **Resultados de la encuesta sobre la aceptación de SODIS**

<b>Continuaré usando SODIS</b>				
<b>País</b>	<b>Definitivamente</b>	<b>Quizás</b>	<b>Probablemente no</b>	<b>Definitivamente no</b>
Colombia	90	8	0	2
Bolivia	93	0	0	7
Burkina Faso	70	30	0	0
Togo	93	0	0	7
Indonesia	90	5	3	2
Tailandia	97	0	0	3
China	55	45	0	0
Promedio	84	12.6	0.4	3

Fuente: MEIERHOFER, Regula; WEGELIN, Martin y colaboradores.

*Desinfección solar del agua.* p. 15.

### **2.1.1. Ventajas de SODIS**

- Mejora la calidad microbiológica del agua y por ende la salud de las personas.
- Puede ser un punto de entrada para la educación en salud e higiene.
- Brinda a los usuarios un método simple para la desinfección del agua y es fácil de entender.
- No se requiere de infraestructura costosa.

### **2.1.2. Limitaciones de SODIS**

- Depende de las condiciones climáticas del lugar
- Requiere que la turbiedad del agua sea menor a 30 UNT
- No cambia la calidad química del agua
- No es útil para grandes volúmenes de agua

### **2.1.3. SODIS en Latinoamérica**

En los años noventa, EAWAG, en colaboración con el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA) de la Universidad Mayor San Simón de Cochabamba en Bolivia, implementaron proyectos demostrativos de la tecnología SODIS, para valorar el grado de aceptación de la misma por los usuarios.

Los buenos resultados que se presentaron en Bolivia por la tecnología SODIS en poblaciones rurales y urbanas, abrieron paso a la creación de la Fundación SODIS, para su difusión en América Latina a partir de octubre del 2000.

La Fundación SODIS es una organización no gubernamental que tiene como objetivo, contribuir a mejorar las condiciones de vida de las personas que no tienen acceso a agua potable. Hasta diciembre de 2008, esta Fundación ha apoyado más de 80 instituciones socias en la implementación de más de 160 proyectos en 7 países de América Latina, beneficiando a más de 1 600 000 personas en la región. Durante este tiempo, también han capacitado a más de 4 000 técnicos, comunicadoras y promotores de instituciones socias y 40 000 promotoras y dirigentes comunitarios. Actualmente se cuenta en 6 países con más de 1 000 000 de personas que trabajan en pro de este método de desinfección.

#### **2.1.4. SODIS en Guatemala**

En el 2005 se empezó a promover este método por parte de la Fundación SODIS, a través del tiempo muchas organizaciones no gubernamentales han incluido el método SODIS en varios de sus proyectos en el área rural por su simplicidad.

Se tiene la implementación de este método por Estudios y Proyectos de Ingeniería Civil y Sanitaria (EPICSA) en la región de Jalapa, la cual surgió luego de un entrenamiento intensivo por parte de la Fundación SODIS. EPICSA empezó a comunicar acerca del método SODIS y otros métodos simples para obtener agua apta para el consumo humano, con el fin de favorecer tanto la implementación de este método como la condición de salud de las personas de esta región.

## 2.2. Agua potable en Guatemala

En Guatemala, el cuarenta y cuatro por ciento de los municipios del país reporta contaminación bacteriológica en los abastecimientos de agua vigilados, se debe tomar en cuenta que el cuarenta y seis por ciento de los municipios no cuenta con vigilancia. Estas estadísticas indican que muchas familias guatemaltecas no tienen acceso a agua potable.

Carecer de agua apta para consumo humano constituye un riesgo para la salud, pues es un factor que contribuye a la transmisión de enfermedades gastrointestinales, "...las cuales constituyen el tercer lugar de enfermedades en niños de escasos recursos y es una de las primeras diez causas de morbilidad y mortalidad en el país".<sup>2</sup>

En Guatemala, la Norma COGUANOR 29001 (DRPSA, 2003) es la que regula la calidad del agua para el consumo humano. En esta se plasma los límites máximos aceptables y permisibles de compuestos químicos, características sensoriales, biocidas y límites bacteriológicos que debe contener el agua potable.

Para casos, en los cuales ya se tiene un historial, se permiten las siguientes alternativas:

- 5 tubos con porciones de muestra de 10 mililitros. La ausencia de gas en todos los tubos, se expresa como número más probables menor de 2,2 coliformes en 100 mililitros de agua.

---

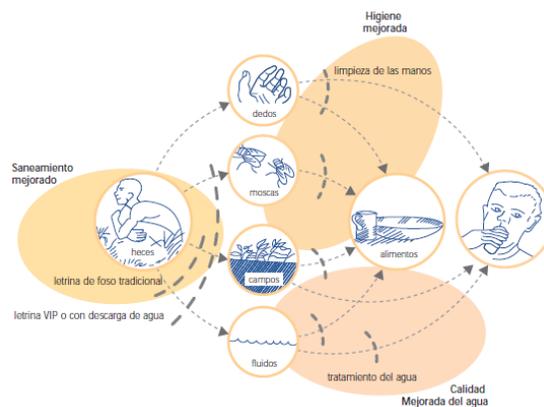
<sup>2</sup> Centro Nacional de Epidemiología. *Sala situacional desnutrición aguda (moderada y severa) <5 años*. p.15.

- 10 tubos con porciones de muestras de 10 mililitros cada una, la ausencia de gas en todos los tubos se expresa como número más probables menor de 1,1 coliformes en 100 mililitros de agua, lo que se interpreta como que esa muestra es adecuada para el consumo humano.

### 2.2.1. Transmisión de patógenos por agua

El agua se contamina fácilmente, pues al formar corrientes a causa de la lluvia, arrastra muchas cosas tales como; tierra, residuos, excrementos, detergentes, desechos de fábricas, fertilizantes, entre otros. El agua también se contamina cuando se descargan aguas negras sin tratamiento, o inclusive por la lenta contaminación que producen las letrinas en las aguas subterráneas. La condición del agua que ha sido afectada por los múltiples factores previamente mencionados, puede agravarse por una contaminación secundaria que es lo que respecta al almacenamiento o manipulación inadecuada.

Figura 2. Rutas de transmisión de patógenos



Fuente: Fuente: MEIERHOFER, Regula; WEGELIN, Martin y colaboradores.

*Desinfección solar del agua.* p. 13.

Los estudios en el país permiten identificar que los abastecimientos de agua presentan contaminación bacteriológica, comúnmente con bacterias pertenecientes al grupo coliforme. “El grupo coliforme está formado por todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gramnegativas, no formadoras de esporas y con forma de bastón que fermentan la lactosa, produciendo gas y ácido en 48 horas a 35 °C”<sup>3</sup>. Estas son una familia de bacterias que se encuentran tanto en las plantas y suelo como en animales (incluyendo a los humanos).

Para determinar la naturaleza de la contaminación en el agua, es necesario indagar e identificar qué tipo de bacterias se encuentran presentes. Las coliformes fecales son un indicador de contaminación fecal, la *Escherichia coli* y la *Enterobacter aerogen* son las especies más comunes de este grupo. La *E. coli* se encuentra en el intestino humano y en el de otros animales de sangre caliente, a este microorganismo se le atribuye ser el causante de algunas de las enfermedades gastrointestinales cuando se perforan los intestinos y logran acceder a la cavidad peritoneal, lo que sucede cuando las defensas del huésped se alteran.

---

<sup>3</sup> *Cresceri y colaboradores*. p.9-95.

Tabla II. **Enfermedades transmisibles por el agua**

Enfermedad	Organismo causante	Fuente del organismo en el agua
Gastroenteritis	Salmonella	Excrementos humanos o de animales
Tifoidea	Salmonella typhosa	Excrementos humanos
Disentería	Shigella	Excrementos humanos
Cólera	Vibro comma	Excrementos humanos
Hepatitis	Virus	Excrementos humanos o de mariscos
Amibiasis	Entamoebahystolítica	Excrementos humanos
Giardiasis	Giardialamblia	Excrementos humanos o de animales
Diarrea	E.Coli	Excrementos humanos o de animales

Fuente: LÓPEZ ORIZABAL, Mildred Carmina. *Efecto del color y la turbiedad en la eliminación de coliformes fecales al aplicar el método de desinfección solar en agua cruda proveniente de los vertederos de Acatán, Teocinte 18" y Canalitos de la planta potabilizadora Santa Luisa de la Ciudad de Guatemala.* p. 34 -35.

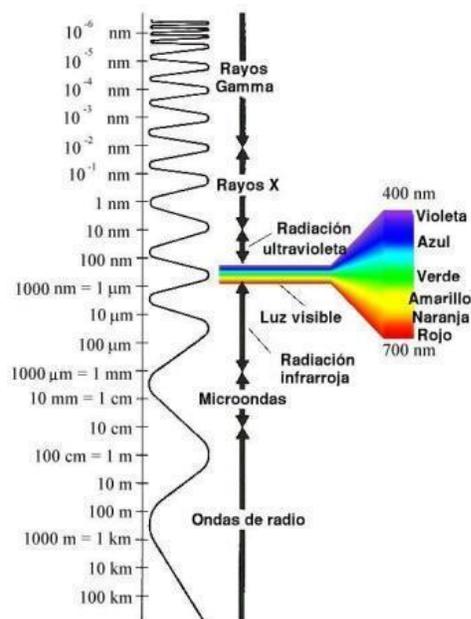
### 2.3. **Espectro electromagnético**

La radiación electromagnética abarca una amplia gama de longitudes de onda que van de  $10^{-10}$  micrómetros hasta más de  $10^{10}$  micrómetros, los diferentes tipos de radiación son producidos por varios mecanismos tal y como reacciones nucleares, bombardeo de electrones, entre otros.

El Sol es una fuente inagotable de energía debido a las reacciones nucleares de fusión que se producen en su núcleo y esta energía recibe el

nombre de radiación solar, que se transmite en forma de radiación electromagnética y alcanza la atmósfera terrestre como espectro visible, radiación ultravioleta e infrarroja. La Tierra recibe en el exterior de su atmósfera una potencia total de  $1.73 \cdot 10^{14}$  kilovatio.

Figura 3. **Espectro electromagnético**



Fuente: <https://www.google.com.gt>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.

### 2.3.1. **Radiación solar en Guatemala**

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol; la radiación solar incidente en la Tierra puede aprovecharse para varios fines. Esta puede alterarse por distintos factores, entre ellos: el aire, la suciedad, el vapor de agua, los aerosoles en suspensión; además de otros elementos de la atmósfera. Estas alteraciones son de diferentes tipos según la propiedad óptica que se pone de manifiesto:

- Reflexión: nubes.
- Absorción: ozono, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua. Solo actúa sobre algunas longitudes de onda de la radiación.
- Difusión: polvo, aerosoles, gotas de agua.

La energía solar que Guatemala recibe anualmente se encuentra alrededor de 200 000 teravatio-hora, “La captación del 0,05 por ciento de este recurso podría ser suficiente para cubrir la demanda total de energía del país”<sup>4</sup>. El valor anual de radiación global solar sobre el territorio nacional es de aproximadamente 5,3 kilovatio-hora por metros cuadrados por día.

