



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**DETERMINACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE MATERIALES MÁS EFICIENTE PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA UV SODIS**

Ing. Elfego Homero Cifuentes Taracena

Asesorado por el M.Sc. Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE MATERIALES MÁS EFICIENTE PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA UV SODIS**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. ELFEGO HOMERO CIFUENTES TARACENA

ASESORADO POR EL M.SC. ING. ZENÓN MUCH SANTOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
**MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Julián Duarte Jiménez

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:

DETERMINACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE MATERIALES MÁS EFICIENTE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA UV SODIS

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 30 de junio de 2020.

Ing. Elfego Homero Cifuentes Taracena

Correo electrónico: cifuenteshomero@gmail.com

Carné No: 202090872

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos



Edificio de ERIUS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C..A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, octubre 19 de 2021

M. Sc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente me dirijo a usted, informándole por
medio de la presente que he revisado el documento final
titulado:

**"Determinación de la combinación de materiales más
eficiente para la implementación de la metodología UV
SODIS".**

Elaborado por el Ingeniero Elfego Homero Cifuentes
Taracena, como parte de las modificaciones solicitadas
por la terna examinadora del Estudio Especial II y como
requisito previo para optar al grado académico de Maestro
en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente
me permito informarle mi satisfacción con su contenido y
por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con
mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me
suscribo de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS".

M. Sc. Ing. Zenón Muñoz Santos
Asesor del estudio





ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 24 de enero 2022

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE MATERIALES MÁS EFICIENTE
PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA UV SODIS**

Presentado por el estudiante:

Ing. Elfego Homero Cifuentes Taracena

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 25 de enero de 2022

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos y M.Sc. Ing. Julian Antonio Duarte Jimenez, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo del estudiante Ing. Elfego Homero Cifuentes Taracena titulado: **DETERMINACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE MATERIALES MÁS EFICIENTE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA UV SODIS**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veinticinco días del mes de enero de 2022.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** En agradecimiento por las bendiciones dadas a mi persona y que el día de hoy me permiten concluir esta meta.
- Virgen María** Por su protección en el día a día en el proceso de aprendizaje que concluye en esta etapa con la obtención del título de MSc. en Ingeniería Sanitaria.
- Mi madre** Norma Taracena de Cifuentes, por su amor y soporte en cada una de las decisiones que he tomado, y el incentivar me a dar mi mejor esfuerzo en cada uno de mis proyectos personales.
- Mi padre** Eلفego Cifuentes, por su apoyo y los consejos dados en cada una de las etapas de mi vida, y el acompañamiento y cariño que me brinda en mi día a día.
- Mi hermana** Ninnette Cifuentes, para motivarla a cumplir sus metas y ser un ejemplo que la inspire a dar su mayor esfuerzo en cada uno de los proyectos que emprenda.

Mis abuelos	Por sus enseñanzas, cariño y el motivarme a lo largo del proceso para ser un excelente profesional.
Mi familia	Por el apoyo brindado en la realización del presente estudio especial.
Mi novia	Por su cariño incondicional, el apoyo brindado, y demostrarme que con esfuerzo y dedicación se pueden cumplir las metas que se proponga.
Mis amigos	Por acompañarme a lo largo de mi maestría, por los consejos y el apoyo brindado.
Mis catedráticos	Por su apertura a impartir sus conocimientos y acompañarme en este proceso de aprendizaje a nivel de postgrado.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios y la Virgen María** Por permitirme llegar a la culminación de mi maestría, brindándome la salud y sabiduría necesaria para terminar con el proceso.
- Mis padres** Norma Ninnette Taracena Díaz y Elfego Homero Cifuentes Velásquez, por su apoyo y consejos a lo largo de mi maestría que me permitieron llegar al presente logro.
- Mi hermana** Ninnette Giovanile Cifuentes Taracena, por su apoyo y compañía en el transcurso de mis estudios de maestría.
- Mis abuelos** Abel Taracena, Manuela Diaz, Martha Velásquez (q. e. p. d.) y Juan Cifuentes (q. e. p. d.), por enseñarme que con trabajo duro y esfuerzo se puede superar cualquier obstáculo en la vida.
- Mi familia** A mis tíos, tías, primos y primas quienes a lo largo de mi maestría me brindaron apoyo y consejos.
- Mi novia** Por el cariño, apoyo y soporte brindado durante la finalización de mi maestría.

Mis amigos	Quienes, con su acompañamiento y apoyo, hicieron que el tiempo de maestría estuviera lleno de alegría y momentos memorables.
Mi asesor	M.Sc. Ing. Zenón Much, por compartir sus conocimientos y la asesoría brindada a lo largo de la maestría y en la realización del presente estudio especial.
Mis catedráticos	Por su entrega y dedicación en su labor de enseñanza y los conocimientos impartidos a lo largo de la carrera, en especial al M.Sc. Joram Gil (q. e. p. d.) quien desde el proceso de licenciatura me motivó para seguir la maestría que ahora culmino.
ERIS	Por todos los conocimientos brindados en sus instalaciones y por la oportunidad brindada de obtener estudios a nivel de postgrado.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme realizar mis estudios de postgrado por medio de la Facultad de Ingeniería, su Escuela de Postgrados y en especial la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS).
Personal de la planta Piloto Aurora II	En especial a Tereso Pérez, por toda sus atenciones y apoyo en la realización del experimento base del presente estudio especial.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
ANTECEDENTES.....	XXV
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	XXXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. El agua.....	1
1.2. Agua apta para consumo humano.....	1
1.3. Tratamiento convencional.....	2
1.4. Tratamiento domiciliar.....	3
1.4.1. Método PUR.....	4
1.4.2. Hervir el agua.....	5
1.4.3. Cloración.....	5
1.4.4. UV SODIS.....	6
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1. Sitio de estudio.....	11
2.2. Diseño experimental.....	12
2.3. Variables.....	13
2.3.1. Definición conceptual.....	13

2.3.2.	Definición operacional.....	14
2.4.	Cantidad de muestras	16
2.5.	Criterios de inclusión y exclusión.....	17
2.6.	Procedimiento	17
2.7.	Resumen de los parámetros por analizar	19
2.8.	Parámetros analizados en el laboratorio	20
2.8.1.	Color	20
2.8.2.	Turbiedad.....	22
2.8.3.	Coliformes totales y fecales	25
2.9.	Parámetros analizados in situ	28
3.	RESULTADOS	31
3.1.	Coliformes totales.....	31
3.2.	Coliformes fecales	33
3.3.	Color.....	35
3.4.	Turbiedad	36
3.5.	Potencial de hidrógeno (pH).....	37
3.6.	Conductividad eléctrica	38
3.7.	Sólidos disueltos.....	39
3.8.	Temperatura	40
3.9.	Temperatura ambiente	41
3.10.	Radiación solar	43
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
4.1.	Color.....	47
4.2.	Turbiedad	48
4.3.	Potencial de hidrógeno (pH).....	49
4.4.	Conductividad eléctrica	50
4.5.	Sólidos disueltos.....	51
4.6.	Temperatura	52
4.7.	Coliformes totales.....	53

4.8. Coliformes fecales	62
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA.....	81
APÉNDICES	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Procedimiento de aplicación de UV SODIS.....	10
2.	Ubicación de la planta piloto Aurora II Ing. Arturo Pazos	11
3.	Procedimiento para determinación de color aparente	22
4.	Procedimiento para determinación de la turbiedad	25
5.	Procedimiento para determinación de coliformes totales y fecales	27
6.	Procedimiento para determinación de pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos	28
7.	Procedimiento para descarga de datos de temperatura y radiación solar.....	29
8.	Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo No. 1	41
9.	Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo No. 2	42
10.	Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo No. 3	42
11.	Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo No. 4	423
12.	Gráfica de radiación solar W/m ² del día del muestreo No. 1	43
13.	Gráfica de radiación solar W/m ² del día del muestreo No. 2	434
14.	Gráfica de radiación solar W/m ² del día del muestreo No. 3	44
15.	Gráfica de radiación solar W/m ² del día del muestreo No. 4	45
16.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs tiempo de exposición transcurrido por combinación	61
17.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs tiempo de exposición transcurrido por combinación	70

18.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 1.....	72
19.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 2.....	72
20.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 3.....	723
21.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 4.....	73
22.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 1.....	734
23.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 2.....	74
24.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 3.....	745
25.	Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 4.....	75

TABLAS

I.	Procesos de potabilización de agua	3
II.	Dosificaciones de cloro para desinfección de agua	5
III.	Coeficientes de conductividad térmica de los materiales.....	9
IV.	Concentraciones de coliformes totales	31
V.	Porcentajes de remoción de coliformes totales	32
VI.	Concentraciones de coliformes fecales	33
VII.	Porcentajes de remoción de coliformes fecales.....	34
VIII.	Resultados del color aparente	35
IX.	Resultados de turbiedad.....	36

X.	Resultados del pH.....	37
XI.	Resultados de la conductividad eléctrica	38
XII.	Resultados de los sólidos disueltos	39
XIII.	Resultados de la temperatura	40
XIV.	Análisis estadístico del color aparente	48
XV.	Análisis estadístico de la turbiedad	49
XVI.	Análisis estadístico del pH	50
XVII.	Análisis estadístico de la conductividad eléctrica.....	51
XVIII.	Análisis estadístico de los sólidos disueltos	51
XIX.	Análisis estadístico de la temperatura.....	52
XX.	Análisis estadístico de coliformes totales con 0 horas de exposición	54
XXI.	Análisis estadístico de coliformes totales con 6 horas de exposición	55
XXII.	Análisis estadístico de coliformes totales con 8 horas de exposición	56
XXIII.	Análisis de los porcentajes de remoción para la totalidad de las muestras	57
XXIV.	Análisis de los porcentajes de remoción a las 6 horas de exposición	58
XXV.	Análisis de los porcentajes de remoción a las 8 horas de exposición	59
XXVI.	Simbología de las combinaciones de materiales utilizadas	60
XXVII.	Promedio de los porcentajes de remoción de coliformes totales	60
XXVIII.	Análisis estadístico de coliformes fecales con 0 horas de exposición	63
XXIX.	Análisis estadístico de coliformes fecales con 6 horas de exposición	63
XXX.	Clasificación de los coliformes fecales en las fuentes de agua.....	64
XXXI.	Análisis estadístico de coliformes fecales con 8 horas de exposición	65
XXXII.	Análisis de los porcentajes de remoción para la totalidad de las muestras	66
XXXIII.	Análisis de los porcentajes de remoción a las 6 horas de exposición	67

XXXIV.	Análisis de los porcentajes de remoción a las 8 horas de exposición.....	68
XXXV.	Simbología de las combinaciones de materiales utilizadas	69
XXXVI.	Promedio de los porcentajes de remoción de coliformes fecales	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
cm³	Centímetro cúbico
°C	Grados Celsius
Hrs.	Horas
L	Litro
m	Metros
m²	Metros cuadrados
μS/cm	MicroSiemens por centímetro
mg	Miligramo
mg/L	Miligramos por litro
ml	Mililitro
NMP/100 cm³	Número más probable en 100 centímetros cúbicos de agua

%

Porcentaje

pH

Potencial de hidrógeno

W/m²

Watts por metro cuadrado

GLOSARIO

Agua cruda	Agua que no ha sido sometida a ningún tipo de tratamiento.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas
Coliformes	Tipo de bacterias que son bacilos gram-negativos, aerobios y facultativos anaerobios, no formadores de esporas, que fermentan la lactosa con producción de gas.
Color	Parámetro físico del agua, el cual resulta de la presencia de sales metálicas, materia orgánica y otros materiales disueltos y suspendidos
Concentración	Relación entre la cantidad de materia o sustancia en un determinado volumen.
Conductividad	Se define como la capacidad de una sustancia acuosa de transportar una corriente eléctrica.
Fecal	Concerniente a aquello proveniente de excretas, tanto de humanos como de animales.

Fuente de agua	Se denomina así, a aquel medio o lugar donde se extrae agua para consumo humano.
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez.
OMS	Organización Mundial de la Salud
Patógenos	Organismos los cuales son dañinos para la salud de los seres humanos.
PET	Tereftalato de polietileno
Potencial de hidrógeno	Se utiliza para expresar la concentración de los iones hidrogeno o la actividad de este.
Sólidos disueltos	Representan el material soluble y coloidal, tienen un tamaño menor a 1.2 μm .
Temperatura	Es la condición que determina la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos.
Tratamiento	Remoción por medios físicos, químicos y biológicos de la carga contaminante de una fuente de agua.
Turbiedad	Se define como una medida óptica del material suspendido en el agua.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo general el determinar la combinación de materiales que presente mayor eficiencia para la desinfección de agua de lluvia mediante la metodología UV - SODIS realizando un análisis de la eficiencia de desinfección del agua utilizando distintas combinaciones de materiales de techo y botellas aplicadas en el proceso, la captación y la realización del experimento se llevó a cabo en las instalaciones de la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

A las muestras de agua de lluvia obtenidas y expuestas al sol como parte de la metodología UV SODIS se les evaluó la calidad final, para ello se realizaron los análisis de laboratorio pertinentes para evaluar los parámetros planteados, los cuales fueron: coliformes totales y fecales, color, turbiedad, pH, conductividad y sólidos disueltos, dichos análisis fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria *Dra. Alba Tabarini Molina*.

El estudio está compuesto de 4 muestreos de 18 muestras cada uno, dando un total de 72 muestras analizadas para los parámetros mencionados en el párrafo anterior, los muestreos fueron realizados entre el mes de noviembre del año 2020 al mes de mayo del año 2021, fechas en las cuales las condiciones ambientales se adecuaban a las necesitadas para el experimento.

Con los resultados de laboratorio obtenidos se realizó la comparación de cada una de las combinaciones bajo estudio, para distintos intervalos de tiempo, para de este modo evaluar cuál de estas había realizado una desinfección

eficiente y segura del agua para consumo humano, y finalmente determinar cuál de las combinaciones obtuvo los mejores resultados a lo largo del experimento, siendo esta la combinación número 1 conformada por un techo de lámina y la utilización de botellas de PET como componentes de la metodología.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, se ha determinado que el agua de lluvia ya no es una fuente inocua de agua apta para consumo humano, esto debido a la contaminación atmosférica y de la superficie que ha ido en aumento en los últimos años, generando de este modo la necesidad de darle un tratamiento al agua de lluvia captada previo a su consumo, siendo el más utilizado la desinfección por medio diversos métodos o metodologías.

Los métodos de desinfección son variados y van desde métodos convencionales hasta métodos alternativos como la metodología UV SODIS, misma que se ha posicionado en los últimos años como un método de desinfección confiable y viable para personas con recursos limitados debido a sus bajos costos de implementación, mostrando como su implementación ha generado mejoras considerables en la salud y en la calidad de vida de los usuarios de esta.

A pesar de su gran viabilidad económica, una de las mayores limitantes de implementación de la metodología UV SODIS, es el tiempo de exposición al sol necesario para asegurar la eliminación de los patógenos (coliformes) presentes, ya que, en algunas áreas del país por temas de climas propios de la zona, dicho tiempo se ve interrumpido por la nubosidad de la zona lo que lo extiende a una gran cantidad de horas, o días, razón que vuelve poco viable la metodología de desinfección en cuestión.

El problema por investigar en el presente estudio radica en que una de las mayores limitantes de implementación de la metodología UV SODIS, es el tiempo

de exposición al sol necesario para asegurar la eliminación de los patógenos presentes, ya que, en ocasiones por factores climáticos dicho tiempo de exposición se extiende demasiado lo que lo vuelve poco viable de implementar, por lo que para dar solución a dicho problema es necesario determinar ¿Qué combinación de materiales realiza una eficiente desinfección del agua de lluvia para que sea apta para consumo humano en el menor tiempo posible, mediante la utilización de la metodología UV - SODIS?

JUSTIFICACIÓN

Según datos de la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) realizada en el año 2014, para el año 2000 se tenía que un 72.6 % de la población guatemalteca tenía acceso a fuentes de abastecimiento de agua mejoradas, entre los años 2000 y 2006, se tuvo un crecimiento en cuanto al acceso a fuentes de agua mejoradas, teniendo para ese año un 78.7 %, lamentablemente, posterior a este gran aumento y debido a un crecimiento poblacional desmedido y a fuertes desastres naturales que golpearon el territorio nacional, para el año 2011 dicha proporción había disminuido a un 75.3 %, y finalmente en los resultados del año 2014 se tuvo un aumento llegando a tener un 77.8 % de cobertura en cuanto a fuentes de abastecimiento mejoradas¹.

Lamentablemente dicho incremento no fue tan alto, en comparación con el crecimiento obtenido para el año 2006, para el año 2014 se realizó un análisis de en qué tipo de residencia se tenía una mayor cobertura, se determinó que del 77.8 % de población que contaba con acceso a una fuente mejorada de agua, un 89 % pertenecía al área urbana y un 64.4 % pertenecía al área rural.

Con base en los resultados anteriormente mencionados, se logró determinar que los departamentos con mayor acceso a mejores fuentes de abastecimiento son Guatemala, Sacatepéquez y Sololá, mientras que los departamentos con menor acceso son Alta Verapaz, Petén y Escuintla.

¹ Instituto Nacional de Estadística. *República de Guatemala: Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) 2014- 2015*. p.44.

Según datos del énfasis en datos de vivienda realizado dentro de la ENCOVI del año 2014, un 38.4 % de la población hierven el agua que utilizan para beber, mientras que un 27.4 % compran agua purificada, un 18.8 % de la población no realiza ningún tipo de tratamiento previo a consumir agua de fuentes naturales, un 11.3 % cloran su agua y un aproximado del 4 % filtran su agua o utilizan otro método de tratamiento previo al consumo de esta.

Dentro de ese 18.8 % que no realiza ningún tratamiento previo al consumo de agua, según datos de la ENCOVI, un 14.3 % pertenecen a zonas urbanas del país y un 24.3 % pertenecen al área rural siendo esta la más vulnerable debido a problemas de salud que pudiera presentar en su población.

Derivado de la problemática generada y descrita en los párrafos anteriores, se considera necesaria la búsqueda de una alternativa de tratamiento de aguas crudas para garantizar la calidad de estas previo a ser consumidas por las comunidades, para de esta forma mejorar las condiciones de vida en términos de salud nutricional, y que a su vez sea accesible para aquellas personas de escasos recursos.

La metodología UV SODIS de desinfección de agua, se ha posicionado en los últimos años como una alternativa viable para cumplir con lo descrito anteriormente, aunque entre sus limitantes se encuentra que en ocasiones se necesita una exposición solar prolongada lo que genera una resistencia en su implementación por un mayor tiempo de espera por parte de los usuarios, no obstante existen algunas pruebas que describen como utilizando ciertos materiales, dicho tiempo de espera puede ser reducido considerablemente.

Atendiendo a la necesidad de una mejor calidad de agua y a las alternativas descritas anteriormente ya existentes, se plantea el presente estudio especial, el cual tiene por objetivo principal el determinar que combinación de variables, presenta una solución de mayor eficacia en términos de tiempo y economía a la problemática presentada.

La determinación anteriormente mencionada, tendrá como beneficio, el aportar una combinación de materiales científicamente comprobada como la más eficiente para la desinfección de agua para consumo humano por medio de la metodología UV SODIS reduciendo el tiempo de exposición necesaria para llevar a cabo el mismo.

Lo descrito anteriormente permitirá, sugerir en comunidades con climas desfavorables para la metodología UV SODIS, implementar los mismos utilizando la combinación sugerida, mejorando de este modo la salud nutricional y general de los pobladores, esto debido a la disminución del tiempo de exposición necesario para la realización de la desinfección, brindando de este modo agua de alta calidad para consumo humano, y disminuyendo las enfermedades gastrointestinales que se podrían derivar del consumo por agua contaminada.

OBJETIVOS

General

Determinar la combinación de materiales que presente mayor eficiencia para la desinfección de agua de lluvia y haga esta última apta para consumo humano mediante la metodología UV - SODIS.

Específicos

1. Realizar la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la fuente de agua de lluvia utilizada para la realización del presente estudio.
2. Determinar la eficiencia de remoción de microorganismos presentes en el agua por medio de un análisis microbiológico de la metodología UV SODIS de distintas combinaciones de materiales.
3. Comparar la eficiencia de remoción de microorganismos presentes en el agua de cada una de las combinaciones seleccionadas para el estudio en distintos intervalos de tiempo.
4. Determinar posterior a la comparación realizada la combinación de materiales más eficiente para la desinfección de agua de lluvia para consumo humano mediante la metodología UV SODIS.

HIPÓTESIS

Será que con una selección correcta de materiales a utilizar en la implementación de la metodología UV SODIS de desinfección de agua, se puede minimizar el tiempo de exposición al sol y garantizar una desinfección eficiente de la misma logrando de este modo un agua libre de bacterias coliformes totales y fecales en un periodo menor a las 6 horas.

ANTECEDENTES

En Guatemala, en específico en las zonas rurales, existe un déficit de acceso a agua potable por parte de la población, esto debido a factores tales como la distancia a la que se encuentran las mismas, el factor socioeconómico del área y por último la escasez de agua en algunas zonas, dichos factores provocan que las personas tengan que utilizar fuentes de agua alternativas y en ocasiones ingerir agua contaminada para poder satisfacer la demanda alimenticia de agua existente.

A raíz de lo mencionado en el párrafo anterior, algunas comunidades han implementado el uso de métodos alternativos de desinfección, de acuerdo con los datos del énfasis en datos de vivienda realizado dentro de la ENCOVI del año 2014, un 38.4 % de la población hierven el agua que utilizan para beber, mientras que un 27.4 % compran agua purificada, un 18.8 % de la población no realiza ningún tipo de tratamiento previo a consumir agua de fuentes naturales, un 11.3 % cloran su agua y un aproximado del 4 % filtran su agua o utilizan otro método de tratamiento previo al consumo de esta.

Entre los métodos alternativos de desinfección se encuentra la metodología UV SODIS, misma que en los últimos años ha tomado auge en la región, mostrando resultados positivos en su implementación, en el estudio especial titulado *Línea base de calidad de agua del método SODIS en doce comunidades de Tacaná, Tajumulco y Sibinal* el cual tenía como objetivo general el evaluar el impacto del consumo de agua desinfectada mediante la tecnología SODIS y su

incidencia en enfermedades diarreicas en niños menores de 5 años en comunidades del departamento de San Marcos².

Para ello en sus alcances propuso el poder detectar la presencia de parásitos en una muestra de niños en las comunidades estudiadas agregado a el poder demostrar que existe un vínculo directo entre las prácticas de salud como el lavado de manos y un buen manejo de agua de consumo con la presencia de diarrea en los niños.

Una de sus principales conclusiones sobre la investigación es que es posible determinar el efecto de la calidad de agua potable con la presencia de diarrea en los niños, donde también se presentan algunos porcentajes acerca de dichos resultados en donde resalta que un 54 % de los niños presenta diarrea posterior a un tratamiento de agua potable a comparación del 91 % que presentó un cuadro de parásitos.

En el trabajo de graduación titulado *Aplicación del Método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales utilizadas para consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez, Guatemala* evaluó la eficiencia del método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales que presentaron contaminación fecal y que son utilizadas para el consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez del departamento de Guatemala, teniendo como objetivo general el poder aplicar el método SODIS en las fuentes antes mencionadas de las comunidades de San Juan Sacatepéquez en base a los resultados obtenidos en la evaluación³.

² ORTÍZ GUZMÁN, Oscar Fernando. *Línea base de calidad de agua del método SODIS en doce comunidades de Tacaná, Tajumulco y Sibinal*. p.101.

³ LÓPEZ GONZÁLEZ, Rafael Augusto. *Aplicación del Método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales utilizadas para consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez, Guatemala*. p.85.

Dentro de los resultados de su trabajo de investigación se puede concluir que la totalidad de las muestras de agua analizadas en los puntos presentaron una contaminación por patógenos, por lo que el método SODIS si puede ser aplicado como un método alternativo de desinfección.

Debido a que en su investigación se comprobó que SODIS redujo considerablemente la carga bacteriológica patógena de las muestras en cuestión y en base a los criterios de la OMS el método SODIS si mejora la calidad sanitaria del agua con contaminación fecal del área en estudio.

Los estudios anteriores, demostraron como la metodología UV SODIS es una alternativa fiable para la desinfección de agua, corroborando sus ventajas y confiabilidad en fuentes de agua naturales, como lo son los ríos, lagos, lagunas, riachuelos, nacimientos, la precipitación horizontal y la lluvia que pudiera existir en el área, la lluvia uno de las fuentes más accesibles para la población en los últimos años ha presentado un aumento en la contaminación que contiene, debido a la contaminación atmosférica y superficial que existe.

En el mismo año, Aguilar Muñoz, en su artículo científico titulado *Evaluación de la calidad de agua de lluvia captada a través de un módulo sanitario familiar de rápida instalación* evaluó la calidad de agua captada en la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS).

Dicha evaluación se realizó con base en la norma COGUANOR 29001 de Guatemala, en donde se compararon cada uno de los parámetros que la misma evalúa por medio de sus límites máximos permisibles.

Los resultados obtenidos por Aguilar muestran que el agua analizada cumple con la mayoría de lo establecido por la norma COGUANOR 29001⁴, excepto por los parámetros bacteriológicos y el color, ya que el resultado obtenido está por encima del límite permitido.

En contraste una de las mayores desventajas de la metodología UV SODIS, es el tiempo de exposición al sol, ya que el mismo depende de muchos factores como lo son la turbiedad y el color del agua, el estado de las botellas utilizadas y por último el material del que se componen las botellas utilizadas además de la superficie en la que se exponen al sol.

En el año 2016, los autores Nalwanga, Muyanja, McGuigan y Quilty, realizaron un análisis de lo mencionado anteriormente, en su artículo denominado *Un estudio de la calidad bacteriológica del agua de lluvia recolectada en los techos y una evaluación de SODIS como tecnología de tratamiento adecuada en las zonas rurales de África subsahariana* en la misma relacionaron la importancia económica del agua en la zona, así como los diversos métodos de recolección de la misma, culminando con el análisis bacteriológico de las muestras obtenidas.

Entre sus conclusiones se puede encontrar que el agua de lluvia recolectada en el techo utilizada para beber en comunidades rurales de la zona no cumple con las normas microbiológicas nacionales e internacionales para el agua potable.

⁴ AGUILAR MUÑOZ, Rolando David. *Captación de Agua de Lluvia (Almacenamiento y Calidad), por Medio de un Módulo Sanitario Familiar de Rápida Instalación.* p.9.

Además, concluyen que la metodología UV SODIS ha demostrado mejorar significativamente la calidad del agua en la mayoría de las muestras de agua de lluvia recolectadas estudiadas⁵.

Por otro lado, los autores Vivar, Fuentes, Castro y García-Pacheco en el año 2015, en su artículo *Efecto de los materiales habituales en tejados como base de apoyo para Desinfección solar (SODIS) en zonas rurales de climas templados*. Analizaron la posible influencia de los materiales utilizados en tejados en la zona templada de Alcalá de Henares, España, siendo estos la lámina de acero o zinc y el bambú, mismos que son típicos del área en análisis.

En su artículo los autores antes mencionados, concluyen que las botellas colocadas sobre las láminas metálicas de zinc alcanzaron un nivel de inactivación de 1 log superior a las colocadas en la cubierta de bambú, tanto para *E. coli* y coliformes totales⁶.

Como parte del análisis de las botellas utilizadas para la metodología UV SODIS, en el año 2014, los autores Katherine Lawrie et al. en su artículo titulado *Dosimetría UV para desinfección solar de agua (SODIS) realizada en diferentes botellas y bolsas de plástico* analizaron el efecto de los diversos materiales utilizados en las botellas para la metodología UV SODIS.

Para dicho análisis evaluaron 3 diversos materiales, la bolsa de polietileno (PE), la bolsa de polietileno (PE) y acetato de etilvinilo (EVA), además de las botellas de tereftalato de polietileno (PET), entre las conclusiones que se tienen del artículo se puede decir que las botellas PET a pesar de no haber obtenido los

⁵ NALWANGA et al. *Un estudio de la calidad bacteriológica del agua de lluvia recolectada en los techos y una evaluación de SODIS como tecnología de tratamiento adecuada en las zonas rurales de África subsahariana*. p.8.

⁶ VIVAR, Mario et al. *Efecto de los materiales habituales en tejados como base de apoyo para Desinfección solar (SODIS) en zonas rurales de climas templados*. p. 214.

mejores resultados realizaron una desinfección eficaz en comparación con los otros materiales, además en cuestión de su costo es una alternativa fiable para su implementación en dicha metodología⁷.

Por último, en el año 2020, los autores Ángela García-Gil, Cristina Pablos, Rafael A. García-Muñoz, Kevin G. McGuigan y Javier Marugán en su artículo denominado: *Selección de materiales y predicción de irradiancia solar en dispositivos plásticos para la aplicación de desinfección solar de agua (SODIS) para inactivar virus, bacterias y protozoos*. Realizaron la comparación de algunos plásticos utilizados en la fabricación de las botellas utilizadas para la metodología UV SODIS.

Entre los plásticos comparados destacan: los plásticos poco fotoestables como el (poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP) y polietileno (PE)). También se pueden encontrar los plásticos moderadamente fotoestables como el tereftalato de polietileno (PET) y policarbonato (PC). Y por último se analizaron los plásticos altamente fotoestables como el polimetilmetacrilato (PMMA)⁸.