Latitudinalmente, Guatemala se encuentra bien ubicada para el aprovechamiento de la energía solar, pues se encuentra en el cinturón solar (regiones entre las latitudes de 30 grados norte y sur), pero la alta nubosidad es un factor que no permite aprovechar completamente este potencial, principalmente en la costa atlántica.

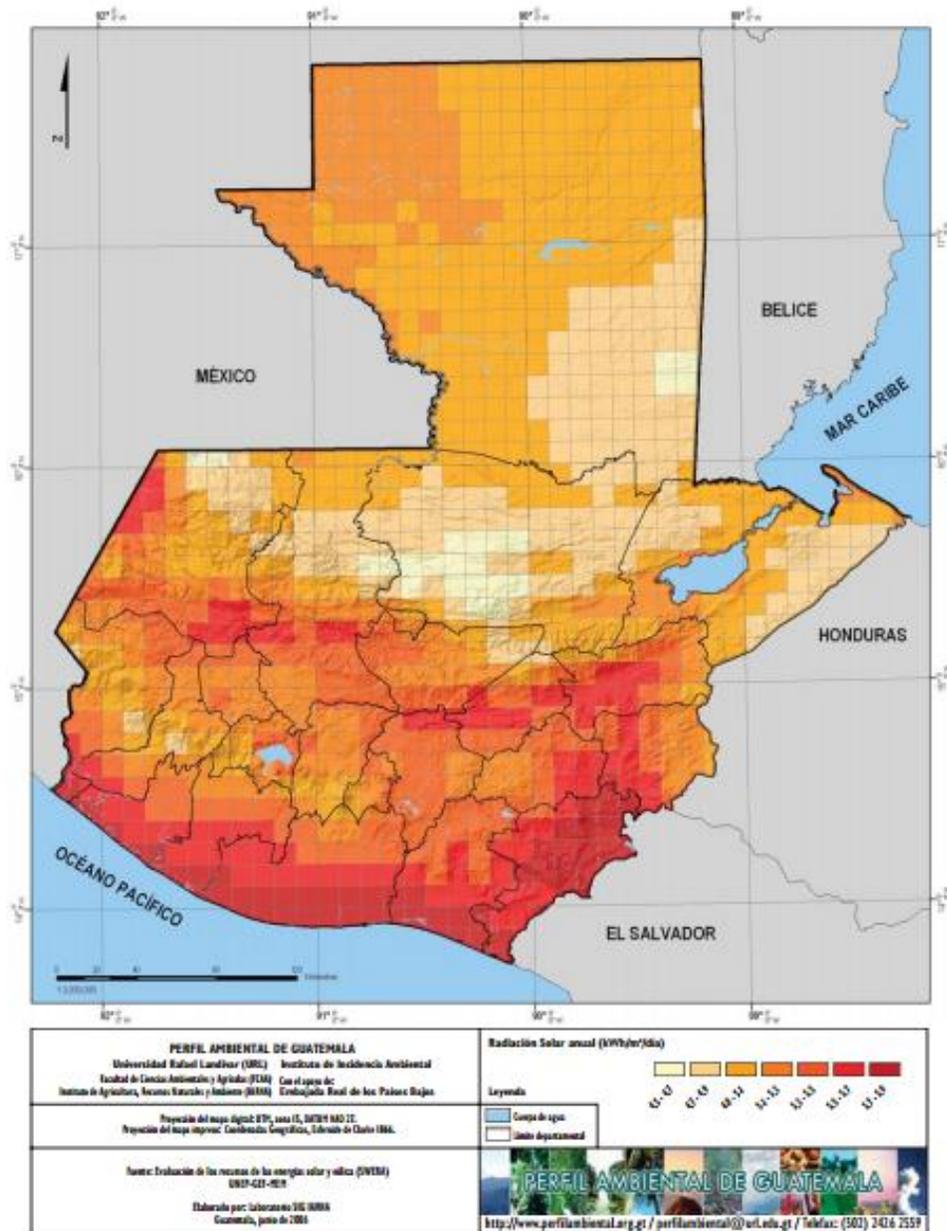
Una característica del clima de Guatemala es que durante la época más fría (diciembre y enero), existe un amplio recurso solar, principalmente en el altiplano donde las temperaturas bajan a cero grados durante la noche, pero los niveles de radiación son entre 5 y 5,3 kilovatio-hora por metros cuadrados por día.

Por esto, las aplicaciones solares térmicas para bajas y medianas temperaturas tienen un potencial energético alto en el país.

---

<sup>4</sup> Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Perfil ambiental de Guatemala, p. 181.

Figura 4. Mapa de radiación solar directa anual en Guatemala



Fuente: [http://www.infoiarna.org.gt/media/file/PERFAM2006\\_2.10%22ENERGIA.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/media/file/PERFAM2006_2.10%22ENERGIA.pdf). Consulta: 2 de noviembre de 2012.

### **2.3.2. Efecto de la radiación solar sobre microorganismos patógenos**

La desinfección solar del agua funciona por dos componentes de la radiación solar, la ultravioleta y la infrarroja.

La radiación ultravioleta se puede clasificar en tres tipos:

- UV-A: no absorbida por la capa de ozono.
- UV-B: parcialmente absorbida la capa de ozono.
- UV-C: completamente absorbida por el oxígeno y el ozono en la atmósfera.

La radiación UV-A abarca la longitud de onda de 320 a 400 nanómetros la cual causa severos daños a las células vivas, haciéndola tan efectiva sobre la remoción de los microorganismos patógenos presentes en el agua; pues interactúa directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas, haciéndolas cambiar su estructura molecular que puede producir la muerte de la célula. La radiación infrarroja provoca el aumento de temperatura en el agua, por lo que la combinación de radiación infrarroja y UV-A daña a los microorganismos patógenos, pues son susceptibles al aumento de temperatura y a la exposición de la luz, ya que estos viven en el tracto gastrointestinal humano.

Tabla III. Resistencia térmica de los microorganismos

Microorganismos	Temperatura para una desinfección al 100%			
	1 min	6 min	30 min	60 min
Enterovirus				62 °C
Rotavirus			63 °C	
Coliformes fecales		62 °C		58 °C
Shigella		61 °C		54 °C
Vibrio cholerae				45 °C
Quistes de entamoebahistolytica	57 °C	54 °C		50 °C
Quistes de guardia	57 °C	54 °C		50 °C
Huevos y larvas de gusano ganchudo		62 °C		51 °C
Huevos de áscaris	68 °C	62 °C		57 °C
Huevo de esquistosoma	60 °C	55 °C		50 °C
Huevos de tenia	65 °C	57°C		51°C

Fuente: MEIERHOFER, Regula; WEGELIN, Martin y colaboradores.  
*Desinfección solar del agua.* p. 19.

## 2.4. Fundación TECHO

Es una organización integrada por jóvenes voluntarios de distintas disciplinas u ocupaciones, presente en Latinoamérica y El Caribe, que busca superar la situación de pobreza y exclusión social, a través de la acción conjunta de los pobladores de asentamientos precarios con los voluntarios de la organización.

El modelo de trabajo con comunidades de TECHO se divide en distintas etapas que buscan como fin el desarrollo comunitario.

La etapa inicial consiste en la inserción en asentamientos precarios para el desarrollo de un diagnóstico socioeconómico y de vulnerabilidad de los mismos. En la segunda etapa se gestionan e implementan soluciones con base a las necesidades identificadas en el diagnóstico, a través del trabajo en conjunto con los pobladores de las comunidades y los voluntarios, para fortalecer y potenciar las capacidades de autogestión en la comunidad. En esta etapa se gestiona la construcción de viviendas de emergencia, las cuales responden a una necesidad latente en la mayoría de asentamientos, que genera además de un vínculo de confianza entre la comunidad y voluntarios, una solución tangible e inmediata a una de las necesidades básicas de los pobladores.

La última fase promueve la implementación de soluciones definitivas a las principales problemáticas de los asentamientos a través de la organización comunitaria y el trabajo por medio de redes.

#### **2.4.1. Vivienda de Emergencia**

Es un módulo prefabricado de madera de 18 metros cuadrados, el cual se arma con los siguientes elementos:

- 12 pilotes de 0,80 a 2,5 metros según el desnivel del terreno.
- 9 vigas de piso de 4x4 pulgadas con 8 pies de largo.
- 3 paneles de piso de 2,03x3,00 metros.
- 6 paneles verticales (2 laterales, 1 frontal izquierdo, 1 frontal derecho, 1 panel trasero derecho y 1 trasero izquierdo).
- 8 vigas de techo de 1x4 pulgadas con 12 pies de largo.

- 8 costaneras de 2x2 pulgadas con 12 pies de largo.
- 10 láminas de 11 pies de largo.
- 3 ventanas y 1 puerta.

Figura 5. **Modelos 3D de la Vivienda de Emergencia**



Fuente: Dirección de Construcción TECHO.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

A continuación se especificarán las variables utilizadas y los cálculos realizados, para la ejecución de esta investigación.

##### 3.1.1. Tiempo de muestreo

Tomando en cuenta que para este estudio el número de muestras fue de 30 (calculado en el análisis estadístico, sección 3,8), y que se decidió agregar 5 muestras más dando como resultado final 35, se determinó un muestreo cada dos horas con el fin de obtener una tendencia apreciable y un número razonable de muestras a analizar por día.

Tabla IV. Intervalos para agrupar datos

Número de muestras	Intervalos
Menos de 50	5 a 7
Entre 50 y 100	6 a 10
Entre 100 y 250	7 a 12
Más de 250	10 a 20

Fuente: RODRÍGUEZ OJEDA, Luis. *Probabilidad y estadística básica para ingeniero*. p. 12.

### **3.1.2. Temperatura**

La temperatura se midió en los intervalos de tiempo establecidos, para observar su comportamiento durante el experimento.

### **3.1.3. Conteo de coliformes totales**

Las muestras tomadas se analizaron por el método de tubos múltiples de fermentación según las especificaciones de la Norma COGUANOR. NGO 29001 (DRPSA, 2003), en donde se observó su variación en función del tiempo de exposición a la luz.

### **3.1.4. Conteo de coliformes fecales**

Las muestras tomadas se analizaron por el método de tubos múltiples de fermentación según las especificaciones de la Norma COGUANOR. NGO 29001 (DRPSA, 2003), en donde se observó su variación en función del tiempo de exposición a la luz.

### **3.1.5. Flujo volumétrico**

El flujo volumétrico estimado para este estudio, se calculó con la siguiente ecuación:

$$Q = A * V \quad \text{[Ecuación 1]}$$

$$Q = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) * V$$

Donde:

Q= flujo volumétrico ( $m^3/s$ )

A= área de la tubería ( $m^2$ )

D=diámetro de la tubería (m)

V= velocidad promedio del flujo (m/s)

Para este estudio, la tubería fue una manguera transparente de 1 pulgada de diámetro externo con 3 milímetros de espesor; la velocidad promedio del flujo se asumió como un valor intermedio del rango que se da para una línea de conducción según la tabla V:

Tabla V. **Velocidad de fluidos en tuberías**

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5-1	0.15-0.30
	Entrada de bomba	1-3	0.3-0.9
	Salida de bomba	4-10	1.2-3
	Línea de conducción	4-8	1.2-2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2-0.5	0.06-0.15
	Salida de bomba	0.5-2	0.15-0.6
Vapor de agua	-	30-50	9-15
Aire o gas	-	30-100	9-30

Fuente: MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 190.