En su artículo los autores evaluaron parámetros como resistencia, fotoestabilidad, durabilidad y los costos de producción de cada uno de los materiales analizados, con base en los resultados mostrados en el artículo se puede decir que en cuanto a resistencia fue el Poliestireno (PS) quien tiene la resistencia más baja, en cuanto a su durabilidad fue el polimetilmetacrilato

⁷ LAWRIE, Katherine *et al.* *Dosimetría UV para desinfección solar de agua (SODIS) realizada en diferentes botellas y bolsas de plástico*. p.8

⁸ GARCÍA-GIL, Ángela *et al.* *Selección de materiales y predicción de irradiancia solar en dispositivos plásticos para la aplicación de desinfección solar de agua (SODIS) para inactivar virus, bacterias y protozoos*. p. 9.

(PMMA) quien tuvo los mejores resultados, seguidos de el tereftalato de polietileno (PET) y policarbonato (PC), por último en cuanto a costos se puede decir que estos últimos tienen un costo moderado en comparación con los demás.

Entre las conclusiones de los autores se tiene que en su estudio se ha demostrado que el PP, el PC, el PMMA y el PET son materiales candidatos adecuados para los dispositivos solares de desinfección de agua: el PP tiene poca durabilidad, pero se puede reemplazar económicamente, el PET y el PC tienen una durabilidad y costos de producción moderados, y el PMMA es un plástico costoso, pero relativamente no afectado por la intemperie.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

El presente estudio consiste en la comparación de diversas combinaciones de materiales de techo y botella implementados en la metodología de desinfección UV SODIS, los materiales que serán utilizados en el presente estudio fueron seleccionados de acuerdo con su accesibilidad y costo en cuanto a las botellas, y en cuestión de los materiales de techo, se utilizaron materiales típicos de las viviendas en localidades del interior del país, en especial las áreas rurales.

Los materiales utilizados para el presente estudio se limitan a botellas de vidrio y PET, y en cuanto al techo se utilizaron láminas de acero o zinc y tejas de barro, obteniendo cuatro combinaciones posibles con los materiales antes mencionados.

Los materiales por utilizar mencionados en el párrafo anterior fueron seleccionados por ser los materiales que están al alcance de las personas de recursos limitados, quienes son los más propensos a utilizar la metodología UV SODIS de desinfección para obtener agua apta para consumirla.

El agua utilizada para el presente estudio será de origen de lluvia, utilizando para su captación la infraestructura existente en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II Ing. Arturo Pazos, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), posterior a algunos trabajos de mantenimiento de estas.

El área donde se implementaron las estructuras necesarias para la metodología UV SODIS pertenece a la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II Ing. Arturo Pazos, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), lugar donde se construyó una galera con el techo compartido por los materiales antes mencionados.

Limitaciones

El presente estudio tiene como una de sus mayores limitantes la estación climática de su realización ya que para poder realizarlo primero se debió recolectar el agua de lluvia necesaria para la obtención de todas las muestras a analizar, para posteriormente seleccionar un día soleado para la exposición de las muestras en cada una de las combinaciones bajo análisis en el presente estudio.

Los resultados obtenidos en el estudio que a continuación se presenta, son aplicables únicamente para la región central del país, esto derivado a que por su extensión territorial el país posee diversos climas y microclimas a lo largo de su territorio, lo que impide poder generalizar los resultados a nivel nacional.

El estudio no se realizó en otras regiones del país, debido a la dificultad de los permisos para la implementación de las estructuras necesarias tanto de captación de lluvia como de exposición de las botellas, agregado a la dificultad del transporte y control de las muestras para su análisis en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria *Dra. Alba Tabarini Molina*.

Otra limitante del presente estudio fue el factor económico, ya que derivado del elevado costo de los reactivos necesarios para cada uno de los parámetros a comparar, el listado de los parámetros a evaluar no es extenso, sino que se limitan a color, turbiedad, pH, conductividad, sólidos totales, coliformes totales y fecales, mismos que únicamente conforman una mínima parte de los parámetros evaluados por la normativa nacional vigente como lo es la norma COGUANOR 29001.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, en los últimos años, ha ido en aumento la dificultad de comunidades de recursos limitados y lejanas a los cascos urbanos de los departamentos que conforman el país, el acceso a servicios básicos, destacando principalmente las limitaciones de acceso a agua potable o por lo menos a fuentes de agua cuyo consumo no ponga en peligro la salud de los habitantes de dichas zonas.

Derivado de la situación actual, cada vez son más los habitantes de zonas rurales los que buscan fuentes de agua alternativas para abastecerse y cumplir sus necesidades diarias del vital líquido, sin embargo, los altos índices de contaminación hídrica que impera en el país, provoca que paralelo al aumento del uso de fuentes alternativas de abastecimiento de agua aumente la morbilidad y mortalidad de personas derivado de enfermedades transmitidas por el agua que consumen.

Para combatir dicha situación, instituciones internacionales y nacionales han implementado programas de masificación de tratamientos domiciliarios para las fuentes de agua alternativas que utilizan las personas, tratamientos como hervir el agua, una cloración casera, el método PUR y UV SODIS son las prácticas más promocionadas por dichas instituciones.

Uno de los métodos que mejor se ha posicionado por su bajo costo de implementación y sus buenos resultados es la metodología UV SODIS de desinfección, quien, basándose en la desinfección solar, utilizando el reúso de materiales accesibles para las personas permite al usuario ingerir agua segura

luego de un determinado tiempo de exposición solar, siendo este último tema de la exposición solar la única desventaja del método ya que dicho tiempo de exposición puede extenderse a grandes intervalos de tiempo según el clima de la zona donde se implemente.

El presente estudio especial tiene como principal objetivo el determinar la combinación de materiales que presente mayor eficiencia para la desinfección de agua de lluvia y haga está última apta para consumo humano mediante la metodología UV – SODIS.

Para cumplir dicho objetivo el presente estudio analizará 4 distintas combinaciones, para 4 muestreos realizados en distintas fechas, analizando una totalidad de 72 muestras de agua de lluvia, en donde se realizará la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la fuente de agua para tener un punto de partida de referencia.

La caracterización inicial permitirá que posterior al análisis de los parámetros finales del experimento, poder determinar la eficiencia de remoción de microorganismos presentes luego de los tiempos de exposición analizados y de este modo poder comparar la eficiencia de remoción de microorganismos presentes en el agua de cada una de las combinaciones seleccionadas para el experimento y de este modo poder determinar la combinación de materiales más eficiente para la desinfección de agua de lluvia para consumo humano mediante la metodología UV SODIS.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. El agua

El agua es uno de los recursos vitales para los seres vivos, los seres humanos utilizamos dicho recurso para cualquier actividad a realizar en el día a día, desde el agua que ingerimos, el agua con la que se cocinan los alimentos, hasta el agua que se utiliza en las industrias para poder llevar a cabo su producción diaria.

1.2. Agua apta para consumo humano

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus guías para la calidad del agua de consumo humano del año 2011, definen el agua apta para consumo humano como aquella que es segura y que no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume a lo largo de toda una vida, teniendo en cuenta las vulnerabilidades diferentes que se pueden presentar en distintas etapas de la vida.

Además, la OMS define el agua para consumo humano como aquella que se requiere para todos los usos domésticos habituales, incluida el agua para beber, para la preparación de alimentos y para la higiene personal, para dicho propósito el agua debe cumplir ciertos parámetros los cuales son dictados por las guías antes mencionadas⁹.

⁹ OMS. *Guías para la calidad del agua para consumo humano*. p.636.

Entre los parámetros que se mencionan anteriormente se encuentran los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos del agua, los cuales se buscan cumplir para decir que el agua es apta para consumo humano para tal propósito en caso no cumplan con los mismos directamente desde la fuente de agua utilizada, se debe realizar un tratamiento previo a su consumo, el cual puede ser un tratamiento convencional o en su defecto un tratamiento domiciliar dependiendo del grado de contaminación de la fuente y del acceso a la fuente de agua que se tenga.

1.3. Tratamiento convencional

El tratamiento convencional es aquel que se realiza por medio de una planta potabilizadora de agua, misma que utiliza distintos procesos de tratamiento para poder remover la carga contaminante presente en la fuente de agua por utilizar, los procesos para utilizar se dividen en tratamiento preliminar y el tratamiento principal, los cuales dependen del tipo de contaminación que presente el agua.

A continuación, se muestran los procesos antes mencionados, así como el propósito de cada uno de ellos y la clasificación de estos.

Tabla I. **Procesos de potabilización de agua**

PROCESO	PROPÓSITO
TRATAMIENTO PRELIMINAR	
Cribado	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.
Presedimentación	Remoción de grava, arena, limo y otros materiales sedimentables.
Aforo	Medida del agua cruda por tratar.
TRATAMIENTO PRINCIPAL	
Aireación	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
Coagulación/floculación	Conversión de sólidos no sedimentables en sólidos sedimentables.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables.
Ablandamiento	Remoción de dureza.
Filtración	Remoción de sólidos finos, flóculo en suspensión y la mayoría de los microorganismos.
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color.
Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión.
Fluoruración	Prevención de caries dental.
Desinfección	Exterminio de organismos patógenos.

Fuente: ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de Aguas Residuales*. p.227.

1.4. **Tratamiento domiciliar**

También conocido como en el punto de consumo (PDC), el tratamiento domiciliar consiste en que los miembros de una familia juntan agua, preferentemente agua que provenga de una fuente mejorada, y luego la tratan y la almacenan en sus hogares, el tratamiento domiciliar se utiliza principalmente en comunidades de escasos recursos o bien que por su ubicación geográfica y la distancia a la que se encuentran de centros urbanos se dificulta el acceso a un tratamiento convencional.

En muchas ocasiones el tratamiento domiciliar también es utilizado en ocasiones de emergencia, esto debido a las ventajas de su aplicación, mismas que se presentan a continuación:

- Mejoran radicalmente la calidad microbiológica del agua.
- Reducen significativamente los casos de diarrea.
- Son los medios más eficaces de intervención en cuanto a agua, saneamiento e higiene.
- Son altamente rentable.
- Se pueden poner en práctica con rapidez y puede ser adoptado por poblaciones vulnerables.

Entre los métodos de tratamiento domiciliar podemos entrar el método -PUR-, el hervir el agua, la cloración y finalmente la metodología UV SODIS de desinfección.

1.4.1. Método PUR

Es una tecnología desarrollada por Procter y Gamble y el CDC (Centro para el Control y Prevención de Enfermedades de EUA), el mismo consiste en una mezcla en polvo que remueve microorganismos patógenos y materia en suspensión, convirtiendo agua contaminada en agua segura para beber. Además de reducir los organismos patógenos y la materia en suspensión también ha demostrado eficacia en reducir significativamente la concentración de pesticidas como el DDT, así como otras moléculas orgánicas de alto peso molecular, y partículas no disueltas de metales pesados.

1.4.2. Hervir el agua

Método que consiste en aplicar calor al agua en un recipiente y subir su temperatura hasta el punto de ebullición, para de este modo, eliminar los organismos patógenos presentes, es uno de los métodos más utilizados para el tratamiento del agua de cualquier fuente, ya que, por su naturaleza, presenta una alta efectividad en cuanto a la eliminación de los patógenos dañinos para la salud del consumidor por con costo relativamente bajo.

1.4.3. Cloración

La cloración es uno de los métodos químicos de desinfección del agua, la cloración es el proceso de desinfección que hasta el presente reúne las mayores ventajas: debido a que es eficiente, fácil de aplicar y deja efecto residual que se puede medir por sistemas muy simples y al alcance de todos.

En el caso del tratamiento domiciliario, se utilizan los cloros comerciales, también conocidos como legía, mismos que son cloro, pero diluido en distintas proporciones, a continuación, se muestran algunas dosificaciones de cloro para algunos volúmenes de agua:

Tabla II. **Dosificaciones de cloro para desinfección de agua**

Volumen del Agua Tratada	Volumen Cloro 5% de Envase	Volumen, Solución Madre (1%)
1 Litro	1 gota	3 gotas
1 Galón	3 gotas	11 gotas
5 Galones	11 gotas	60 gotas (1 cucharaditas)
200 Litros	1.5 cucharaditas	6 cucharaditas (2 cucharas)
1,000 Litros	6 cucharaditas	10 cucharas
5,000 Litros	10 cucharaditas	750 mL (2 latas de gaseosa)

Fuente: BRAGHET, Anne. *La Importancia de Tratamiento Domiciliar de Agua Potable*.

p. 24.

1.4.4. UV SODIS

La metodología UV SODIS de desinfección, se define como una alternativa simple, de bajo costo y efectiva para la desinfección de agua de distintas fuentes, utilizando la energía solar para disminuir la presencia de patógenos dañinos para la salud del consumidor en el agua que se desee tratar.

Para tal propósito UV SODIS usa dos componentes de la luz solar para la desinfección del agua: El primero, la radiación UV-A, tiene efecto germicida y el segundo componente, la radiación infrarroja o temperatura, misma que eleva la temperatura del agua y genera el efecto de pasteurización cuando la temperatura llega a 70-75 °C. El uso combinado de la radiación UV-A y del calor produce un efecto de sinergia que incrementa la eficacia del proceso.

De acuerdo con la literatura, para que el método funcione eficazmente es necesaria una exposición de seis horas bajo una radiación solar de al menos 500 W/m². Esto se consigue en latitudes medias con seis horas de exposición. El efecto conjunto de la temperatura y la radiación se produce cuando el agua supera los 50 °C, momento a partir del cual el proceso de desinfección requiere un tercio de la radiación.

La aplicabilidad de la metodología UV SODIS, se ve relacionada directamente con la latitud del lugar donde se piensa implementar la tecnología ya que, para poder utilizarla todo el año se debe tener poca variación estacional, ya que de la misma depende las intensidades estacionales de la radiación, debido a que, si en caso la radiación no es suficiente para la desinfección del agua, la viabilidad de la metodología es nula teniendo que aplicar otra alternativa de tratamiento domiciliar.

En conclusión, el tiempo de exposición de la metodología depende de la nubosidad existente en el área y de la radiación promedio que se tenga a lo largo del periodo de exposición, siendo el mínimo de tiempo 6 horas en un día medio nublado para asegurar una buena desinfección y en caso sean días nublados los de la exposición, el tiempo de esta puede extenderse hasta dos o tres días.

Algunos de los factores que se deben tomar en cuenta para la implementación de SODIS son:

- **Clima**

El clima se debe tomar en cuenta ya que de él depende la eficacia de la metodología, además del tiempo de exposición necesario para obtener un agua segura, dependiendo el mismo de la nubosidad existente en el área.

- **Turbiedad del agua**

Si la turbiedad del agua es mayor a 30 UNT, es necesario pretratar el agua antes de exponerla a la luz solar, esto debido a que las partículas suspendidas dificultan la penetración de la radiación solar en el agua lo que evita que los microorganismos sean irradiados y eliminados del agua.

- **Oxígeno**

Algunos análisis realizados, han demostrado que la presencia de oxígeno en el agua ayuda a que SODIS sea más eficiente esto debido a que: la luz solar produce formas altamente reactivas de oxígeno.

- **Estado y forma del recipiente utilizado**

El recipiente (botella) utilizada debe de tener como diámetro máximo 10 cm, esto derivado de que a profundidades mayores a 10 cm los rayos UV ya no penetran el agua por lo que la inactivación de patógenos se ve afectada.

En cuanto al estado de los recipientes, es importante recalcar que el recipiente no debe tener golpes, rayones o calcomanías que pudieran dificultar el paso de los rayos UV hacia el agua en tratamiento.

- Color del recipiente

El recipiente utilizado debe de ser transparente, ya que en caso tenga algún tipo de coloración, la misma pudiera llegar a afectar el proceso de desinfección.

- Propiedades térmicas del recipiente y de la superficie de exposición

En específico de la conductividad térmica propia de cada uno de los materiales, la conductividad térmica, se define como una medida de la capacidad de un material para conducir o transmitir calor.

Atendiendo a la definición anterior, para el presente trabajo, se espera que, en el caso de los materiales por utilizar como el techo de la estructura a montar, lámina de acero y teja de barro o arcilla, el material con mayor coeficiente de conductividad térmica sea el que realice una desinfección más eficiente, ya que será capaz de transmitir el calor a la botella que contenga el agua y elevar la temperatura de esta hasta su punto de desinfección.

En cuanto al material de las botellas que se van a utilizar en el presente estudio, (PET y vidrio), se espera que el material con menor coeficiente de conductividad térmica será el que realice una desinfección eficiente en el menor tiempo, esto debido a que no es un buen transmisor de calor, contendrá el mismo lo que elevará y mantendrá la temperatura de mejor manera.

A continuación, se presentan los valores de los coeficientes de conductividad térmica de los materiales utilizados en el presente estudio:

Tabla III. **Coefficientes de conductividad térmica de los materiales**

Materiales	Conductividad Térmica K (W/m · K)
Lámina de acero	47 – 58
Teja de arcilla o barro	1 – 1.4
PET	0.24
Vidrio	1.05

Fuente: elaboración propia.

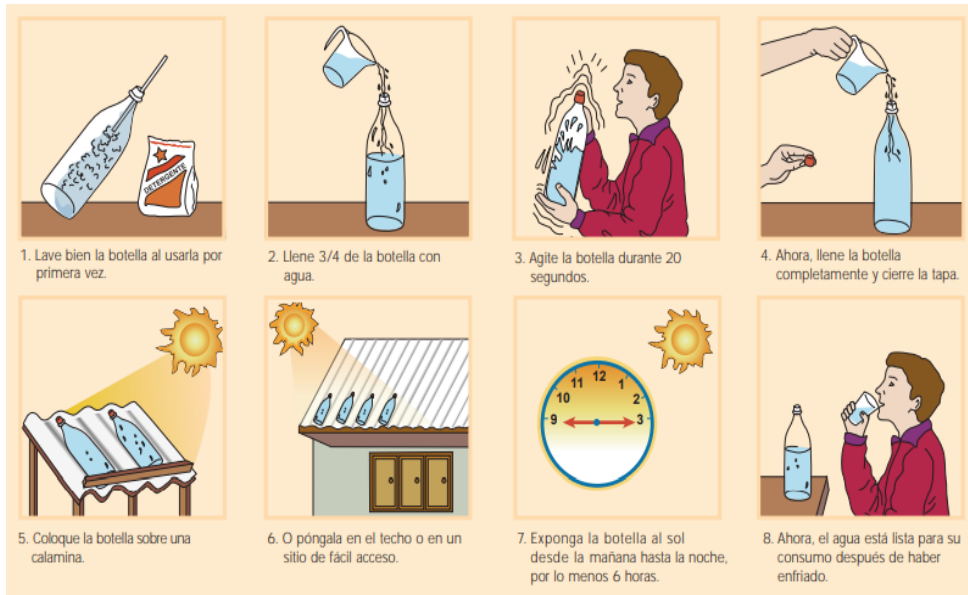
El proceso de aplicación de la metodología es el siguiente:

Para preparar todo lo necesario se debe tomar en cuenta:

- Verificar si las condiciones climáticas son adecuadas para SODIS.
- Obtener botellas de plástico PET de hasta 2 litros.
- Verificar que las botellas sean herméticas, incluido el estado de la tapa.
- Elija un soporte adecuado para exponer la botella.
- Verifique que el agua esté lo suficientemente clara para SODIS (turbiedad < 30 UNT).
- Por lo menos dos miembros de la familia deben estar capacitados en la aplicación de SODIS.
- Una persona determinada debe ser la responsable de exponer las botellas SODIS al sol.
- Reemplace las botellas viejas o rayadas.

El procedimiento de aplicación de la metodología UV SODIS es el siguiente:

Figura 1. **Procedimiento de aplicación de UV SODIS**



Fuente: Fundación SODIS. *Guía para la aplicación de la desinfección solar.* p.84.

2. METODOLOGÍA

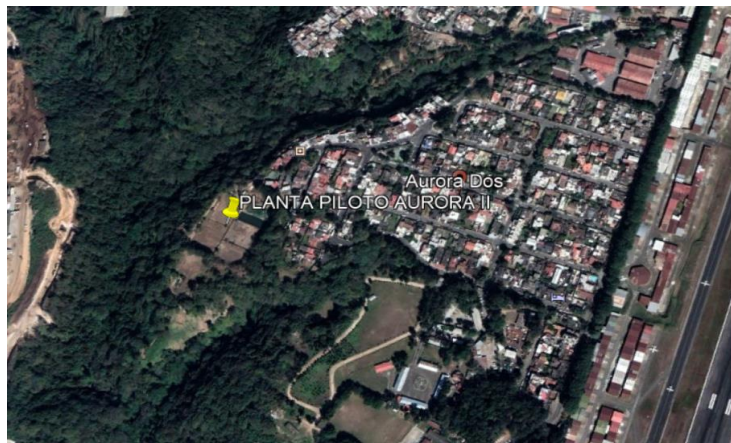
2.1. Sitio de estudio

El estudio se realizó en las instalaciones de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II Ing. Arturo Pazos, utilizando las estructuras ya existentes para la captación de agua de lluvia, y construyendo una nueva con las adecuaciones necesarias para la realización del experimento planteado.

La planta piloto de tratamiento de Aguas Residuales de la ERIS se encuentra ubicada dentro de la colonia Aurora 2, Diagonal 26, 20-56 zona 13 de la ciudad de Guatemala. Y tiene coordenadas geográficas:

- Longitud: 90°32'12.10"O
- Latitud: 14°34'41.31"N

Figura 2. **Ubicación de la planta piloto Aurora II Ing. Arturo Pazos**



Fuente: Google Earth. (2020). Consultado 10 de noviembre de 2020. Recuperado de <https://earth.google.com/web/@14.57821188,-90.53657636,1454.66758857a,291.06035257d,35y,-0h,0t,0r>

2.2. Diseño experimental

El diseño experimental se basa en un experimento factorial 2 x 2 x 4, el cual tiene entre sus principales variables los siguientes factores y variables:

- Factores y niveles:
 - Botellas de dos materiales (PET y vidrio)
 - Materiales de techo (lámina de aluminio y teja de barro o arcilla)
 - Tiempo de exposición (2, 4, 6 y 8 horas)

Algunas de las variables más importantes a considerar son:

Mediciones en el tiempo: se tomará una lectura inicial (tiempo 0) para poder realizar la comparación del efecto de los tratamientos en los distintos tiempos de lectura.

Variables: coliformes totales y coliformes fecales por medio del método Colilert de número más probable (NMP/100 cm³)

Operacionalización de las variables: el porcentaje de reducción del conteo de coliformes totales y coliformes fecales, comparando los resultados a las 2, 4, 6 y 8 horas de exposición con los tratamientos con tiempo 0.

Otras variables: color, turbiedad, pH, conductividad y sólidos totales.

2.3. Variables

Dentro de los análisis de laboratorio realizados para el presente estudio especial se tendrán variables de tipo dependiente e independiente, entre las variables más importantes a tomar en cuenta están:

- Variables dependientes:
 - Coliformes totales
 - Coliformes fecales
 - Radiación solar

- Variables independientes
 - Turbiedad
 - Porcentaje de eficiencia de la metodología

2.3.1. Definición conceptual

Las variables presentadas anteriormente tienen como definición conceptual lo siguiente:

- Coliformes totales
Tipo de bacterias que son bacilos gran- negativos, aerobios y facultativos anaerobios, los cuales son dañinos para la salud de los seres humanos.

- Coliformes fecales
Subgrupo de los coliformes totales, se encuentran en grandes cantidades en los intestinos y el excremento de los seres humanos y de los animales, su presencia indica contaminación provocada por lo antes mencionado y los mismos tienen un alto potencial de provocar enfermedades.

- Radiación solar

Se define como la energía radiante emitida en el espacio por el Sol, la radiación solar se genera a partir de las reacciones nucleares de fusión que se producen en el núcleo solar.

- Turbiedad

La turbiedad constituye una medida óptica del material suspendido en el agua, por lo general dicho parámetro se encuentra generalmente en las aguas residuales, o en caso se encuentre en cuerpos de agua naturales puede ser un parámetro que indique que a ese cuerpo de agua está siendo contaminado por el vertido de aguas residuales en algún punto de su cuenca.

- Porcentaje de eficiencia de la metodología

Es un parámetro importante para el estudio, debido a que es un indicador de la eficiencia de la metodología en cuestión, la presente variable consiste, en qué porcentaje serán removidos los coliformes totales y fecales presentes en las muestras analizadas.

2.3.2. Definición operacional

- Coliformes totales

Dentro de lo contemplado para el presente estudio, se tiene que dicha variable sea una de las que indiquen el porcentaje de eficiencia que tiene la metodología, para lograr lo anterior se espera disminuir la concentración de coliformes fecales para reducir las enfermedades que puedan provocar, las unidades de medición del presente parámetro por utilizar será el número más probable en 100 centímetros cúbicos de agua (NMP/100 cm³).

- Coliformes fecales

En el transcurso del presente estudio, se tiene contemplado provocar una disminución considerable de los coliformes fecales, mediante la cual, se pueda dar cumplimiento a algunas normativas de agua apta para consumo humano como las normas nacionales y las guías de la OMS, al igual que con los coliformes totales el presente parámetro es fundamental para el estudio, ya que será base de análisis de los resultados obtenidos para cada una de las combinaciones utilizadas, las unidades de medición del presente parámetro a utilizar será el número más probable en 100 centímetros cúbicos de agua (NMP/100 cm³).

- Radiación solar

La radiación solar es una variable dependiente del estudio debido a que se espera evaluar su intensidad a lo largo de experimento, agregado a el comportamiento de la desinfección conforme la misma llega a su punto máximo, de la presente variable depende la eficiencia del experimento, ya que conforme mayor sea su intensidad, se espera mayor sea la inactivación de los coliformes totales y fecales, observando además el comportamiento de los materiales de techo y botellas en cuanto a la conservación y transmitancia del calor generado por la radiación solar.

- Turbiedad

La turbiedad es una variable independiente del estudio, dado que a pesar de que de la misma depende si el agua es rechazable o aceptable para la utilización de la metodología UV SODIS de desinfección, dicha variable no se busca modificar, ya que se espera que la misma no varíe a lo largo del experimento, las unidades de medición de la turbiedad son las unidades nefelométricas de turbidez NTU por sus siglas en inglés.

- Porcentaje de eficiencia de la metodología

El porcentaje de eficiencia del tratamiento es una variable independiente, de la cual depende el observar el comportamiento de cada una de las combinaciones de materiales analizadas, un alto porcentaje de eficiencia indica que la combinación utilizada presenta una desinfección segura y rápida, mientras que una eficiencia baja significaría que dicha combinación no realizó una desinfección segura lo que haría que la metodología UV SODIS no fuera viable utilizando dicha combinación de materiales.

2.4. Cantidad de muestras

De acuerdo con el diseño experimental, el número de tratamientos a realizar es de 16, utilizando un nivel de significancia de 0.05, un riesgo de 0.20, y partiendo de la salvedad que no existen datos sobre variabilidad, la diferencia mínima esperada entre combinaciones se evaluará considerando una relación entre la desviación estándar que se obtenga de 2 a 1.

Con los elementos mencionados se determinó que para el estudio especial deben procesarse como mínimo 9 muestras de agua por cada combinación (total de muestras: 36 muestras de agua de lluvia). Realizando el desarrollo de los experimentos (combinaciones de botella y techo) al azar.

En seguimiento con lo anterior, para el presente estudio se analizarán un total de 72 muestras, mismas serán obtenidas de la captación de tres caídas distintas de agua de lluvia situadas en distintas partes del techo de la vivienda situada dentro de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II Ing. Arturo Pazos de ERIS.

2.5. Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión y exclusión a utilizar dentro de la realización del presente estudio destacan los siguientes:

- El agua para utilizar debe ser exclusivamente de lluvia, y no se vea contaminada por otros tipos de agua.
- Los recipientes deben estar en buen estado, es decir sin rayones y golpes que generen deformaciones en las mismas.
- Estos no deben presentar ningún tipo de coloración o diámetro mayor a los 10 cm.
- El agua debe tener una turbidez menor a los 30 NTU para poder ser utilizada en el experimento.
- Las muestras que serán analizables son aquellas que hayan sido expuestas al sol por el tiempo predeterminado para su retiro, sin pasarse más allá de los 5 minutos de la hora propuesta inicialmente.

2.6. Procedimiento

El experimento consiste en la captación de agua de lluvia proveniente del techo de una vivienda tradicional, posterior a su captación se aplicará una desinfección solar, por medio de la Metodología UV – SODIS, que consiste en la exposición al sol, en botellas, del agua captada, por un determinado periodo de tiempo. Para esto último, se utilizaron botellas de dos materiales distintos (PET y vidrio) y fueron expuestas en dos distintos materiales de techo, siendo estos, lámina de acero y teja de barro o arcilla, en donde se colocaron las botellas para su exposición al sol y su respectiva desinfección.

Como primer paso, se tomó una muestra de 1 litro para realizar la caracterización inicial del agua captada, midiendo parámetros tales como: color, turbiedad, pH, conductividad, sólidos disueltos, coliformes totales y fecales.

Luego, se llenaron 8 botellas de 1 litro de material PET, y 8 botellas de vidrio, para exponer al sol en cada uno de los materiales de techo que se analizaron (lámina de acero y teja de arcilla), las mismas se colocaron todas al mismo tiempo, para posteriormente retirar una botella de cada combinación de materiales a las 2, 4, 6 y 8 horas respectivamente.

Para cada una de las botellas se midieron los mismos parámetros que para la muestra inicial (color, turbiedad, pH, conductividad, sólidos totales, coliformes totales y fecales) con lo cual se realizó una curva de comparación del comportamiento de cada uno de los parámetros conforme mayor fue el tiempo de exposición.