Entonces, para este caso, el flujo volumétrico esperado fue aproximadamente:

$$Q = \left( \frac{\pi(0,0224\text{m})^2}{4} \right) * (1,8 \text{ m/s})$$

$$Q = 0,0007 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.1.6. Potencia de la bomba

La potencia de la bomba requerida según el flujo volumétrico estimado, se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$P_A = h_A \gamma Q \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

$P_A$  = potencia que se agrega al fluido. (W)

$h_A$  = energía agregada por dispositivos mecánicos. (m)

$\gamma$  = peso específico del fluido. ( $\text{N}/\text{m}^3$ )

$Q$  = flujo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{\gamma} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{\gamma} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

$P_1$  = presión en el punto inicial del sistema. (kPa)

$P_2$  = presión en el punto final del sistema. (kPa)

$h_A$  = energía agregada por dispositivos mecánicos. (m)

$h_R$ = energía que se remueve del fluido por dispositivos mecánicos. (m)

$h_L$ = pérdidas de energía del sistema por fricción en la tubería. (m)

$\gamma$ = peso específico del fluido. (N/m<sup>3</sup>)

$Z_1$ = altura inicial (m)

$Z_2$ = altura final (m)

$Q$ = flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/s)

Despejando:

$$h_A = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{\gamma} + h_R + h_L$$

$P_1$  y  $P_2$  se asume como cero pues el cambio de presión no es representativo ya que el sistema es cerrado, también  $h_R$  se asume como cero pues el fluido no impulsa ningún dispositivo.

Entonces:

$$h_A = (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{\gamma} + h_L$$

La altura máxima de la vivienda en donde se instaló el sistema es de 3 metros, se asumió la velocidad inicial como cero y  $h_L$  como 8,34 metros luego de haber tomado en cuenta el número de Reynolds, y el factor de fricción bajo condiciones estándar para este sistema:

$$h_A = (3\text{m} - 0\text{m}) + \frac{1,8 \text{ m/s}^2 - 0^2}{\frac{9,78\text{E}3\text{N}}{\text{m}^3}} + 8,34\text{m}$$

$$h_A=15,5 \text{ m}$$

Calculando la potencia de la bomba requerida:

$$P_A=(15,5\text{m})\left(\frac{9,78\text{E}3\text{N}}{\text{m}^3}\right)\left(0,0007\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

$$P_A=107,53 \text{ W}$$

$$P_A=0,14 \text{ hp}$$

Con base al resultado de los cálculos, se eligió una bomba de desplazamiento positivo la cual cumplía con esta especificación.

### **3.1.7. Orientación**

La orientación óptima para colocar el sistema es al sur, pues es perpendicular a la dirección del Sol, ya que Guatemala se encuentra en el hemisferio norte del planeta; debido a la orientación de la Vivienda de Emergencia de la oficina de la Fundación TECHO, el sistema se orientó al sudeste, lo cual no fue lo óptimo, pero permitió aprovechar el recorrido del Sol durante el día.

### **3.1.8. Ángulo de inclinación**

El ángulo de inclinación óptimo de aprovechamiento de radiación solar en una superficie fija, se calculó con una fórmula basada en análisis estadísticos de radiación solar anual sobre superficies con diferentes inclinaciones, situadas

en lugares de diferentes latitudes que proporciona la inclinación óptima en función de la latitud del lugar:

$$\beta_{\text{opt}} = 3.7 + 0.69 \cdot |\varphi| \quad [\text{Ecuación 4}]$$

Donde:

$\beta_{\text{opt}}$  = ángulo de inclinación óptima (grados)

$|\varphi|$ : latitud del lugar (grados)

La fórmula es válida para aplicaciones de utilización anual que busquen la máxima captación de energía solar a lo largo del año.

Entonces para este estudio el ángulo óptimo utilizado fue el siguiente:

$$\beta_{\text{opt}} = 3,7 + 0,69 \cdot |14,58^\circ|$$

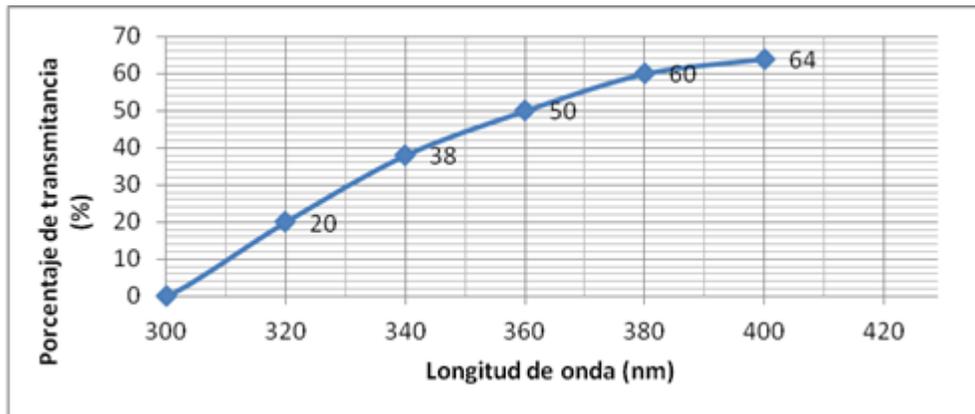
$$\beta_{\text{opt}} = 13^\circ$$

### **3.1.9. Materiales transparentes**

- Manguera de PVC

A continuación se observa la gráfica con el análisis de transmitancia, en el espectro UV-A para la manguera atóxica de PVC:

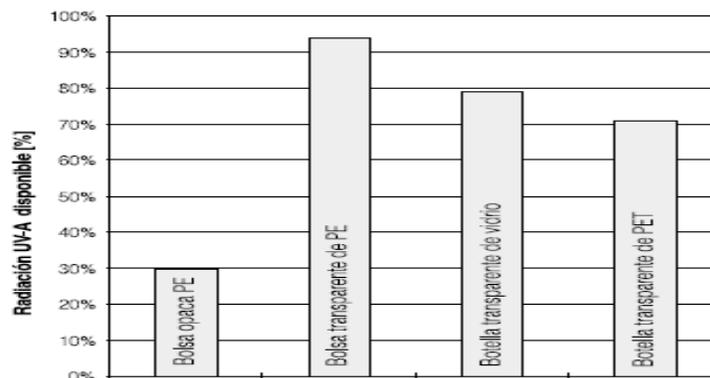
Figura 6. **Análisis de porcentaje de transmitancia en el espectro UV-A para manguera atóxica de PVC**



Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 2.

- Vidrio (pyrex, corex, vycor o vidrios de cuarzo) y botellas de PET

Figura 7. **Porcentaje de radiación UV-A disponible para diferentes materiales transparentes**



Fuente: [http://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex\\_files/SKAT/SKAT1%20-Solar%20disinfection%20of%20water/Notas\\_Tecnicas\\_SODIS.pdf](http://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex_files/SKAT/SKAT1%20-Solar%20disinfection%20of%20water/Notas_Tecnicas_SODIS.pdf). Consulta: 2 de septiembre de 2012.

El material utilizado para este estudio fue la manguera de PVC, pues a pesar de que el porcentaje de transmitancia es menor en comparación a los otros materiales transparentes, presentó las siguientes ventajas sobre los otros materiales:

- No es frágil.
- El diseño permite manejar un volumen mayor.
- Es flexible.
- El precio es más bajo en comparación con los tubos de vidrio.
- El diámetro externo de la manguera es de 1 pulgada (0,0254 m) menor a la profundidad establecida por la Fundación SODIS (0,10 m).

A continuación se presenta la información comercial de la manguera de PVC (diámetro interno 3/4" y diámetro externo 1") utilizada:

Figura 8. **Manguera de PVC atóxica**

**Manguera no tóxica, sin refuerzo (transparente)**  
Manguera no tóxica para la conducción de alimentos y bebidas. La superficie interna del tubo es totalmente lisa para prevenir la acumulación de residuos y la formación de depósitos. Tubo totalmente transparente que facilita la inspección.

**Tubo:** Compuesto flexible de PVC de alta calidad

Cumple con los requisitos del FDA (FDA-CFR Title 21 parts 170 to 199)



Diámetro Interno (pulg.)	Diámetro Externo (pulg.)	Diámetro Externo (mm)	Espesor de pared (pulg.)	Máx. Presión de Trabajo Recom. (PSI)
1/8	0.250	6.4	1/16	65
3/16	0.313	7.9	1/16	55
1/4	0.375	9.5	1/16	55
1/4	0.438	11.1	3/32	58
5/16	0.500	12.7	3/32	55
3/8	0.500	12.7	1/16	45
3/8	0.563	14.3	3/32	50
7/16	0.563	14.3	1/16	35
1/2	0.625	15.9	1/16	30
1/2	0.688	17.5	3/32	40
5/8	0.813	20.6	3/32	35
3/4	1.000	25.4	1/8	35
7/8	1.125	28.6	1/8	30
1	1.250	31.8	1/8	25
1	1.375	34.9	3/16	30
1-1/4	1.625	41.3	3/16	30
1-1/2	1.875	47.6	3/16	30
1-1/2	2.000	50.8	1/4	35
2	2.500	63.5	1/4	35

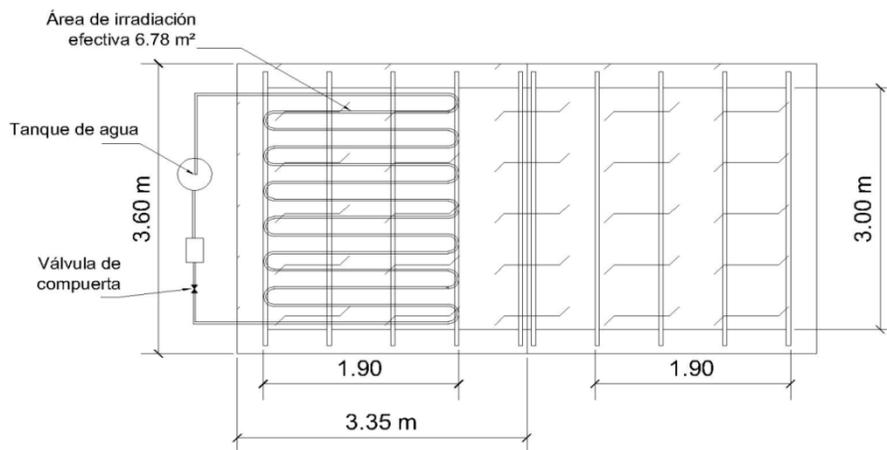
Fuente: elaboración propia, con base en la referencia 11, Mangueras Industriales S. A.

### 3.1.10. Área efectiva de irradiación

El área efectiva de irradiación es la radiación incidente por unidad de superficie en un período de tiempo determinado, por lo tanto para aprovechar la radiación solar, el sistema de desinfección necesariamente se expuso al ambiente. Por esto el mismo se colocó sobre el techo de la vivienda de emergencia de la Fundación TECHO como prueba piloto.

Debido al diseño de la vivienda se determinó que la manera más conveniente de montar el sistema de desinfección, es a partir de la segunda costanera para facilitar su instalación y no cargar con más peso la primera costanera, pues en esta se encuentra la cumbrera.

Figura 9. Vista de planta del área efectiva de irradiación



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

### **3.2. Clasificación de las variables**

A continuación se detallan las variables independientes y dependientes, para este estudio.

#### **3.2.1. Variables independientes**

- Flujo volumétrico
- Orientación del sistema
- Ángulo de inclinación del sistema
- Tiempo de muestreo
- Área efectiva de irradiación
- Material transparente
- Intensidad de radiación solar

#### **3.2.2. Las variables dependientes**

- Temperatura
- Conteo de coliformes fecales
- Conteo de coliformes totales

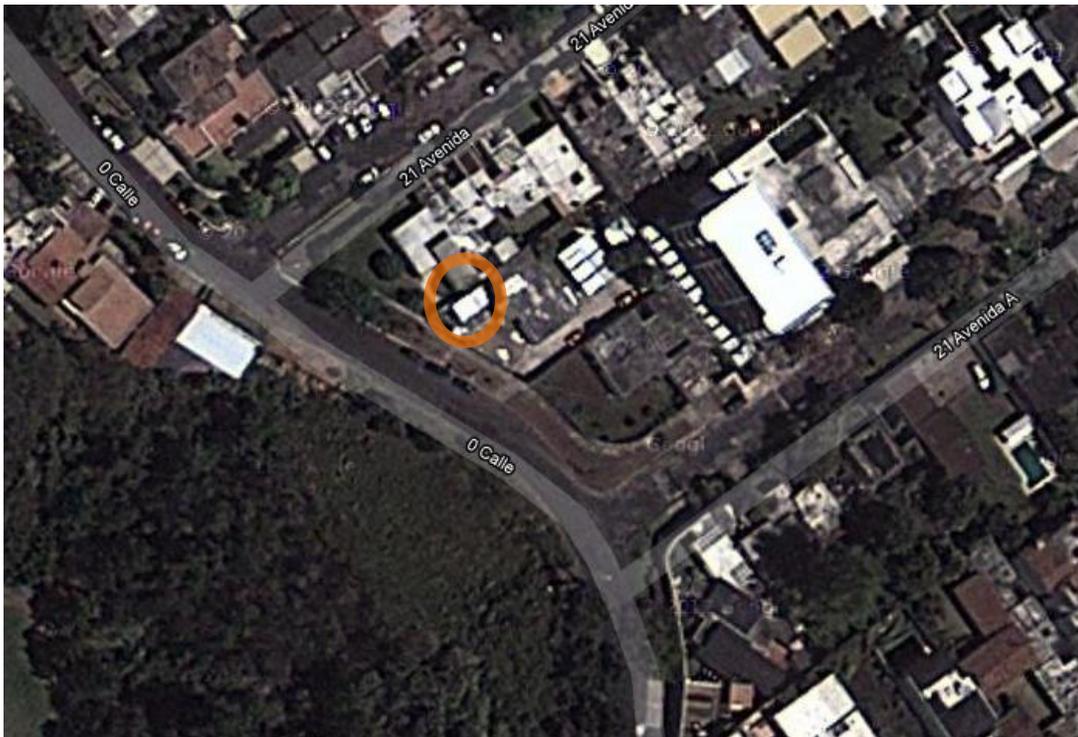
### **3.3. Delimitación de campo de estudio**

El sistema de desinfección se instaló en el modelo de vivienda de emergencia de la oficina de TECHO, con el propósito de que el sistema se adapte al diseño de las viviendas en el área rural.

- Dirección: 0 calle 21-13 zona 15, Vista Hermosa II.

- Coordenadas geográficas de Vista Hermosa: 14,58° 67 '68" norte, 90,49° 32' 68" oeste.

Figura 10. **Localización de la oficina de TECHO, Guatemala**



Fuente: <https://maps.google.com.gt>. Consulta: 2 de septiembre de 2012.

Las muestras de agua a tratar provinieron del abastecimiento de agua de la aldea Buena Vista, del municipio de Iztapa, Escuintla; dado que este abastecimiento presenta contaminación bacteriológica según informes del Área de Salud Escuintla.

- Coordenadas geográficas de Buena Vista: 13° 55' 44" norte, 90° 44' 44" oeste.

Figura 11. **Localización de la aldea Buena Vista, Iztapa**



Fuente: <https://maps.google.com.gt>. Consulta: 2 de septiembre de 2012.

#### **3.4. Recursos humanos disponibles**

- Investigadora principal: María Isabel Oliva Herrera
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

- Colaboradores:
  - Historial de los análisis de agua 2011 y 2012 de la aldea Buena Vista, Iztapa, Escuintla: Dirección del Área de Salud, Escuintla.
  - Análisis de porcentaje de transmitancia en la manguera de PVC: SERQUIM S. A. Laboratorio de análisis industrial, servicios químicos y microbiológicos.
    - ❖ Dirección: avenida del Cementerio Las Flores 11-66, zona 7 de Mixco, lotificación Los Pinos, Ciudad de Guatemala. Teléfono: 2434-5930.
  - Instalación de la bomba: Hidrobombas S. A.
    - ❖ Dirección: Boulevard Liberación 15-86 zona 13, edificio Obelisco, tercer nivel, oficina 302, ciudad de Guatemala, teléfono: 5482-0723

### **3.5. Recursos materiales disponibles**

- Termómetro (0 °C -100 °C)
- Cronómetro
- Turbidímetro H193703 Hanna (0-1000 STU)
- Manguera transparente de PVC atóxica
- Curvas de PVC de 1 ¼ de pulgada de diámetro
- Abrazaderas de 1 pulgada
- Bomba de 1/6 de hp de potencia
- Garrafón de 18,9 litros

- Adaptadores macho de PVC
- Pegamento de PVC
- Tubería de PVC de 1 pulgada de diámetro
- Grifos de muestreo de PVC
- Laboratorio de Química y Microbiología del CII-USAC, edificio T5 USAC

### 3.6. Técnica cualitativa o cuantitativa

Las variables específicas del diseño de este estudio, proporcionaron datos que se analizaron con criterios de validez según el significado estadístico de estos, lo cual permitió comprobar la hipótesis y alcanzar los objetivos planteados.

### 3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Para el ordenamiento de los datos registrados por día, se elaboró la tabla VI, con el fin de incluir las variables más importantes:

Tabla VI. **Recolección de datos tomados por día**

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura del agua (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	$t_{0,d}$	$T_{0,d}$	$I_{0,d}$
B	10:00	$t_{1,d}$	$T_{1,d}$	$I_{1,d}$
C	12:00	$t_{2,d}$	$T_{2,d}$	$I_{2,d}$
D	14:00	$t_{3,d}$	$T_{3,d}$	$I_{3,d}$
E	16:00	$t_{f,d}$	$T_{f,d}$	$I_{4,d}$

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para el ordenamiento de los resultados por día, se elaboró la tabla VII, en donde se registran los elementos de entrada del análisis de este estudio:

Tabla VII. **Resultados de las muestras analizadas por día**

Muestra	Tiempo (h)	Temperatura del agua (°C)	Turbiedad (UNT)	Coliformes totales (NMP/100 cc TF)	Coliformes fecales (NMP/100 cc TF)	Intensidad de radiación (W/m <sup>2</sup> )
A	t <sub>0,d</sub>	T <sub>0,d</sub>	Tu <sub>0,d</sub>	A <sub>1,0,d</sub>	A <sub>1,0,d</sub>	I <sub>prom,d</sub>
B	t <sub>1,d</sub>	T <sub>1,d</sub>		B <sub>1,1,d</sub>	B <sub>1,1,d</sub>	
C	t <sub>2,d</sub>	T <sub>2,d</sub>		C <sub>1,2,d</sub>	C <sub>1,2,d</sub>	
D	t <sub>3,d</sub>	T <sub>3,d</sub>		D <sub>1,3,d</sub>	D <sub>1,3,d</sub>	
E	t <sub>f,d</sub>	T <sub>f,d</sub>		E <sub>1,f,d</sub>	E <sub>1,f,d</sub>	

Fuente: elaboración propia.

### 3.9. Análisis estadístico

En este se detallan las consideraciones previas a la realización del experimento, como también el análisis de resultados obtenidos.

#### 3.9.1. Número de muestras

Para calcular el número de muestras para este estudio se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 pq}{e^2}$$

[Ecuación 5]

Donde:

n = número de muestras (adimensional)

$Z_{\alpha}$  = variable de confiabilidad de la distribución normal (adimensional)

p = probabilidad de éxito (adimensional)

q = probabilidad de fracaso (adimensional)

e = error de estimación (adimensional)

Las muestras de agua a tratar provinieron del abastecimiento de agua de la aldea Buena Vista, del municipio de Iztapa, Escuintla. Según informes de dicho abastecimiento, se determinó por medio de proporciones el número de muestras para una confiabilidad del 95 por ciento, y tomando como probabilidad de éxito las muestras de agua que no eran aptas para el consumo humano:

$$p = 8/9$$

$$q = 1/9$$

$$n = \frac{(1,64)^2 \left(\frac{8}{9}\right) \left(\frac{1}{9}\right)}{(0,05)^2}$$

$$n = 106,25 \cong 110$$

El número de muestras para este estudio debería ser de al menos 106,25, pero se aproxima a 110, pues así se obtiene un número homogéneo de muestras por día. Debido a que el análisis de 110 muestras no era viable para este estudio, el error de estimación se aumentó a 10 por ciento:

$$n = \frac{(1,64)^2 \left(\frac{8}{9}\right) \left(\frac{1}{9}\right)}{(0,10)^2}$$

$$n = 26,56 \cong 30$$

Dado que el número de muestras por día estimadas eran 5, el resultado se aproximó a 30. Este número de muestras sí era más rentable de analizar en comparación con el cálculo previo a este.

### 3.9.2. Media muestral

La media muestral representa el promedio aritmético de los datos, tomando en cuenta las variaciones que estos presentan:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio estadístico (adimensional)

$x_i$  = valor  $i$ -ésimo de la variable  $x$  (adimensional)

$n$  = número de valores que toma la variable  $x$  (adimensional)

### 3.9.3. Desviación estándar

La desviación estándar cuantifica la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, dando como resultado el error muestral:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{x} - x_i|}{n-1}}$$

[Ecuación 7]

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio estadístico de la variable “x” (adimensional)

$x_i$  = valor i-ésimo de la variable “x” (adimensional)

$n$  = número de valores que toma la variable “x” (adimensional)

$S_x$  = desviación estándar de la variable “x” (adimensional)

### 3.9.4. Varianza

La varianza cuantifica las distancias de los datos con respecto al valor de la media:

$$S_x^2 = \sigma_x^2$$

[Ecuación 8]

Donde:

$S_x^2$  = varianza de la variable “x” (adimensional)

$\sigma_x$  = desviación estándar de la variable “x” (adimensional)

### 3.9.5. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Inicialmente se debe considerar que la cantidad de muestras recolectadas fue pequeña debido al ajuste que se propuso previamente (30 muestras inicialmente, pero a esto se sumaron 5 más) y que se decidió realizar el análisis estadístico por medio del porcentaje de remoción, el cual se calculó por medio

de la diferencia entre el valor inicial y el valor de la siguiente hora, expresada como porcentaje:

$$\%_R = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100 \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

$\%_R$  = porcentaje de remoción (%)

$C_o$  = cantidad de coliformes inicial (NMP/100cm<sup>3</sup>)

$C_f$  = cantidad de coliformes final (NMP/100cm<sup>3</sup>)

Luego de calcular el porcentaje de remoción, se procedió a determinar si estos datos tenían una distribución normal:

$$P = \max |S_n(x_i) - F_0(x_i)| \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Donde:

D = valor P (adimensional)

$S_n$  = función de distribución acumulada empírica (adimensional)

$F_0$  = función de distribución acumulada (adimensional)

Los resultados de los cálculos realizados, se presentan en la tabla VIII:

Tabla VIII. **Datos y resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov**

Datos estadístico	Resultados
Z de Kolmogorov-Smirnov	1,370
Sig. asintót. (bilateral)	0,047

Fuente: elaboración propia, con datos del Programa SPSS.