Las metodologías utilizadas, para medir los parámetros de coliformes totales y fecales fueron el método de Colilert, la turbiedad fue medida por medio del turbidímetro HACH 2100AN y la metodología que ello implica, para el color, se utilizó el equipo espectrofotómetro spectroquant NOVA60A, para el resto de las variables analizadas se utilizó el potenciómetro mismo que entre sus funciones mide todas las variables en cuestión.

Por último, con base en los resultados obtenidos, se determinará que combinación realizó una mejor desinfección en cada uno de los tiempos que se retiraron de su exposición al sol.

2.7. Resumen de los parámetros por analizar

- Parámetros por analizar en el laboratorio
 - Color
 - Turbiedad
 - Coliformes totales
 - Coliformes fecales

- Parámetros medidos in situ o tomados de la estación meteorológica de la zona
 - Temperatura ambiente
 - Radiación solar
 - Tiempo (horas)
 - pH
 - Conductividad
 - Sólidos disueltos

- Materiales por evaluar
 - Botellas:
 - PET
 - vidrio
 - Techo:
 - Láminas de acero
 - Teja de barro o arcilla

- Combinaciones por evaluar:
 - PET y lámina de acero
 - PET y teja de barro o arcilla
 - Vidrio y lámina de acero
 - Vidrio y teja de barro o arcilla

2.8. Parámetros analizados en el laboratorio

Para la realización de los análisis de laboratorio realizados a las muestras de agua obtenidas, se utilizaron los procedimientos del libro *Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (Standard Methods for the examination of water and Wastewater)* en su 23^a Edición, los procedimientos utilizados se muestran a continuación indicando el parámetro obtenido mediante su utilización.

2.8.1. Color

En esta ocasión, para el presente estudio especial se determinó únicamente el color aparente, esto debido a factores económicos y de la disponibilidad de los instrumentos en el laboratorio, para ello se utilizó el procedimiento 2120 C. método espectrofotométrico - método de longitud de onda única.

El principio que rige el procedimiento 2120 C indica que el color se determina espectrofotométricamente en una onda longitud entre 450 y 465 nm, con soluciones de platino-cobalto como patrones. Dicho método basado en el ion platino-cobalto es aplicable a aguas naturales, potables y residuales, tanto domésticas como industriales.

El procedimiento por seguir es el siguiente:

- Toma de muestra

Recoger las muestras en botellas de vidrio o botellas de plástico tapadas para que no entre la luz. Enjuagar botellas una vez con la muestra antes de llenar la botella con la muestra. Preferiblemente tomar una muestra de al menos 100 mL. Analizar muestra dentro 24 h de recogida. Mantenga las muestras frías hasta

el análisis y caliente hasta que alcancen la temperatura ambiente antes de la medición.

- Preparación de la muestra

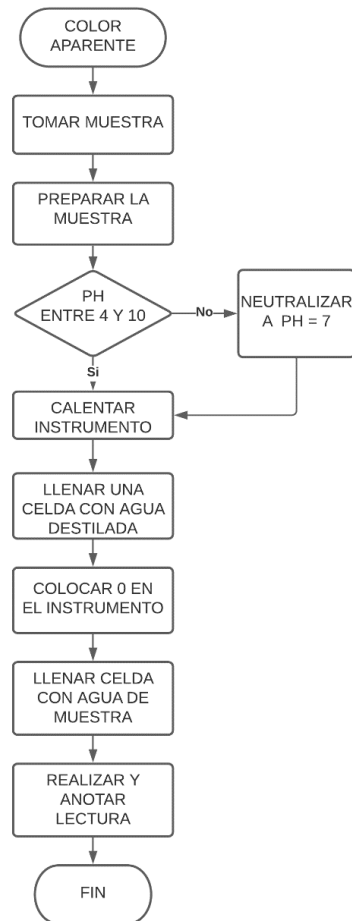
Comprobar el pH de la muestra. Si está fuera del rango de 4 a 10, preferiblemente ajuste la muestra a pH 7 y anote el ajuste.

- Medición

Calentar el espectrofotómetro de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Establezca la longitud de onda en la misma configuración que se utilizó para desarrollar la curva estándar; asegúrese de que la longitud de la ruta de la celda sea la misma que la utilizada para la curva estándar. Llene una celda del espectrofotómetro con agua destilada y ponga a cero el instrumento. Enjuague la otra celda con muestra y luego vuelva a llenar. Coloque la celda en el espectrofotómetro y lea la absorbancia.

Con base en el procedimiento anteriormente descrito podemos obtener el siguiente diagrama de flujo para el mismo:

Figura 3. **Procedimiento para determinación de color aparente**



Fuente: elaboración propia.

2.8.2. Turbiedad

El segundo análisis realizado en el laboratorio fue la turbiedad, para el presente parámetro se utilizó el procedimiento 2130 B. Método nefelométrico, dicho método se basa en una comparación de intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia en las mismas condiciones. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersa, mayor será la turbidez.

La turbidez se puede determinar para cualquier muestra de agua que esté libre de escombros y sedimentos gruesos de sedimentación rápida. La cristalería sucia y la presencia de burbujas de aire dan resultados falsos¹⁰.

Se debe utilizar un instrumento diseñado para minimizar la luz parásita que llega al detector en ausencia de turbidez y para estar libre de desviaciones significativas después de un breve período de calentamiento. La sensibilidad del instrumento debe permitir detectar diferencias de turbidez de 0.02 NTU o menos en el rango más bajo en aguas que tienen una turbidez de menos de 1 NTU.

El procedimiento para seguir es el siguiente:

- Técnicas generales de medición:

El uso de técnicas de medición adecuadas es importante para minimizar los efectos de las variables del instrumento, tales como la luz dispersa y las burbujas de aire. El realizar adecuadamente dichas técnicas influirá en que la medición sea más precisa.

Algunas de las técnicas por utilizar son:

- Medir la turbidez inmediatamente para evitar cambios de temperatura y la floculación y sedimentación de partículas debido a cambios en las características de la muestra.
- Eliminar el aire u otros gases atrapados en la muestra antes de la medición.
- No elimine las burbujas de aire dejando que la muestra repose por un período de tiempo porque durante el reposo, las partículas que causan turbidez pueden asentarse y la temperatura de la muestra puede cambiar.

¹⁰ Centro de tecnología asequible de agua y saneamiento. *Introducción al tratamiento del agua a nivel domiciliario y su almacenamiento seguro*. p.24.

- Calibración del nefelómetro

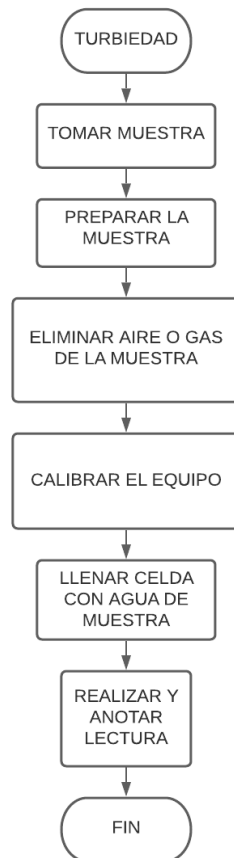
Siga las instrucciones del fabricante. Ejecute al menos un estándar en cada rango de instrumentos que se utilizará. Asegúrese de que el nefelómetro dé lecturas estables en todos los rangos de sensibilidad utilizados.

- Medida de turbidez

Esperar hasta que desaparezcan las burbujas de aire y vierta la muestra en la celda. Lea la turbidez directamente desde la pantalla del instrumento.

Con base en el procedimiento podemos obtener el siguiente diagrama de flujo:

Figura 4. **Procedimiento para determinación de la turbiedad**



Fuente: elaboración propia.

2.8.3. Coliformes totales y fecales

Para la determinación de la concentración de coliformes totales y fecales del experimento realizado en el presente estudio especial se utilizó el método colilert, dicha decisión se tomó derivado del tiempo de incubación tan corto que necesita el método.

Las pruebas de sustrato enzimático o método colilert utilizan sustratos cromogénicos y fluorogénicos hidrolizables para detectar simultáneamente las enzimas producidas por los coliformes totales y *Escherichia coli* (*E. coli*).

Estas pruebas de coliformes de sustrato enzimático se recomiendan para el análisis de muestras de agua potable, agua de origen, agua subterránea y aguas residuales.

En este método, las bacterias coliformes totales producen la enzima β -D-galactosidasa, que escinde el sustrato cromogénico en el medio para liberar cromógeno. La mayoría de las cepas de *E. coli* producen la enzima β -glucuronidasa, que escinde un sustrato fluorogénico en el medio para liberar fluorógeno.

En resumen, la liberación de cromógeno indica que hay bacterias coliformes presentes y la liberación de fluorógeno indica que cepas de *E. coli* están presentes.

El procedimiento para seguir es el siguiente:

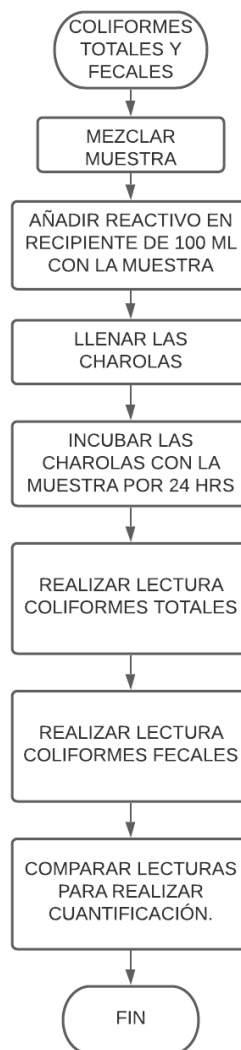
- Mezclar la muestra correctamente para promover una distribución uniforme de las bacterias.
- Añadir asépticamente el reactivo en una muestra de 100 ml en un vidrio de borosilicato no fluorescente, transparente y estéril o una botella o recipiente equivalente. Tape asépticamente y agite.
- Llenar las charolas asépticamente con el contenido de la muestra anteriormente preparada con el reactivo.
- Realizar una incubación de entre 18 y 24 horas según el reactivo adquirido. (El medio Colilert-18 debe incubarse durante 18 h, y el medio Colisure debe incubarse durante 24 h).
- Realizar la lectura de los resultados obtenidos, para los coliformes totales se puede con la luz natural.
- Para los coliformes fecales se debe utilizar una luz ultravioleta para realizar la lectura correcta.

- Comparar el conteo realizado para ambos tipos de coliformes con la tabla de cuantificación brindada por el distribuidor del reactivo Colilert.

Con base en lo anterior, podemos obtener el siguiente diagrama de flujo:

Figura 5. **Procedimiento para determinación de coliformes totales y**

fecales



Fuente: elaboración propia.

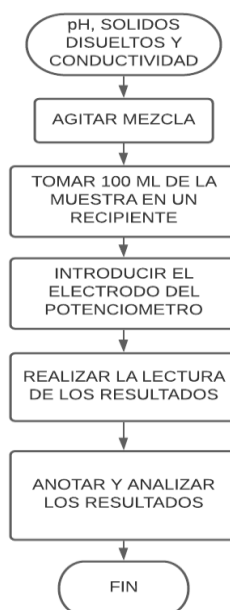
2.9. Parámetros analizados in situ

Otros parámetros fisicoquímicos que se analizaron a las muestras de agua fueron el potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica y los sólidos disueltos, dichos parámetros se tomaron en el lugar de la realización del experimento, utilizando un electrodo conectado a un potenciómetro para tal propósito, siguiendo el procedimiento que a continuación se enumera:

- Agitar la muestra de 1 litro expuesta al sol.
- Tomar 100 ml de dicha muestra en un recipiente.
- Introducir el electrodo del potenciómetro dentro de la muestra.
- Realizar la lectura del potenciómetro para los distintos parámetros.
- Anotar los datos.

Con base en lo anterior, podemos obtener el siguiente diagrama de flujo:

Figura 6. **Procedimiento para determinación de pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos**



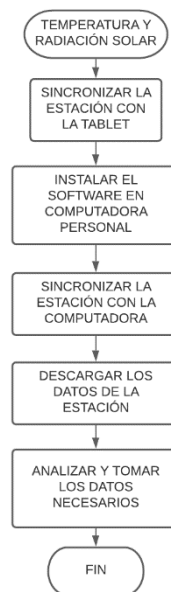
Fuente: elaboración propia.

Por último, los parámetros meteorológicos y climáticos necesarios para la realización del presente estudio fueron tomados de la estación meteorológica digital existente en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II Ing. Arturo Pazos, siguiendo el procedimiento que se muestra a continuación:

- Sincronizar la estación meteorológica con la *tablet* para descarga de datos.
- Instalar el software necesario en la computadora personal.
- Sincronizar mediante el software la estación meteorológica con la computadora.
- Descargar los datos brindados por la estación.
- Analizar los datos a tomar para temperatura y radiación.

Con base en lo anterior, podemos obtener el siguiente diagrama de flujo:

Figura 7. **Procedimiento para descarga de datos de temperatura y radiación solar**



Fuente: elaboración propia.

Por último, los datos del tiempo de cada medición se realizaron mediante un cronometro y un reloj debido a que la medición se realizó en horas.

3. RESULTADOS

Para el presente estudio se analizaron 4 distintos muestreos o corridas del experimento para evaluar la eficiencia de la metodología en cada una de las combinaciones, dichos muestreos o corridas del experimento fueron expuestas al sol en distintos días en el horario de 08:00 a 16:00 horas en los 4 muestreos, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros medidos en los muestreos y para cada una de las combinaciones analizadas.

Luego de la aplicación de la metodología UV SODIS de desinfección en el agua de lluvia captada se procedió a realizar la determinación de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos necesarios para evaluar cada una de las combinaciones de materiales utilizados del muestreo, obteniendo lo siguiente:

3.1. Coliformes totales

En cuanto a los parámetros bacteriológicos del agua se analizaron los coliformes totales por medio del método Colilert de detección, obteniendo:

Tabla IV. **Concentraciones de coliformes totales**

COLIFORMES TOTALES (NMP/100 cm ³)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	>2419.6	1553.2	> 2419.6	> 2419.6
	2	>2419.6	1299.7	> 2419.6	> 2419.6
	4	151.50	2419.6	> 2419.6	> 2419.6
	6	18.70	6.1	> 2419.6	> 2419.6
	8	10.10	1	> 2419.6	> 2419.6
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	>2419.6	1299.7	> 2419.6	> 2419.6
	2	2419.60	1046.2	> 2419.6	> 2419.6

Continuación tabla IV.

	4	122.30	1203.3	> 2419.6	> 2419.6
	6	31.30	9.2	> 2419.6	> 2419.6
	8	7.10	4	> 2419.6	> 2419.6
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	>2419.6	1553.2	> 2419.6	> 2419.6
	2	>2419.6	2419.6	> 2419.6	> 2419.6
	4	2419.60	1732.9	> 2419.6	> 2419.6
	6	46.50	> 2419.6	> 2419.6	> 2419.6
	8	249.50	11.4	> 2419.6	> 2419.6
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	>2419.6	1299.7	> 2419.6	> 2419.6
	2	>2419.6	1203.3	> 2419.6	> 2419.6
	4	248.10	1986.3	> 2419.6	> 2419.6
	6	461.10	42.8	> 2419.6	> 2419.6
	8	160.70	8	> 2419.6	> 2419.6

Fuente: elaboración propia.

Agregado los resultados de coliformes totales mostrado en las páginas anteriores, se pudo obtener los porcentajes de remoción alcanzados para cada una de las combinaciones en cada uno de los muestreos realizados, obteniendo los siguientes valores para cada intervalo de tiempo de exposición:

Tabla V. **Porcentajes de remoción de coliformes totales**

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLIFORMES TOTALES					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
	2	0.00 %	16.32 %	0.00 %	0.00 %
	4	93.74 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
	6	99.23 %	99.61 %	0.00 %	0.00 %
	8	99.58 %	99.94 %	0.00 %	0.00 %
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
	2	0.00 %	19.50 %	0.00 %	0.00 %
	4	94.95 %	7.42 %	0.00 %	0.00 %
	6	98.71 %	99.29 %	0.00 %	0.00 %
	8	99.71 %	99.69 %	0.00 %	0.00 %
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
	2	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Continuación tabla V.

	4	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%
	6	98.08%	0.00%	0.00%	0.00%
	8	89.69%	99.27%	0.00%	0.00%
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	0.00%	7.42%	0.00%	0.00%
	4	89.75%	0.00%	0.00%	0.00%
	6	80.95%	96.71%	0.00%	0.00%
	8	93.36%	99.38%	0.00%	0.00%

Fuente: elaboración propia.

3.2. Coliformes fecales

En cuanto a los parámetros bacteriológicos del agua se analizaron los coliformes fecales por medio del método Colilert de detección, obteniendo:

Tabla VI. **Concentraciones de coliformes fecales**

COLIFORMES FECALES (NMP/100 cm ³)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	7.10	18.8	319.9	73.8
	2	1.00	1	727	15.3
	4	1.00	1	866.4	< 1
	6	< 1	< 1	259.3	< 1
	8	< 1	< 1	158.5	< 1
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	25.90	5	343.3	95.9
	2	6.00	3	727	14.2
	4	< 1	1	648.8	5.1
	6	< 1	< 1	328.2	2
	8	< 1	< 1	238.2	< 1
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	7.10	18.8	319.9	73.8
	2	3.00	3.1	547.7	14.4
	4	< 1	1	920.8	1
	6	< 1	4.1	461.1	4.1
	8	< 1	< 1	280.9	< 1
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	25.90	5	343.3	95.9
	2	7.10	3	686.7	9.4
	4	1.00	4.1	1299.7	3.1
	6	< 1	< 1	387.3	1
	8	< 1	< 1	157.6	< 1

Fuente: elaboración propia.

Por último, con las concentraciones mostradas en las páginas anteriores, se determinaron los porcentajes de remoción alcanzados para los coliformes fecales al igual que para los coliformes totales, obteniendo lo siguiente:

Tabla VII. **Porcentajes de remoción de coliformes fecales**

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	0.0 %	0.0 %	0.00 %	0.00 %
	2	85.9 %	94.7 %	0.00 %	79.27 %
	4	85.9 %	94.7 %	0.00 %	99.91 %
	6	99.9 %	99.9 %	18.94 %	99.91 %
	8	99.9 %	99.9 %	50.45 %	99.91 %
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	0.0 %	0.0 %	0.00 %	0.00 %
	2	76.8 %	40.0 %	0.00 %	85.19 %
	4	99.9 %	80.0 %	0.00 %	94.68 %
	6	99.9 %	99.8 %	4.40 %	97.91 %
	8	99.9 %	99.9 %	30.61 %	99.91 %
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	0.0 %	0.0 %	0.00 %	0.00 %
	2	57.7 %	83.5 %	0.00 %	80.49 %
	4	99.9 %	94.7 %	0.00 %	98.64 %
	6	99.9 %	78.2 %	0.00 %	94.44 %
	8	99.9 %	99.9 %	12.19 %	99.89 %
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	0.0 %	0.0 %	0.00 %	0.00 %
	2	72.6 %	40.0 %	0.00 %	90.20 %
	4	96.1 %	18.0 %	0.00 %	96.77 %
	6	99.9 %	99.9 %	0.00 %	98.96 %
	8	99.9 %	99.9 %	54.09 %	99.91 %

Fuente: elaboración propia.

Como parte de los parámetros fisicoquímicos que se analizaron se midieron los parámetros de color, turbiedad, pH, conductividad eléctrica y los sólidos totales presentes en las botellas expuestas al sol, así como la temperatura final luego de la exposición de cada muestra, como resultado de dicho análisis se obtuvo:

3.3. Color

Para el color aparente determinado para cada una de las muestras se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla VIII. **Resultados del color aparente**

COLOR APARENTE (U Pt-Co)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: PET	0	57	183	297	28
	2	63	183	292	21
	4	85	168	306	24
	6	86	157	313	24
	8	77	150	324	22
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: VIDRIO	0	62	185	296	35
	2	59	190	280	33
	4	85	171	302	28
	6	81	154	330	26
	8	64	155	328	23
TECHO: TEJA, BOTELLA: PET	0	57	183	297	28
	2	60	185	282	25
	4	62	167	291	24
	6	77	176	311	26
	8	81	148	327	16
TECHO: TEJA, BOTELLA: VIDRIO	0	62	185	296	35
	2	59	190	285	28
	4	51	169	309	20
	6	100	175	314	16
	8	72	155	324	18

Fuente: elaboración propia.

Como complemento del color en los parámetros fisicoquímicos medidos en el laboratorio, para cada una de las muestras se realizó la determinación de la turbiedad, como se muestra a continuación.

3.4. Turbiedad

Para la turbiedad de las muestras se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla IX. **Resultados de turbiedad**

TURBIEDAD (NTU)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: PET	0	1.23	8.11	6.83	2.84
	2	1.38	8.98	5.68	2.6
	4	1.51	7.96	6.86	2.74
	6	1.37	7.57	6.41	2.48
	8	1.35	8.6	6.4	2.81
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: VIDRIO	0	1.36	8.82	7.67	2.79
	2	1.47	8.31	5.95	2.84
	4	1.71	7.7	6.21	2.71
	6	1.43	7.86	6.78	2.88
	8	1.31	8.02	6.73	2.82
TECHO: TEJA, BOTELLA: PET	0	1.23	8.11	6.83	2.84
	2	1.47	8.39	7.54	2.7
	4	1.52	8.23	6.19	2.78
	6	1.41	8.21	6.69	2.73
	8	1.46	7.92	6.45	2.79
TECHO: TEJA, BOTELLA: VIDRIO	0	1.36	8.82	7.67	2.79
	2	1.42	8.91	6.51	2.82
	4	1.53	8.51	6.52	2.65
	6	1.51	7.95	6.55	2.82
	8	1.44	8.15	6.64	2.83

Fuente: elaboración propia.

Adicional a los parámetros analizados en el laboratorio, se realizó el análisis de algunos de ellos *in situ*, obteniendo los resultados que se muestran en las tablas presentadas en las siguientes páginas.

3.5. Potencial de hidrógeno (pH)

Para el pH de cada una de las muestras analizadas se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla X. Resultados del pH

COMBINACIÓN	HORAS	pH			
		MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: PET	0	6.3	5	4.5	5.6
	2	5.8	4.6	4.6	5.1
	4	5.8	5	4.3	4.9
	6	5.8	5.3	4	4.8
	8	5.8	5.3	4.2	4.8
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: VIDRIO	0	6	5	5	5.4
	2	5.8	4.6	4.4	5
	4	5.8	4.9	4.1	4.8
	6	5.8	5.2	3.9	4.7
	8	5.8	5.4	4.1	4.6
TECHO: TEJA, BOTELLA: PET	0	6.3	5	4.5	5.6
	2	5.7	4.7	5	5.9
	4	5.8	5.3	4.8	5.7
	6	5.8	5.6	4.7	5.2
	8	5.8	5.8	5	5.3
TECHO: TEJA, BOTELLA: VIDRIO	0	6	5	5	5.4
	2	5.8	4.6	4.3	5.1
	4	5.8	4.9	4.3	4.6
	6	5.8	5.2	4.1	4.7
	8	5.8	5.3	4.4	4.8

Fuente: elaboración propia.

Otro de los parámetros que conformaron la caracterización realizada al agua de las muestras analizadas fue la conductividad eléctrica obteniendo los siguientes resultados:

3.6. Conductividad eléctrica

Para la conductividad eléctrica se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XI. **Resultados de la conductividad eléctrica**

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA ($\mu\text{s}/\text{cm}$)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: PET	0	21.8	70	60	40
	2	22.6	80	70	30
	4	23.1	80	60	30
	6	22.1	80	50	30
	8	21.5	70	50	30
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: VIDRIO	0	25.3	70	70	40
	2	25.4	80	60	30
	4	25.4	80	60	30
	6	25.3	80	50	30
	8	23	70	50	20
TECHO: TEJA, BOTELLA: PET	0	21.8	70	60	40
	2	22.9	90	90	60
	4	23.8	100	70	50
	6	21	80	50	30
	8	21.9	80	50	40
TECHO: TEJA, BOTELLA: VIDRIO	0	25.3	70	70	40
	2	25.8	80	70	40
	4	24.8	80	60	30
	6	26.5	80	50	30
	8	23.6	80	50	30

Fuente: elaboración propia.

En conjunto con la conductividad eléctrica se analizaron las concentraciones de sólidos disueltos de las muestras del estudio, obteniendo lo siguiente:

3.7. Sólidos disueltos

Los resultados obtenidos para la concentración de sólidos disueltos de las muestras son:

Tabla XII. **Resultados de los sólidos disueltos**

SÓLIDOS DISUELTOS (mg/l)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: PET	0	11.336	36.4	31.2	20.8
	2	11.752	41.6	36.4	15.6
	4	12.012	41.6	31.2	15.6
	6	11.492	41.6	26	15.6
	8	11.18	36.4	26	15.6
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: VIDRIO	0	13.156	36.4	36.4	20.8
	2	13.208	41.6	31.2	15.6
	4	13.208	41.6	31.2	15.6
	6	13.156	41.6	26	15.6
	8	11.96	36.4	26	10.4
TECHO: TEJA, BOTELLA: PET	0	11.336	36.4	31.2	20.8
	2	11.908	46.8	46.8	31.2
	4	12.376	52	36.4	26
	6	10.92	41.6	26	15.6
	8	11.388	41.6	26	20.8
TECHO: TEJA, BOTELLA: VIDRIO	0	13.156	36.4	36.4	20.8
	2	13.416	41.6	36.4	20.8
	4	12.896	41.6	31.2	15.6
	6	13.78	41.6	26	15.6
	8	12.272	41.6	26	15.6

Fuente: elaboración propia.

3.8. Temperatura

Como último parámetro fisicoquímico medido se tiene la temperatura, para el presente parámetro se realizó la medición de este al retirar las muestras de la superficie de exposición al sol para poder conocer la temperatura alcanzada por la muestra previo a su extracción del experimento, de dicho la realización de dicho procedimiento se obtuvo lo siguiente:

Tabla XIII. **Resultados de la temperatura**

TEMPERATURA (°C)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: PET	0	19	21.8	22.7	21.1
	2	33	28.7	34.1	27.1
	4	34	35.5	39.5	34.5
	6	33	33.9	41.2	34.4
	8	27	27.2	37.2	32.1
TECHO: LÁMINA, BOTELLA: VIDRIO	0	19	21.9	22.4	21.4
	2	33	29.5	34.9	27.5
	4	35	37.1	40	35.1
	6	35	35.3	41.5	34.9
	8	27	27.8	38.1	32.8
TECHO: TEJA, BOTELLA: PET	0	19	21.8	22.7	21.1
	2	30	27	30.8	25.8
	4	32	32.5	38.1	34.5
	6	33	33.5	39.7	34.7
	8	27	26.3	34.7	31.8
TECHO: TEJA, BOTELLA: VIDRIO	0	19	21.9	22.4	21.4
	2	33	28	32.9	26.6
	4	35	34.7	38.9	34.7
	6	35	34.6	41.3	34.8
	8	27	27.8	37.5	33.1

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, como complemento de los análisis de laboratorio realizados, se investigaron algunos parámetros climatológicos de los días en que se aplicó UV SODIS para cada uno de los muestreos, para tal propósito se utilizaron los datos de la estación meteorológica más cercana, siendo está la estación automática del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología ubicada en la zona 12 de la ciudad capital en la sede central del mismo.

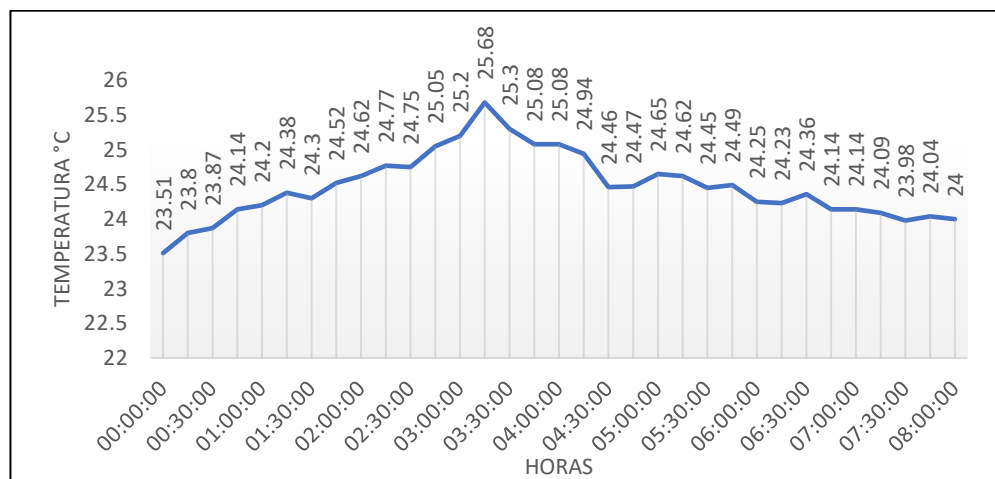
Luego de solicitar la información a las oficinas de meteorología del INSIVUMEH, se obtuvieron los resultados de temperatura y radiación solar en el rango de las ocho horas en las que se realizó el experimento, obteniendo las siguientes gráficas:

3.9. Temperatura ambiente

Dentro de los parámetros ambientales medidos durante la realización del experimento se encuentra la temperatura ambiente de los días en que se realizó el experimento, obteniendo las distintas figuras según el muestreo en cuestión.