El resultado que indica la tabla VIII, evidencia que los datos no tienen una distribución normal, por lo que se utilizaron pruebas no paramétricas para su análisis.

### 3.9.6. Prueba de Kruskal Wallis

Según el resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov se determinó que se debe utilizar una prueba no paramétrica, con base a lo anterior se procedió a estimar posibles diferencias para los porcentajes de reducción, agrupando las observaciones en 5 grupos de acuerdo a la hora en que fueron analizadas:

$$h = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{r_i^2}{n_i} - 3(n+1) \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Donde:

n= número de observaciones (adimensional)

r= suma de rangos (adimensional)

k= número de muestras (adimensional)

h= resultado de la prueba de Kruskal Wallis (adimensional)

Para los porcentajes de reducción se obtuvieron los estadísticos descriptivos, posteriormente se aplicó la prueba no paramétrica de rangos Kruskal-Wallis, para identificar posibles diferencias entre los 5 grupos. Estos resultados se utilizaron para obtener los estadísticos de contraste que se detallan en la tabla IX:

Tabla IX. **Estadísticos de contraste de los datos correspondientes al porcentaje de reducción**

Dato estadístico	Resultado
Chi-cuadrado	8,069
GI	4
Significación asintótica	0,089

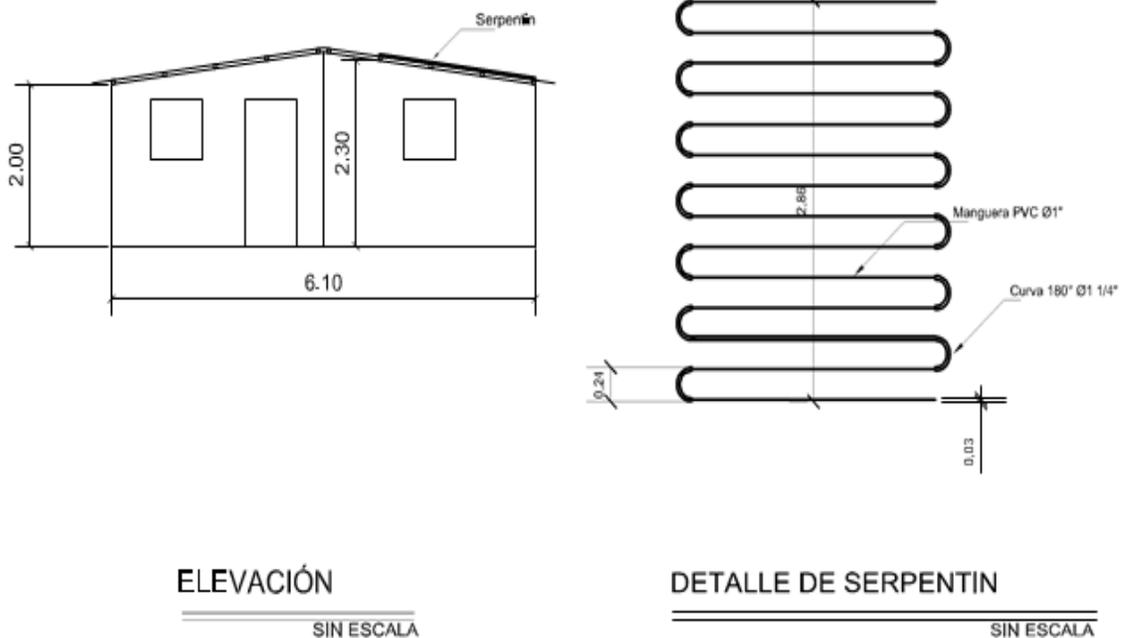
Fuente: elaboración propia, con datos del Programa SPSS.

Según el resultado de la significación estadística que es mayor a 0,05, se puede afirmar que con estos datos no es posible demostrar diferencias significativas en los porcentajes de reducción, de las distintas horas de análisis.

## 4. RESULTADOS

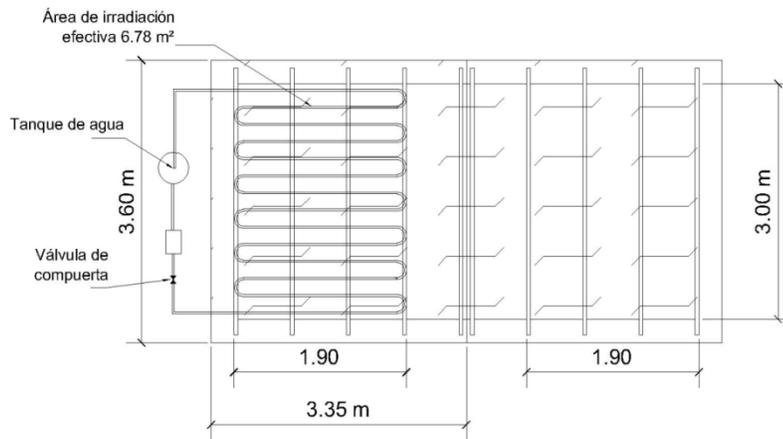
En las figuras 12 a la 17 de la presente sección, se detalla el diseño del sistema de desinfección solar, su construcción e implementación. En las tablas X a la XIII se tienen los datos obtenidos durante el experimento y su análisis estadístico. Los datos se observan gráficamente de la tabla XVIII a la XX.

Figura 12. **Diseño del sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 13. **Vista de planta del diseño del sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 14. **Vista 3D del diseño del sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 15. **Sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua construido**



Fuente: oficina TECHO, zona 15, ciudad de Guatemala.

Figura 16. **Sistema de desinfección solar de agua con recirculación continua construido**



Fuente: oficina TECHO, zona 15, ciudad de Guatemala.

Figura 17. **Válvulas para eliminar agua remanente del sistema de desinfección solar al terminar el ciclo de desinfección**



Fuente: oficina TECHO, zona 15, ciudad de Guatemala.

Tabla X. Consolidado de los resultados del muestreo (día 1 y 2)

Muestra	Tiempo (h)	Temperatura del agua (°C)	Turbiedad (UNT)	Coliformes totales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Coliformes fecales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Promedio intensidad radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
<b>Día 1 (10/02/2013)</b>						
A	0	25,13	7,16	4	<2	669,02
B	2	30,85		<2	<2	
C	4	33,70		2	<2	
D	6	34,00		<2	<2	
E	8	33,20		<2	<2	
<b>Día 2 (17/02/2013)</b>						
A	0	21,70	1,80	4	<2	714,03
B	2	23,30		<2	<2	
C	4	26,60		2	<2	
D	6	27,70		<2	<2	
E	8	24,10		<2	<2	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Consolidado de los resultados del muestreo (día 3, 4 y 5)

Muestra	Tiempo (h)	Temperatura del agua (°C)	Turbiedad (UNT)	Coliformes totales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Coliformes fecales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Promedio intensidad radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
<b>Día 3 (24/02/2013)</b>						
A	0	25,60	0,35	>1600	33	706,49
B	2	30,80		900	8	
C	4	34,30		500	33	
D	6	35,40		>1600	8	
E	8	29,90		300	4	
<b>Día 4 (03/03/2013)</b>						
A	0	20,30	1,00	>1600	17	731,01
B	2	22,80		>1600	>1600	
C	4	23,40		>1600	50	
D	6	25,80		>1600	500	
E	8	23,80		>1600	6	
<b>Día 5 (07/04/2013)</b>						
A	0	28,50	0,53	8	<2	720,50
B	2	34,50		<2	<2	
C	4	35,00		<2	<2	
D	6	35,00		2	<2	
E	8	29,00		<2	<2	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Consolidado de los resultados del muestreo (día 6 y 7)

Muestra	Tiempo (h)	Temperatura del agua (°C)	Turbiedad (UNT)	Coliformes totales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Coliformes fecales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Promedio intensidad radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
<b>Día 6 (14/04/2013)</b>						
A	0	26,70	1,20	>1600	17	703,09
B	2	33,20		>1600	<2	
C	4	34,00		140	26	
D	6	36,70		>1600	9	
E	8	26,50		90	23	
<b>Día 7 (21/04/2013)</b>						
A	0	25,10	1,56	900	14	580,69
B	2	29,90		>1600	4	
C	4	32,50		>1600	<2	
D	6	36,70		1600	2	
E	8	26,50		1600	50	

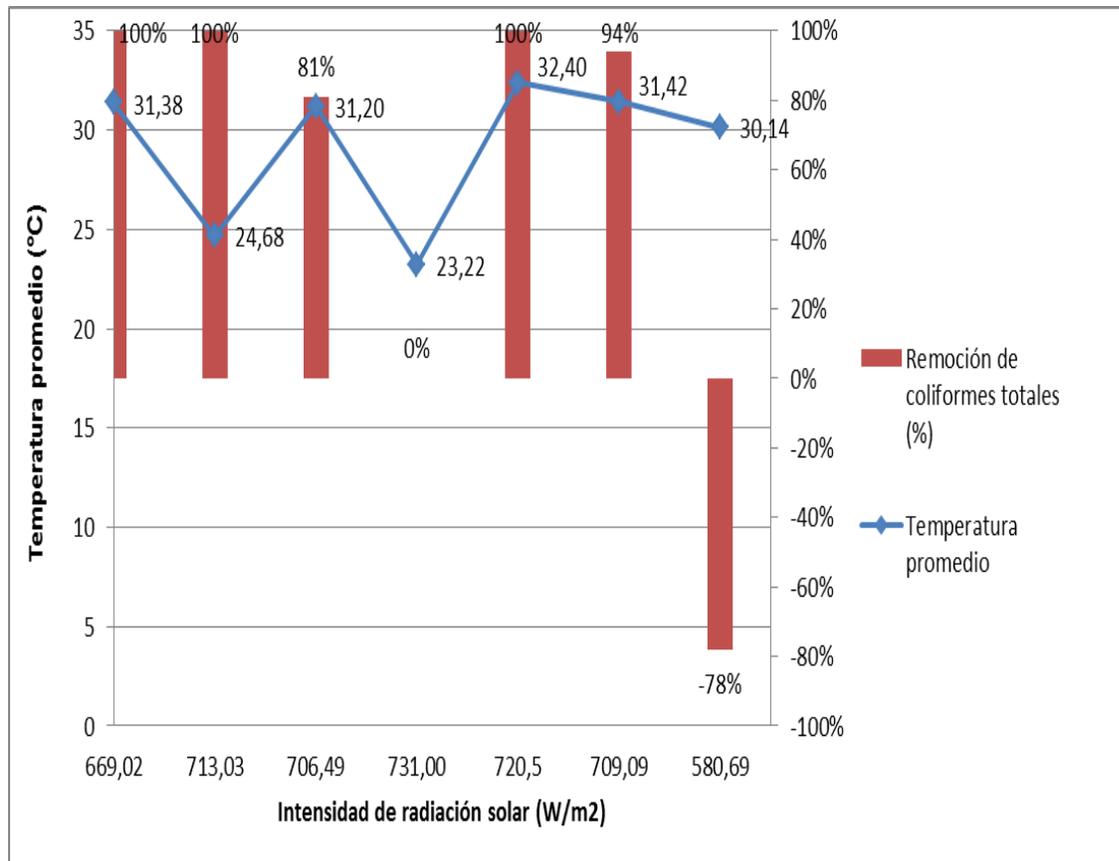
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Estadísticos de contraste de los datos correspondientes al porcentaje de reducción de coliformes totales