Figura 8. **Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo**

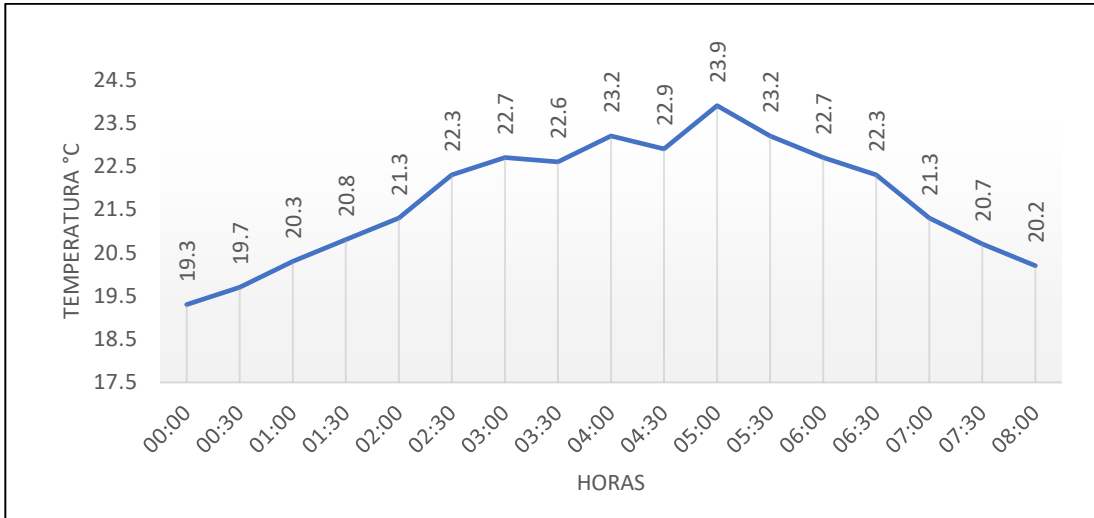
No. 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo**

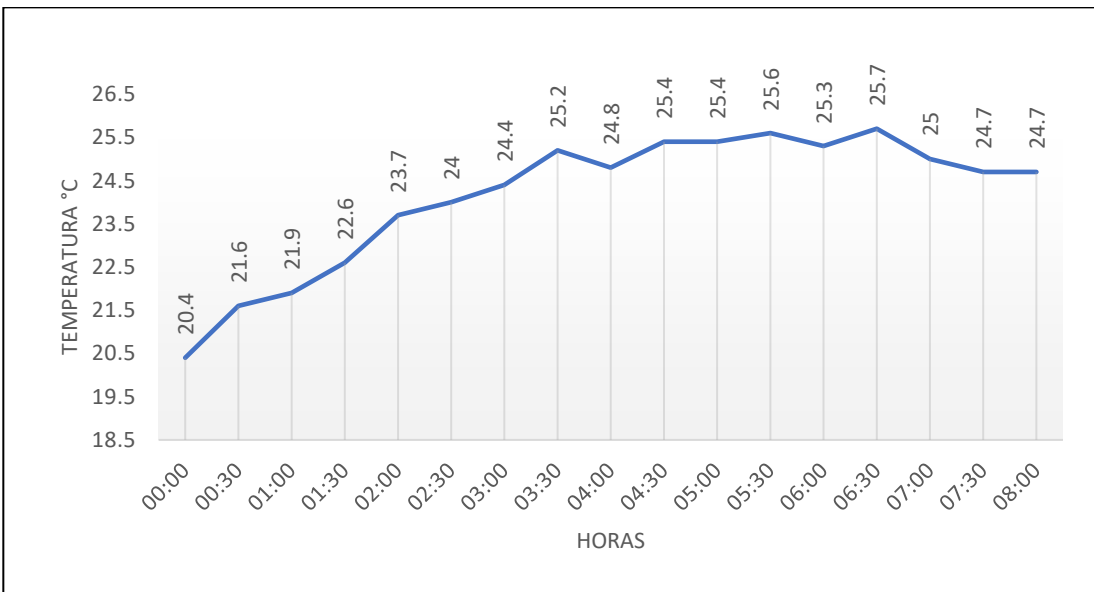
No. 2



Fuente: elaboración propia.

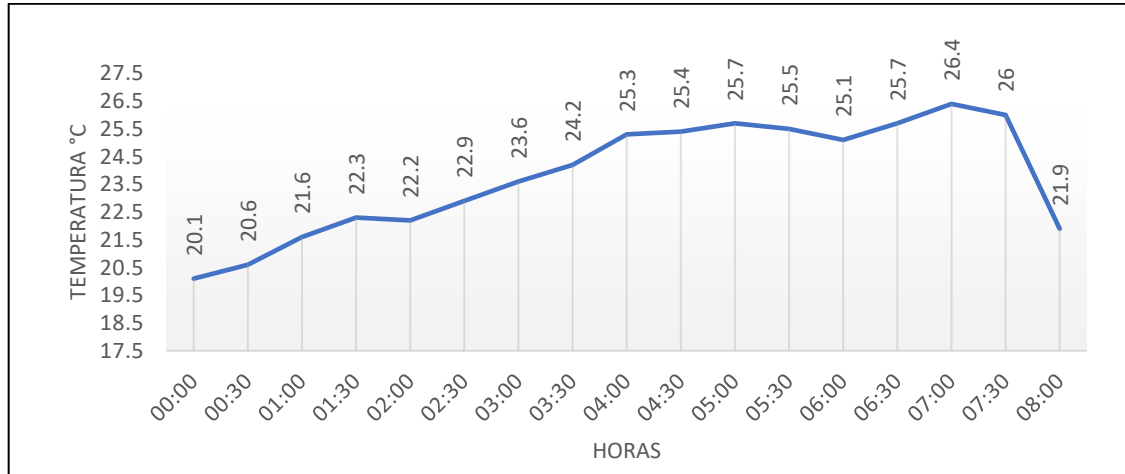
Figura 10. **Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo**

No. 3



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfica de temperatura ambiente en °C del día del muestreo No. 4**

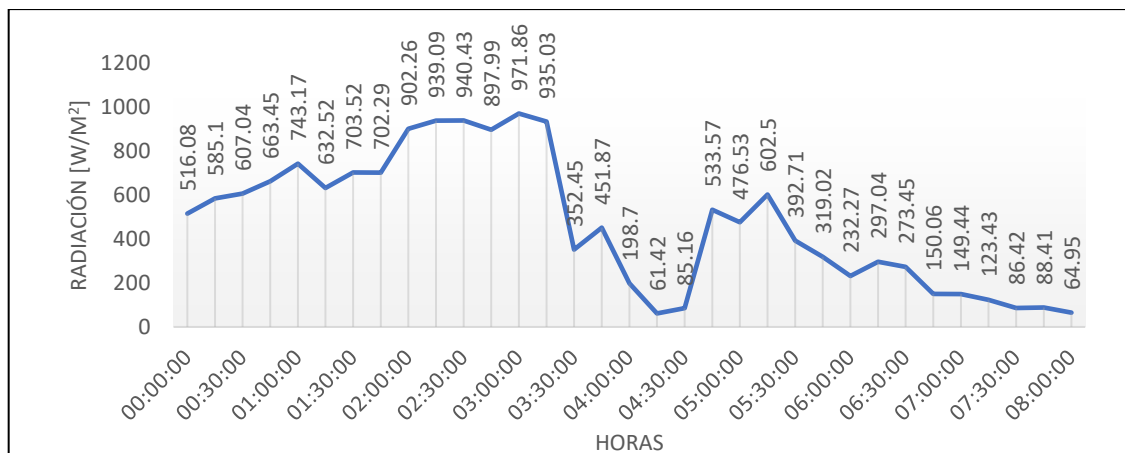


Fuente: elaboración propia.

3.10. Radiación solar

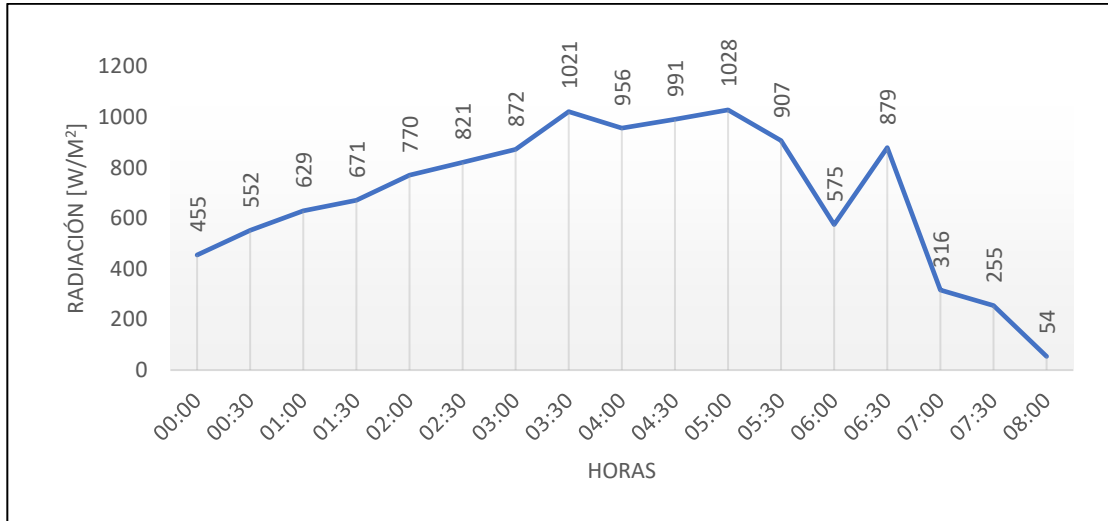
El segundo parámetro ambiental medido durante la realización del experimento se encuentra la radiación solar de los días en que se realizó el experimento, obteniendo las distintas figuras según el muestreo en cuestión.

Figura 12. **Gráfica de radiación solar W/m² del día del muestreo No. 1**



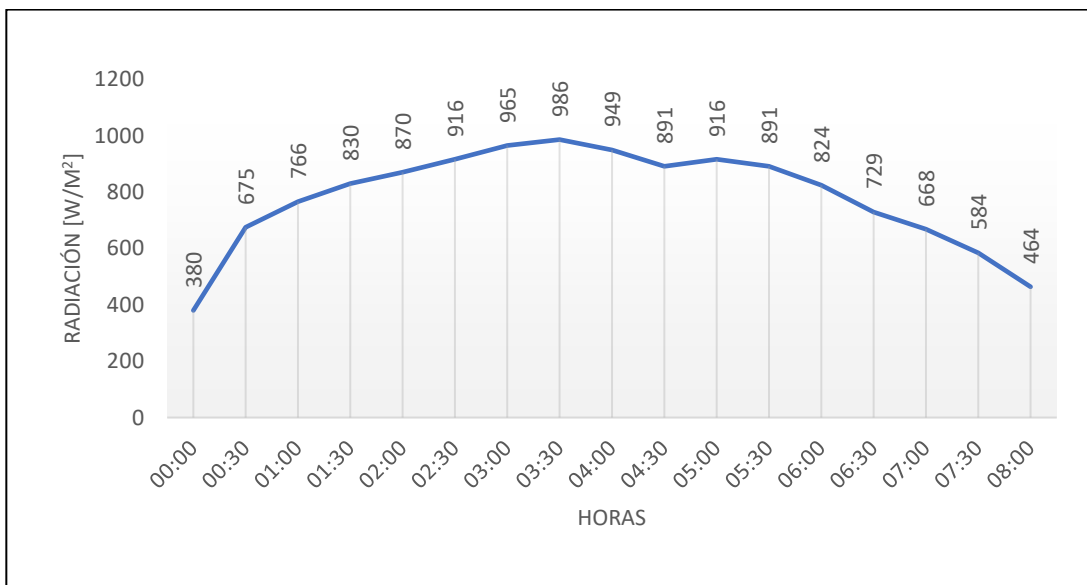
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Gráfica de radiación solar W/m² del día del muestreo No. 2



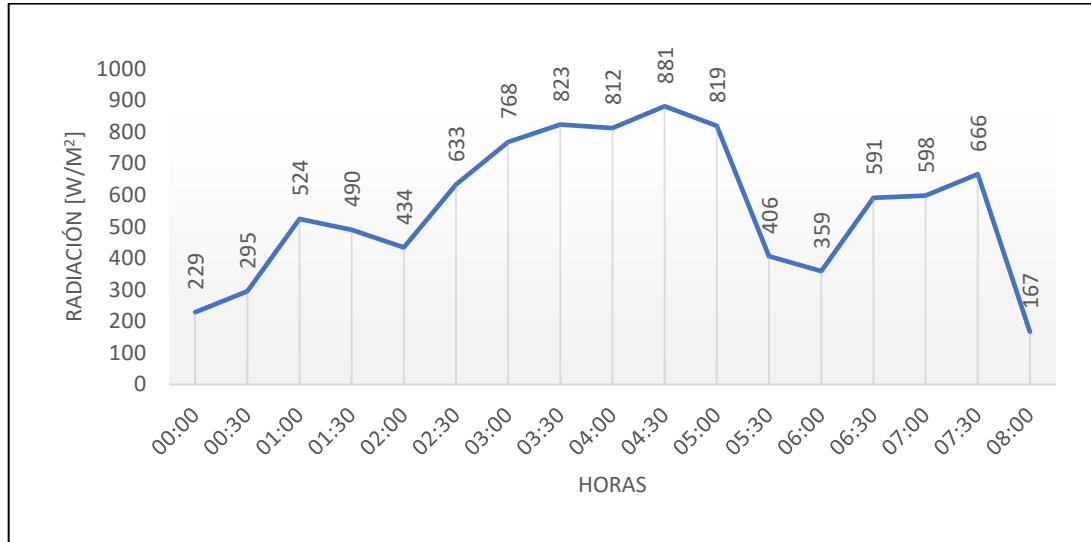
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Gráfica de radiación solar W/m² del día del muestreo No. 3



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Gráfica de radiación solar W/m² del día del muestreo No. 4**



Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos mostrados en las páginas anteriores, se realizó el análisis de estos para poder determinar si la hipótesis planteada para el presente estudio especial se puede aceptar o rechazar, para tal propósito se realizó el análisis que se presenta a continuación.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se presenta en las tablas del capítulo anterior, para el presente estudio se determinaron varios parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua de lluvia captada para cada uno de los muestreos realizados en el transcurso del experimento en diversos días de 08:00 a 16:00 horas, los resultados obtenidos serán analizados con respecto a la Guía para la calidad de Agua para el Consumo Humano emitida en el año 2011 en su cuarta y última edición por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Los resultados obtenidos no serán analizados respecto a la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001 derivado a que no los parámetros obtenidos son de un agua cruda de lluvia con un tratamiento domiciliar, no con un proceso de potabilización convencional que permita cuantificar su calidad con respecto a una normativa rigurosa como la mencionada anteriormente.

Dentro de los parámetros fisicoquímicos que se determinaron se encuentran color aparente, turbiedad, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, pH y temperatura tal y como se muestra en capítulos anteriores, encontrando las características que a continuación se presenta.