Dato estadístico	Resultado
Chi-cuadrado	8,069
Gl	4
Significación asintótica	0,089

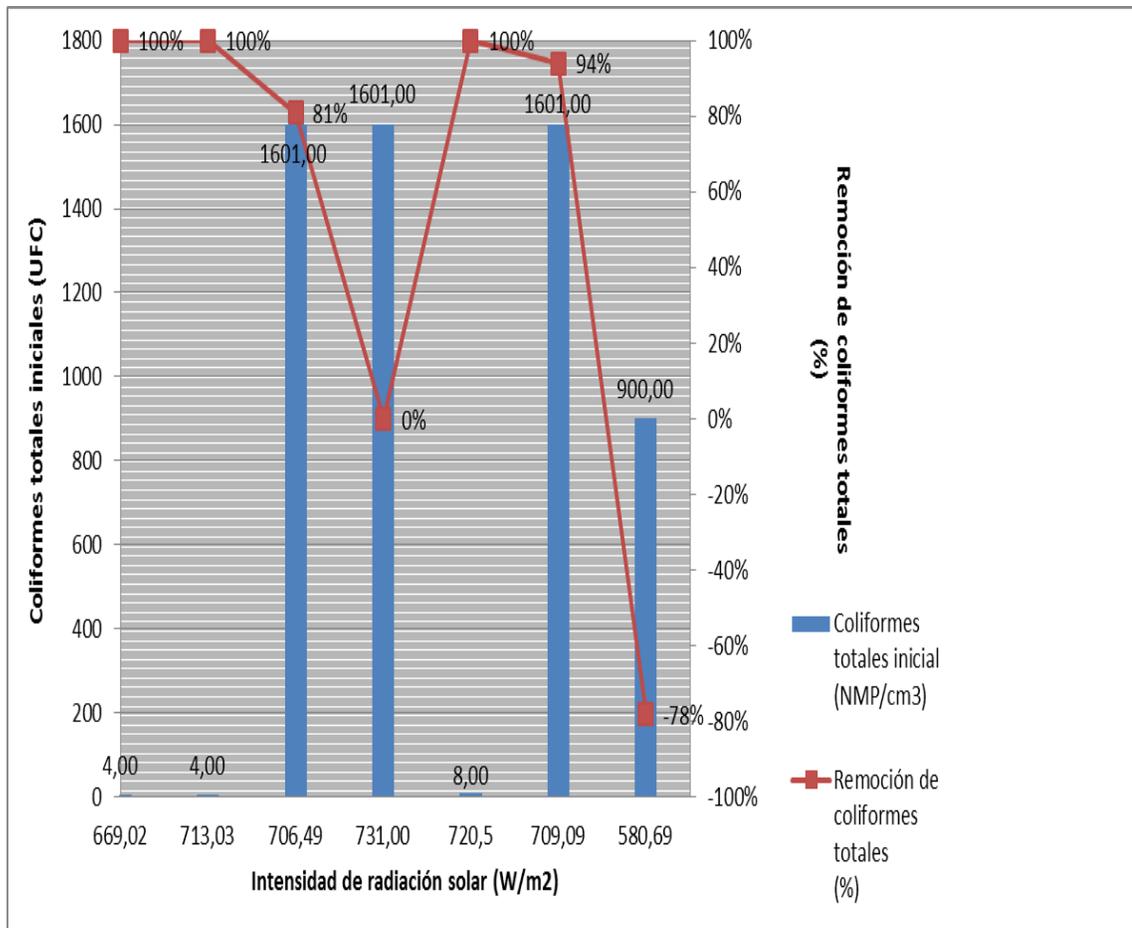
Fuente: elaboración propia, con base a resultados del análisis estadístico.

Figura 18. **Relación entre el porcentaje de remoción de coliformes totales con la temperatura e intensidad de radiación solar promedio**



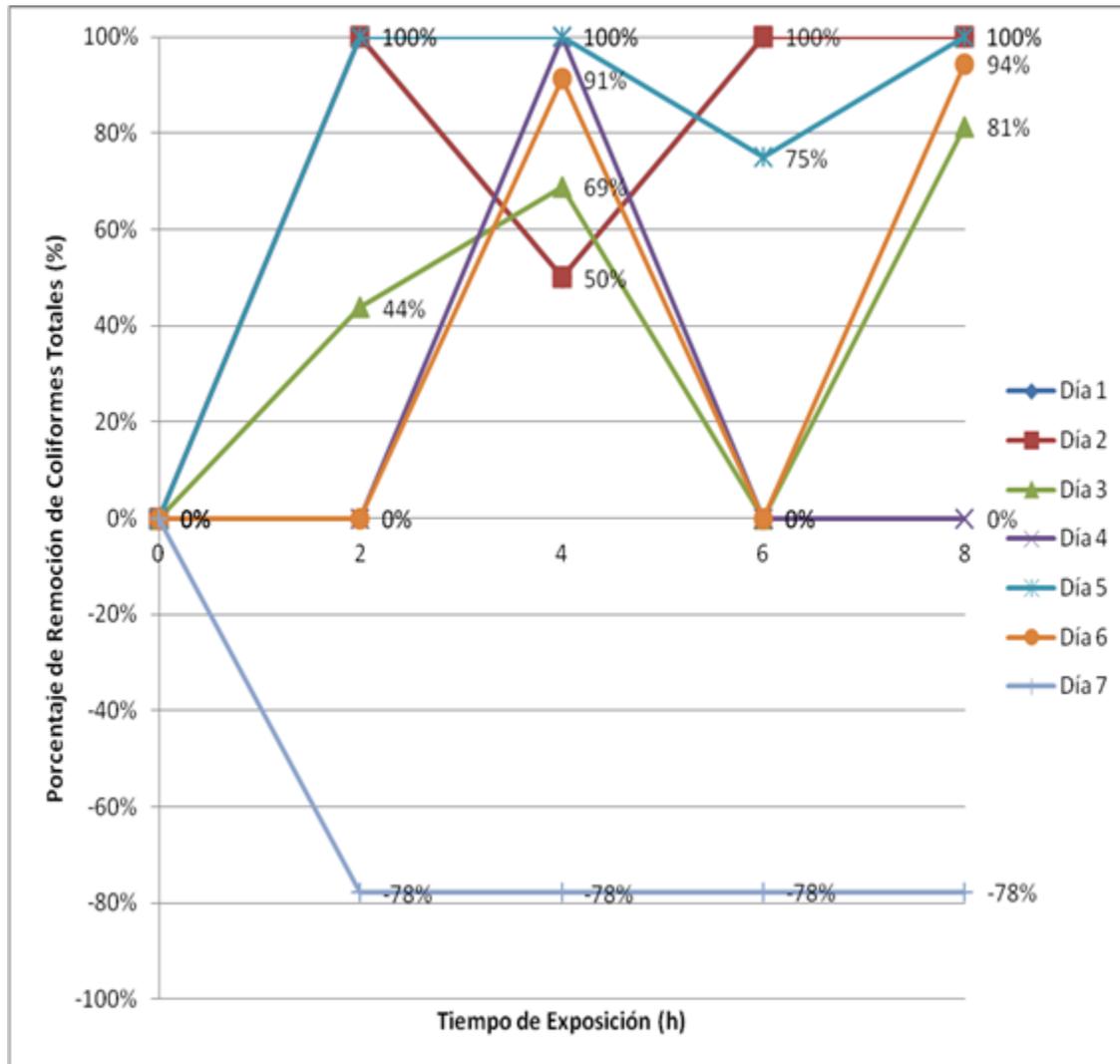
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Relación entre el porcentaje de remoción de coliformes totales con intensidad de radiación solar y coliformes totales iniciales**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Relación del porcentaje de remoción con el tiempo de exposición



Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En las figuras 12 a la 17 de la sección de resultados se observa desde el diseño hasta la implementación del sistema de desinfección de agua con recirculación continua. Inicialmente las válvulas para evacuar el agua de la figura 16 no se contemplaron en el diseño inicial, estas se incluyeron debido a que se observó el crecimiento de algas dentro del sistema a causa del agua que quedaba dentro del mismo. Las válvulas fueron instaladas para purgar toda el agua del sistema, al terminar el tratamiento. Se debe mencionar que otra de las medidas tomadas, fue la aplicación de cloro (0,25 ppm) antes de empezar la corrida durante 10 minutos y luego una corrida más de agua sin cloro durante 10 minutos, para evitar la presencia de cloro residual que pudiera afectar el experimento.

Como se puede observar en las tablas de la X a la XII de la sección de resultados, no se encontró presencia de coliformes fecales en 3 de los 7 días de muestreo, en los restantes se observa que en 2 días se presentó una reducción de coliformes fecales y en los otros 2 días se observó un aumento. Estos resultados limitaron el análisis estadístico para este grupo, por lo que únicamente se analizó la tendencia de las coliformes totales.

En la figura 18 se observa la gráfica que contiene la relación entre el porcentaje de remoción de coliformes totales con la temperatura e intensidad de radiación solar promedio. Para poder calcular el porcentaje de remoción se asumió que el resultado  $>1600$  NMP/100 cm<sup>3</sup> correspondía a 1601 NMP/100 cm<sup>3</sup> y que  $<2$  NMP/100 cm<sup>3</sup> correspondía a 0 NMP/100 cm<sup>3</sup>, esto únicamente con el fin de delimitar, ya que el laboratorio no realizó más diluciones debido a

que el agua analizada era de consumo humano, por lo que no se esperaba tener datos demasiado altos en coliformes totales, además se buscaba determinar si se cumplía o no con la Norma COGUANOR 29001.

La figura 18 muestra que los mayores porcentajes de remoción (100 %, 94 % y 81 %) de coliformes totales se obtuvieron a temperaturas promedio que oscilan entre 24,68 °C a 32,40 °C con intensidades de radiación solar mayores a 669,02 W/m<sup>2</sup>, con excepción de un dato puntual que presentó una radiación solar de 731,00 W/m<sup>2</sup> con una temperatura promedio muy baja (23,22 °C) que dio un resultado de 0 por ciento de remoción. Puede observarse también que en un caso se presentó un aumento de coliformes totales a pesar de tener una temperatura promedio de 30,14 °C, ya que la intensidad de radiación solar fue la más baja (580,00 W/m<sup>2</sup>) de todos los días de muestreo.

En la figura 19 se observa la relación entre el porcentaje de remoción de coliformes totales con la intensidad de radiación solar y la cantidad de coliformes totales iniciales. Según los resultados obtenidos el porcentaje de remoción alcanza el 100 por ciento con cantidades de 8 y 4 NMP/100 cm<sup>3</sup> de coliformes totales iniciales y con intensidades de radiación solar mayores a 669,02 W/m<sup>2</sup>. Para el caso de 1601 NMP/cm<sup>3</sup> coliformes totales iniciales, se logró un porcentaje de remoción de 94 y 81 por ciento con intensidades de radiación solar de 709,09 W/m<sup>2</sup> y 706,49 W/m<sup>2</sup>. Existió un caso puntual que no logró la remoción de coliformes totales a pesar de tener una intensidad de radiación solar de 731 W/m<sup>2</sup>, el cual fue el que presentó la temperatura promedio más baja.

En la figura 19, también se puede observar que se presentó un aumento de coliformes totales en la muestra, el cual fue el caso que tuvo la intensidad de radiación solar más baja (580 W/m<sup>2</sup>) de los días de muestreo, a pesar de tener

una temperatura de 30,14 °C, puntualizando que la misma no fue la temperatura más baja obtenida durante el experimento.

La figura 20 muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de coliformes totales con el tiempo de exposición para los diferentes días, el cual no presentó ninguna tendencia en común para los distintos casos, ya que presentó distintos puntos de inflexión en distintos tiempos de exposición.

Es necesario considerar que la cantidad de muestras (35 como total, 5 por día) fue pequeña, lo que no aportó un número suficiente de observaciones, además, según los resultados del análisis estadístico (tabla XIII de la sección de resultados) se puede afirmar que con estos datos no es posible demostrar diferencias significativas en el porcentaje de reducción de coliformes totales.



## CONCLUSIONES

1. Es necesario contar con intensidades de radiación solar de al menos  $669,02 \text{ W/m}^2$  en combinación con temperaturas promedio de, al menos  $24,68 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 8 horas de exposición, para que el sistema de recirculación continua diseñado, obtenga porcentajes de remoción de coliformes totales arriba del 81 por ciento.
2. Se requieren intensidades de radiación solar de al menos  $669,02 \text{ W/m}^2$  y con cantidades menores o iguales a  $8 \text{ NMP/100cm}^3$  de coliformes totales iniciales, para que el sistema de recirculación continua diseñado obtenga porcentajes de remoción de coliformes totales del 100 por ciento.
3. Para que el sistema de recirculación continua diseñado, obtenga porcentajes de remoción de coliformes totales de al menos 94 por ciento, se necesitan intensidades de radiación solar de, al menos  $709,09 \text{ W/m}^2$  y cantidades menores o iguales a  $1601 \text{ NMP/100cm}^3$  de coliformes totales iniciales.
4. Para obtener porcentajes de remoción a partir de 81 por ciento se requiere una temperatura promedio de  $30,22 \text{ }^\circ\text{C}$ , con una intensidad de radiación solar de  $703,63 \text{ W/m}^2$  durante 8 horas de exposición solar.
5. Dado la cantidad de muestras analizadas en el presente estudio, no puede demostrarse diferencias estadísticas significativas en el porcentaje de reducción de coliformes totales.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar análisis de cromatografía de gases al agua tratada con este método, para descartar la presencia de algún químico derivado de la exposición solar de la manguera de PVC.
2. Probar el sistema de recirculación continua diseñado en distintas épocas del año.
3. Probar el sistema de recirculación continua diseñado en áreas del país en donde se pueda aprovechar de mejor manera el recurso solar.
4. Según los resultados observados, para este sistema diseñado se recomienda analizar únicamente el agua antes de tratar y luego del tratamiento.
5. Probar el sistema de recirculación continua diseñado con muestras que presenten una cantidad de coliformes totales intermedia de acuerdo a los valores obtenidos en este estudio.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Guía SunWise para la exposición al sol.* [en línea]: [http://www.epa.gov/sunwise/doc/sunuvu\\_spanish.pdf](http://www.epa.gov/sunwise/doc/sunuvu_spanish.pdf). 20. p. [Consulta: 2 de noviembre de 2012].
2. CARRIÓN PÉREZ, Pedro. *Módulos fotovoltaicos* [en línea]. <http://oretano.iele-ab.uclm.es/~carrion/Bibliografia/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos.pdf>. 45. p. [Consulta: 23 de octubre de 2012].
3. CENGEL, Yunus A. *Transferencia de calor y masa.* Faddeeva, Sofía (rev.). 3a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007. ISBN-13: 978-0-07-312930-3. ISBN-10: 0-07-312930-5.
4. Centro Nacional de Epidemiología. *Sala situacional desnutrición aguda (moderada y severa) <5 años.* [en línea]: <http://epidemiologia.mspas.gob.gt/vigepi/2012/eventos%20prioritarios/DPE%20Sala%20Situacional%20acumulado%20SE%202012.pdf>. 17. p. [Consulta: 2 de septiembre de 2012].
5. CLRESCERI, Lenore S.; GREENBER, Arnold E.; TRUSELL, Rhodes. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.* Diorli S.A (trad.). 17a ed. Madrid: Ediciones Diaz de Santos, 1992. ISBN 9788479780319. 1186. p.

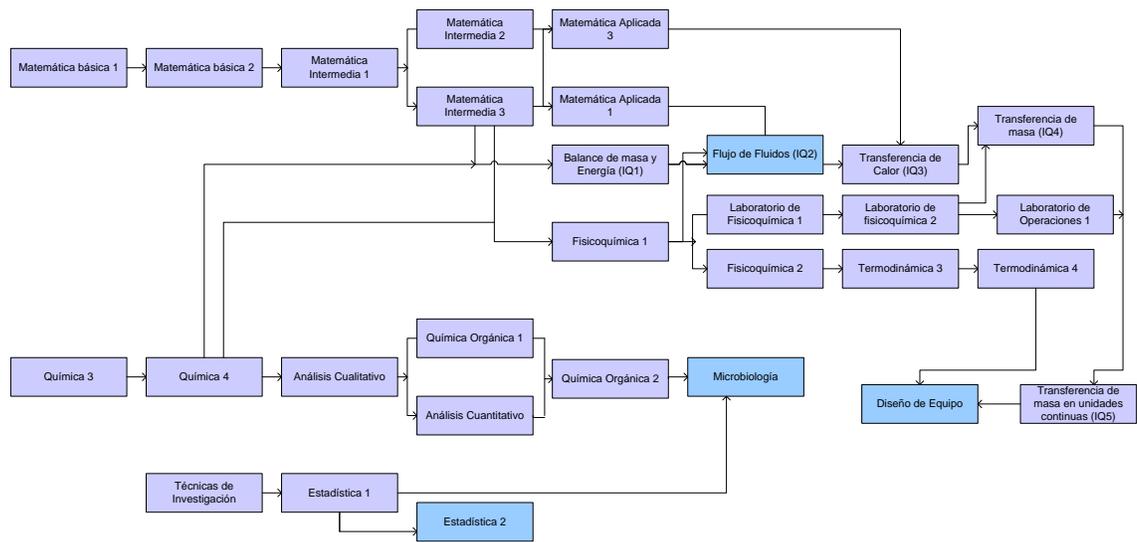
6. Departamento de Regulación de los Programas de Salud y Ambiente. *Norma guatemalteca obligatorio agua potable COGUANOR NGO 29001.99*. Publicada en el Diario Oficial, 2003, 15. p.
7. Fundación SODIS. [en línea]: <http://fundacionsodis.org/sitio/>. [Consulta: 2 de septiembre de 2012].
8. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. *Perfil ambiental de Guatemala 2006*. [en línea]: <http://www.infoiarna.org.gt/media/file/PERFAM2006/CAP2/2.10%22ENERGIA.pdf>. 249. p. [Consulta: 2 de noviembre de 2012].
9. LOARCA UMAÑA, José Rodrigo. *Evaluación de una estufa solar como método para desinfección de agua proveniente del río Guacalate de San Bartolomé Becerra Sacatepéquez*. Trabajo de graduación de Químico Biólogo. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Farmacia, 2005. 50. p.
10. LÓPEZ ORIZABAL, Mildred Carmina. *Efecto del color y la turbiedad en la eliminación de coliformes fecales al aplicar el método de desinfección solar en agua cruda proveniente de los vertederos de Acatán, Teocinte 18" y Canalitos de la planta potabilizadora Santa Luisa de la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2002. 67. p.

11. Mangueras Industriales S. A. [en línea]:  
[http://www.corporacionmisa.com/sitio/index.php?option=com\\_content&view=article&id=32:manguerasatoxicas01&catid=37:mangueras201&Itemid=27](http://www.corporacionmisa.com/sitio/index.php?option=com_content&view=article&id=32:manguerasatoxicas01&catid=37:mangueras201&Itemid=27). [Consulta: 2 de noviembre de 2012].
12. MCCABE, Warren L.; SMITH Julian C.; HARRIOT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. España: McGraw-Hill/Interamericana, 1991. ISBN: 0-07-044828-0. 1112. p.
13. MEIERHOFER, Regula; WEGELIN, Martin. *Desinfección solar del agua. Guía de aplicación*. Lima: EAWAG/SANDEC, 2003, ISBN Nr: 3-906484-24-6. 90. p.
14. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. Enríquez Brito, Javier (trad.); León Cárdenas, Javier (rev.). 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 644 p. ISBN: 970-26-0805-8. 644. p.
15. MURRAY, Patrick R.; ROSENTHAL, Ken S.; PFALLER, Michael A. *Microbiología médica*. 6a ed. España: Elsevier, 2009. ISBN: 978-84-8086-465-7. 947. p.
16. RODRÍGUEZ OJEDA, Luis. *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*. Instituto de Ciencias Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL, Guayaquil, Ecuador. 2007. 311. p.

17. SODIS. *Nota técnica no. 2.* [en línea]:  
[http://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex\\_files/SKAT/SKAT1%20-Solar%20disinfection%20of%20water/Notas\\_Tecnicas\\_SODIS.pdf](http://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex_files/SKAT/SKAT1%20-Solar%20disinfection%20of%20water/Notas_Tecnicas_SODIS.pdf).  
Water. Disinfection, Proceedings of a Workshop held at the Brace Research Institute, Montreal, Quebec., Canada. SODIS News No. 2, August 1997. 1. p. [Consulta: 2 de septiembre de 2012].
  
18. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Cruz, Ricardo (trad.); Torre, Juan Antonio (rev.). 6a ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 1999. ISBN: 970-17-964-6. 752. p.

# APÉNDICES

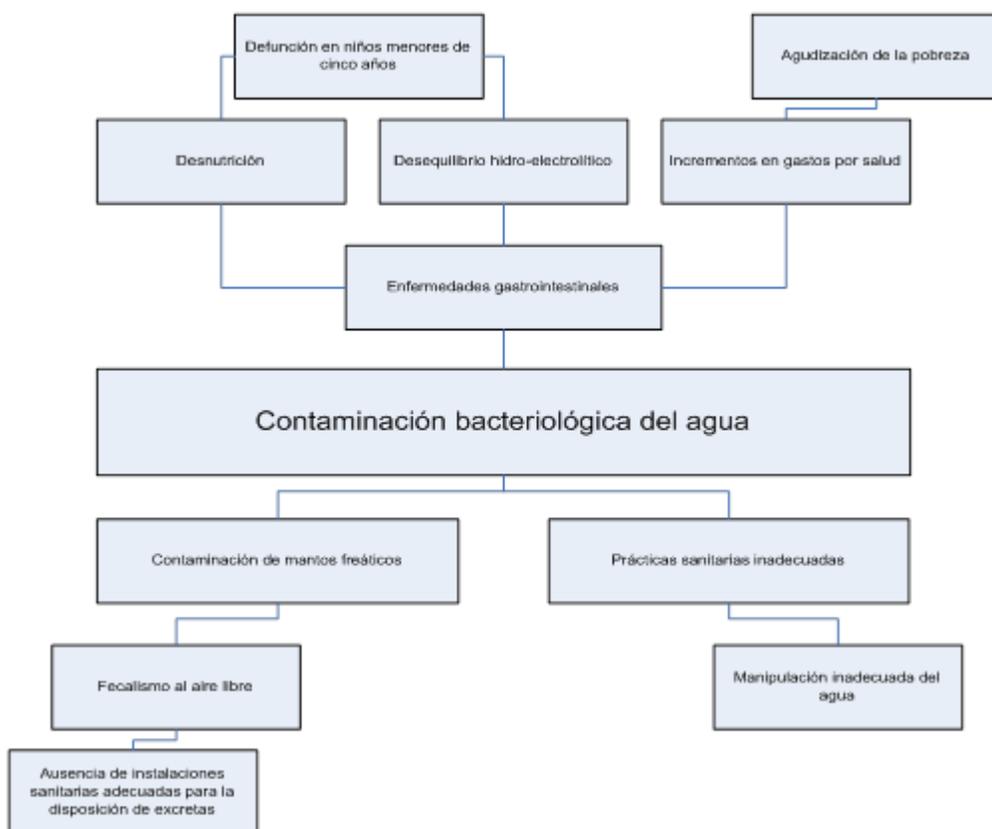
## Apéndice 1. Requisitos académicos



\*  *Cursos indispensables para este estudio.*

Fuente: elaboración propia

## Apéndice 2. Árbol de problema



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Características del sistema de recirculación diseñado**

Diámetro Interno Tubería (m)	Área de la Tubería (m <sup>2</sup> )	Rugosidad del plástico (m)
0,02240	0,00039	3,00E-7

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Características del flujo para el sistema diseñado**

Número de Reynolds (Adimensional)	Factor de Fricción (Adimensional)
1,54E4	0,027

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Pérdida por fricción para el sistema diseñado ( $h_L$ )**

Pérdida en la salida del tanque (m)	Pérdida en entrada del tanque (m)	Pérdida vueltas (m)	Pérdida tubería (m)	Pérdida válvula (m)	Pérdida Total (m)
0,0046	0,0249	0,0749	7,6587	0,0139	8,3383

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Prueba de Kolmogorov-Smirnov**

Datos estadísticos		Resultado
N		35
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	37,197
	Desviación típica	56.217
Diferencias más extremas	Absoluta	0,232
	Positiva	0,232
	Negativa	-0,168
Z de Kolmogorov-Smirnov		1,370
Sig. asintót. (bilateral)		0,047

Fuente: elaboración propia, con datos del programa SPSS.

Apéndice 7. **Estadísticos descriptivos de los datos correspondientes al porcentaje de reducción**

Hora	N	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
8:00 horas	7	0,000	0,000	,000	,000
10:00 horas	7	37,986	68,168	-77,880	100,000
12:00 horas	7	40,304	61,575	-77,880	100,000
14:00 horas	7	28,160	66,004	-77,880	100,000
16:00 horas	7	79,534	36,074	0,000	100,000

Fuente: elaboración propia, con datos del programa SPSS.

Apéndice 8. Rangos Kruskal-Wallis

Medición cada 2 horas	N	Rango promedio
8:00 horas	7	10,50
10:00 horas	7	19,14
12:00 horas	7	18,36
14:00 horas	7	16,79
16:00 horas	7	25,21

Fuente: elaboración propia, con datos del programa SPSS.

Apéndice 9. Estadísticos de contraste de los datos correspondientes al porcentaje de reducción

Dato estadístico	Resultado
Chi-cuadrado	8,069
Gl	4
Sig. asintót.	0,089

Fuente: elaboración propia, con datos del programa SPSS.

Apéndice 10. **Datos correspondientes al porcentaje de reducción**

Intensidad solar promedio (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura promedio (°C)	Turbiedad (UNT)	Remoción de coliformes totales (%)	Coliformes totales inicial (NMP/cm <sup>3</sup> )
669,02	31,38	7,16	100%	4,00
713,03	24,68	1,80	100%	4,00
706,49	31,20	0,35	81%	1601,00
731,00	23,22	1,00	0%	1601,00
720,50	32,40	0,53	100%	8,00
709,09	31,42	1,20	94%	1601,00
580,69	30,14	1,57	-78%	900,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Hoja de datos originales**

En esta sección se detallan los datos de temperaturas e intensidades de radiación solar, recopilados durante los siete días en que se dividió el experimento.

Datos día 1

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	25,13	369,73
B	10:00	2	30,85	836,67
C	12:00	4	33,70	876,24
D	14:00	6	34,00	846,05
E	16:00	8	33,20	416,38

Datos día 2

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	21,70	437,02
B	10:00	2	23,30	805,42
C	12:00	4	26,60	1027,26
D	14:00	6	27,70	852,69
E	16:00	8	24,10	447,79

Datos día 3

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	25,60	389,08
B	10:00	2	30,80	854,92
C	12:00	4	34,30	1010,96
D	14:00	6	35,40	873,33
E	16:00	8	29,90	404,17

Datos día 4

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	20,30	437,26
B	10:00	2	22,80	864,87
C	12:00	4	23,40	1046,63
D	14:00	6	25,80	881,29
E	16:00	8	23,80	425,00

Datos día 5

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	28,50	497,37
B	10:00	2	34,50	912,27
C	12:00	4	35,00	1068,06
D	14:00	6	35,00	817,61
E	16:00	8	29,00	307,18

Datos día 6

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	26,70	503,09
B	10:00	2	33,20	503,09
C	12:00	4	34,00	861,36
D	14:00	6	36,70	812,70
E	16:00	8	26,50	835,22

Datos día 7

Muestra	Hora	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Intensidad de radiación solar (W/m <sup>2</sup> )
A	08:00	0	25,10	271,12
B	10:00	2	29,90	550,00
C	12:00	4	32,50	1091,01
D	14:00	6	36,70	597,63
E	16:00	8	26,50	393,68

Fuente: elaboración propia.



# ANEXOS

## Anexo 1. Análisis de porcentaje de transmitancia en la manguera transparente de PVC atóxica

**SERQUIM**



LABORATORIO DE ANALISIS INDUSTRIAL  
SERVICIOS QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS INFORME DE ANALISIS

No. Informe 2012-10-261

Nombre o Marca:	Manguera pvc, -	F.Manufactura:	NO APLICA
Lote o Identificación:	Ktm120501	F.Vencimiento:	NO APLICA
Recipiente/empaque:	-	Cantidad:	1 x 20 cm
F.Recibida:	19/10/2012		
Fabricante ó Remitente:	Lorena Oliva		

ANALISIS	ESPECIFICACIONES	RESULTADO
<b>FISICO</b>		
Transmitancia de luz:	320 nm - 400 nm	T 290 a 320 = 0.0% T 320 nm = 20.0% T 340 nm = 38.0% T 360 nm = 50.0% T 380 nm = 60.0% T 400 nm = 64.0%

#### REFERENCIAS y METODOS

Espectrofotométrico

Fecha de Impresión: 24/10/2012 RT: L16pp.144 MV  
Analista(s): MValenzuela

#### OBSERVACIONES:

Los resultados se refieren a la muestra tal como fue entregada.

Firma y Sello:

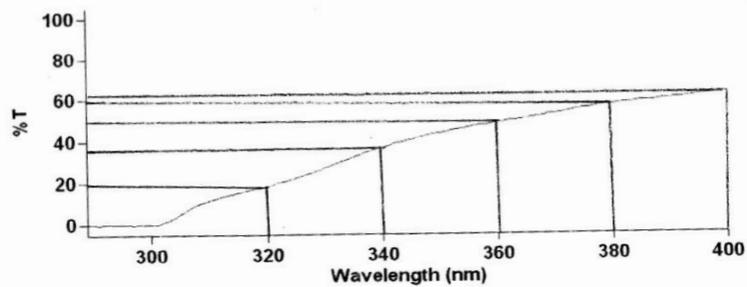
Aracely de León Amézquita  
QUIMICO FARMACEUTICO  
COLEGIADO No. 809

Page 1 of 1

Av. Cementerio Las Flores 11-66, Zona 7 de Mixco, Los Pinos • Tels.: 2434-5930, 2434-6030 • Fax: 2460-6241 • Guatemala, C. A.  
www.serquim.com • info@serquim.com

Fuente: informe 2012-10-261, Serquim.

Anexo 2. **Porcentaje de transmitancia en la manguera transparente de PVC atóxica**



**Sample Name: 2012-10-261**

Collection Time

10/22/2012 11:10:18 AM

Wavelength (nm)	%T
400.0	64.00
380.0	60.00
360.0	50.00
340.0	38.00
320.0	20.00
300.0	-0.040
291.0	-0.055

Fuente: informe 2012-10-261, Serquim.

Anexo 3. **Temperatura promedio febrero-marzo según INSIVUMEH**

<b>Año</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
2001	18.65
2002	18.60
2003	21.30
2004	19.35
2005	20.10
2006	20.05
2007	19.15
2008	18.60
2009	19.00
2010	19.45
2011	19.55

Fuente: <http://www.insivumeh.gob.gt/estacionesmet.html>. Consulta: 2 de septiembre de 2012.

Anexo 4. **Presión atmosférica promedio febrero-marzo según  
INSIVUMEH**

<b>Año</b>	<b>Presión atmosférica (mmHg)</b>
2001	639.00
2002	639.80
2003	638.50
2004	640.95
2005	639.45
2006	641.15
2007	641.05
2008	641.40
2009	641.55
2010	639.80
2011	642.95

Fuente: <http://www.insivumeh.gob.gt/estacionesmet.html>. Consulta: 2 de septiembre de 2012.

Anexo 5. **Propiedades del agua a 20 °C**

<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Viscosidad (Pa*s)(kg/ms *s)</b>	<b>Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>
998	1.02E-03	9.79

Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p.589.