4.1. Color

Como parte del análisis estadístico descriptivo realizado para los resultados obtenidos para el color aparente presentados en la tabla No. VIII, se encontraron que los resultados anteriores muestran las siguientes características:

Tabla XIV. **Análisis estadístico del color aparente**

Valor Máximo	330	U Pt-Co
Valor Promedio	142.91	U Pt-Co
Moda	28	U Pt-Co
Mediana	124	U Pt-Co
Valor Mínimo	16	U Pt-Co

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos decir que el valor máximo es de 330 unidades platino cobalto de color, el valor promedio de los resultados obtenidos es de 142.91 unidades platino cobalto y por último que el valor mínimo que se obtuvo fue de 16 unidades platino cobalto.

De lo anterior es importante mencionar que los valores altos obtenidos son derivados de la contaminación del agua proveniente de los residuos de ceniza volcánica que precipito sobre las superficies donde se realizó la captación de agua misma que a pesar de continuas limpiezas de estas se hizo presente en la coloración de las muestras.

En cuanto a cumplimiento de normativas, para el parámetro de color la OMS no tiene ningún valor máximo, aunque si establece que para que tenga una buena aceptación por el consumidor recomienda un valor menor a las 15 unidades platino cobalto, recomendación que no fue cumplida por ninguna de las muestras para el presente estudio, presentando valores cercanos al mismo únicamente.

4.2. Turbiedad

Realizando el análisis estadístico descriptivo de los resultados de la turbiedad, se encontraron que estos últimos muestran las siguientes características:

Tabla XV. **Análisis estadístico de la turbiedad**

Valor Máximo	8.98	NTU
Valor Promedio	4.77	NTU
Moda	2.84	NTU
Mediana	4.28	NTU
Valor Mínimo	1.23	NTU

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos decir que el valor máximo es de 8.98 NTU, el valor promedio de los resultados obtenidos es de 4.77 NTU y por último que el valor mínimo que se obtuvo fue de 1.23 NTU.

Al igual que para el color los valores altos obtenidos para la turbiedad son derivados de la contaminación del agua proveniente de los residuos de ceniza volcánica que precipito sobre las superficies donde se realizó la captación de agua

La OMS no establece un valor máximo de turbiedad, pero si recomienda que la misma no sea perceptible para el consumidor, sin embargo, para la aplicación de la metodología UV – SODIS la turbiedad si es un parámetro esencial para determinar su aplicabilidad.

Para lo descrito anteriormente, la literatura establece que el valor máximo de turbiedad que debe presentar el agua para poder aplicar la desinfección por UV SODIS es de 30 NTU, parámetro que es cumplido por todas las muestras de agua analizadas durante el estudio.

4.3. Potencial de hidrógeno (pH)

Realizando el análisis estadístico descriptivo de los resultados de la tabla X, se encontraron que los resultados anteriores muestran las siguientes características:

Tabla XVI. **Análisis estadístico del pH**

Valor Máximo	6.3
Valor Promedio	5.13
Moda	5.8
Mediana	5
Valor Mínimo	3.9

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos decir que el valor máximo es de 6.3, el valor promedio de los resultados obtenidos es de 5.13 y por último que el valor mínimo que se obtuvo fue de 3.19.

En su guía la OMS, indica como rango de cumplimiento el pH de 6.5 a 8 unidades, esto derivado a que valores inferiores o superiores a ellos podrían afectar órganos internos y por ende la salud del consumidor, en cuanto a los valores obtenidos para nuestras muestras podemos observar que no se cumple con dicho rango, lo que conlleva que el agua obtenida no es apta para consumo humano sin un tratamiento de neutralización para el presente parámetro.

Con base en los resultados de la tabla No. X podemos decir que el agua de lluvia captada es agua acida o en su defecto producto de la caída de la lluvia acida típica de zonas urbanas por la contaminación del aire por dióxido de carbono y monóxido de carbono, mismos que son los gases de efecto invernadero típicos emitidos al ambiente por la combustión de los motores de los vehículos de transporte de la ciudad.

4.4. Conductividad eléctrica

Realizando el análisis estadístico descriptivo se encontraron que los resultados anteriores muestran las siguientes características:

Tabla XVII. **Análisis estadístico de la conductividad eléctrica**

Valor Máximo	100	μs/cm
Valor Promedio	49.29	μs/cm
Moda	80	μs/cm
Mediana	50	μs/cm
Valor Mínimo	20	μs/cm

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos decir que el valor máximo es de 100 μs/cm, el valor promedio de los resultados obtenidos es de 49.29 μs/cm y por último que el valor mínimo que se obtuvo fue de 20 μs/cm.

No existe restricción en cuanto a límites máximos o mínimos de pH en la guía propuesta por la OMS para la calidad del agua apta para consumo humano, sin embargo, dicho parámetro es utilizado para límites de otros contaminantes químicos que no son parte del presente estudio.

4.5. **Sólidos disueltos**

Realizando el análisis estadístico descriptivo de las concentraciones de sólidos disueltos determinadas, se encontraron que los resultados anteriores muestran las siguientes características:

Tabla XVIII. **Análisis estadístico de los sólidos disueltos**

Valor Máximo	52	mg/l
Valor Promedio	25.63	mg/l
Moda	41.6	mg/l
Mediana	26	mg/l
Valor Mínimo	10.4	mg/l

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos decir que el valor máximo es de 52 mg/l, el valor promedio de los resultados obtenidos es de 25.63 mg/l y por último que el valor mínimo que se obtuvo fue de 20 mg/l.

La OMS establece que el límite de aceptabilidad de la concentración de sólidos disueltos es de 600 mg/l, ya que dice que hasta dicha concentración el sabor del agua no se ve afectado por dicho parámetro, para el caso de las muestras de agua de lluvia del presente estudio podemos concluir que todas las muestras cumplen con dicho límite, ya que el valor máximo obtenido de 52 mg/l se encuentra muy por debajo del límite establecido por la OMS.

4.6. Temperatura

Realizando el análisis estadístico descriptivo de los resultados de temperatura se encontraron que los resultados anteriores muestran las siguientes características:

Tabla XIX. **Análisis estadístico de la temperatura**

Valor Máximo	41.5	°C
Valor Promedio	30.77	°C
Moda	33	°C
Mediana	32.95	°C
Valor Mínimo	19	°C

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos decir que el valor máximo es de 41.5 °C, el valor promedio de los resultados obtenidos es de 30.77 °C y por último que el valor mínimo que se obtuvo fue de 19 °C.

La OMS no establece ningún límite para dicho parámetro, agregado a que las temperaturas obtenidas no son previas a consumo sino al momento de la extracción del experimento, motivo por el cual no se contempla el parámetro para determinar si es apta para consumo humano, sino únicamente como indicador del comportamiento de la misma a lo largo del experimento, mostrando su valor mínimo al momento de evaluar las muestras a la hora 0 y su valor máximo al evaluar las muestras extraídas a las 6 horas del experimento.

Para los parámetros microbiológicos y bacteriológicos se aplicó el método colilert para determinar cuantitativamente los coliformes totales y fecales presentes en la muestra, siguiendo el procedimiento mencionado en capítulos anteriores, para tal propósito se utilizaron todos los parámetros que el método posee, alineándonos a su rango de detección desde una concentración menor a uno como número más probable en cien centímetros cúbicos (<1 NMP/100 cm³) hasta su límite máximo de mayor a dos mil cuatrocientos diecinueve punto seis como número más probable en cien centímetros cúbicos (> 2419.6 NMP/100 cm³) como rango de detección.

De acuerdo con lo anterior para el presente estudio especial, dado los limitantes del método de cuantificación se tomará como valor máximo los 2419.6 NMP/100 cm³ y como valor mínimo 1 NMP/100 cm³ en temas numéricas, mientras que, en términos de análisis como tal, se tomará como > 2419.6 NMP/100 cm³ en el caso de los valores máximos y como no detectables en cien centímetros cúbicos como rango mínimo.

4.7. Coliformes totales

Una vez establecido lo anterior, para los coliformes totales, para el presente estudio se obtuvieron las siguientes concentraciones:

Para el análisis descriptivo de los resultados de la tabla No. IV, se tomaron tres puntos de referencia, con el fin de ir cumpliendo con los objetivos planteados para el presente estudio especial, dichos puntos de referencia son los tiempos de exposición solar de las muestras, tomando como referencia las horas 0, 6 y 8 de exposición solar de las muestras.

Como primer punto de análisis tenemos el tiempo de 0 horas de exposición, es decir el agua de lluvia cruda, sin ningún tipo de tratamiento, para dichas muestras se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XX. **Análisis estadístico de coliformes totales con 0 horas de exposición**

AGUA DE LLUVIA CRUDA		
Valor Máximo	2419.60	NMP/100 cm ³
Valor Promedio	2171.31	NMP/100 cm ³
Valor Mínimo	1299.70	NMP/100 cm ³

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos decir que la contaminación por coliformes totales estuvo presente en gran medida en las muestras iniciales de cada muestreo realizado, obteniendo valores máximos con concentraciones > 2419.6 NMP/100 cm³, una concentración promedio de 2171.31 NMP/100 cm³ y una concentración mínima de 1299.70 NMP/100 cm³.

El segundo punto de referencia son las seis horas de exposición, ya que se desea observar la calidad del agua en este punto para el consumo humano cumpliendo con la guía de la OMS antes mencionada, realizando un análisis estadístico descriptivo para corroborar si dicho cumplimiento se lleva a cabo o no para el periodo de tiempo analizado.

Tabla XXI. **Análisis estadístico de coliformes totales con 6 horas de exposición**

TRATADA 6 HRS		
Valor Máximo	2419.60	NMP/100 cm ³
Valor Promedio	1399.51	NMP/100 cm ³
Valor Mínimo	6.10	NMP/100 cm ³

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos decir que la contaminación por coliformes totales estuvo presente para las muestras analizadas a las 6 horas, obteniendo valores máximos con concentraciones >2419.6 NMP/100 cm³, una concentración promedio de 1399.51 NMP/100 cm³ y una concentración mínima de 6.10 NMP/100 cm³.

De lo anterior se puede concluir que, para el tiempo de exposición de seis horas, no se cumple con la Guía de la OMS para ninguna de las combinaciones de materiales analizadas en termino de los coliformes totales, esto debido a que en dicha guía se establece que el valor de la concentración de coliformes totales debe ser no detectable en cien centímetros cúbicos, condición que no se cumplió en ninguna de las muestras ya que el valor mínimo encontrado fue de 6.10 NMP/100 cm³.

Por último, como tercer punto de referencia se tienen las ocho (8) horas de exposición, esto debido a que fue el tiempo máximo de exposición para el presente estudio, por lo que se desea observar el comportamiento de las muestras para dicha extensión de tiempo, al aplicar estadística descriptiva a los resultados para el periodo de tiempo mencionado se obtuvo lo siguiente:

Tabla XXII. **Análisis estadístico de coliformes totales con 8 horas de exposición**

TRATADA 8 HRS		
Valor Máximo	2419.60	NMP/100 cm ³
Valor Promedio	1238.04	NMP/100 cm ³
Valor Mínimo	1.00	NMP/100 cm ³

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para las referencias anteriores, las muestras presentaban coliformes totales en su composición, para este caso se presentaron valores de concentración >2419.6 NMP/100 cm³, lo que indica que para algunos muestreos y combinaciones la concentración de coliformes inicial fue tan elevada que no pudo ser reducida a una concentración que fuera medible por el método Colilert, por lo que se tomó como una eficiencia del 0 % en dicho parámetro.

Para el punto de referencia de las 8 horas de exposición si se encontró que para el muestreo 2 y utilizando la combinación de techo de lámina con botella PET la concentración de 1 NMP/100 cm³, mismo que a pesar de estar relativamente bajo no cumple con lo dispuesto en la guía de calidad de agua para consumo humano de la OMS.

Agregado al análisis anterior, se obtuvieron los porcentajes de remoción de coliformes totales, resultados mostrados en la tabla No. V del presente estudio especial, resultados a los cuales se les realizó el mismo análisis estadístico descriptivo, obteniendo lo que se detalla en los párrafos posteriores.

De la tabla mencionada en el párrafo anterior es importante remarcar que, para el presente estudio, en las muestras donde la concentración de coliformes totales era mayor que la concentración de la muestra inicial se homogenizo

colocando un 0 % de remoción para cada uno de los casos tal y como se muestra en la tabla anterior.

Al igual que para el análisis estadístico de las concentraciones obtenidas, para los porcentajes de remoción se utilizaron 2 de los 3 puntos de referencia utilizados, (6 y 8 horas de exposición), además del análisis de la totalidad de las muestras, para realizar el análisis de la cantidad y porcentaje de muestras que alcanzaron cierto grado de remoción, resultado de dicho análisis se obtuvo:

Para la totalidad de las muestras, en el experimento se obtuvo lo siguiente:

Tabla XXIII. **Análisis de los porcentajes de remoción para la totalidad de las muestras**

% DE REMOCIÓN	No. DE MUESTRAS	% DE MUESTRAS
>99.9	1	1.39 %
99.9 - 99	8	11.11 %
90 - 99	6	8.33 %
<90	57	79.17 %
TOTAL	72	100 %

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos determinar que un 79.17 % de las muestras no alcanzaron un porcentaje de remoción del 90 %, debido a que para este punto de referencia se tomaron en cuenta las muestras de 2 y 4 horas de exposición solar, intervalos de tiempo que no son suficientes para realizar una desinfección mediante UV SODIS.

Además, la tabla muestra que únicamente una de las muestras alcanzó una remoción mayor al 99.9 %, mientras que un 19.44% de las muestras alcanzaron una remoción mayor al 90 % equivalentes a 14 muestras de las 72 analizadas.

Para las 6 horas de exposición solar, en cuanto a los porcentajes de remoción se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XXIV. **Análisis de los porcentajes de remoción a las 6 horas de exposición**

% DE REMOCIÓN	No. DE MUESTRAS	% DE MUESTRAS
>99.9	0	0.00 %
99.9 - 99	3	18.75 %
90 - 99	3	18.75 %
<90	10	62.50 %
TOTAL	16	100 %

Fuente: elaboración propia.

De lo anterior podemos decir que, para una exposición de 6 horas, no se logró alcanzar para ninguna de las muestras un porcentaje de remoción mayor al 99.9 %, pero si se obtuvo un 18.75 % de las muestras con una remoción mayor al 99 % y una cantidad igual con un porcentaje mayor al 90 % de remoción.

De las 16 muestras analizadas a las 6 horas de exposición un total de 10 muestras no alcanzaron una remoción del 90%, dichas muestras están conformadas principalmente por aquellas del muestreo 3 y 4 donde no se pudo determinar una remoción con el método de cuantificación utilizado, y otros valores de remoción cercanos al 80 %.

Para las 8 horas de exposición, los resultados del anterior análisis son los siguientes:

Tabla XXV. **Análisis de los porcentajes de remoción a las 8 horas de exposición**

% DE REMOCIÓN	No. DE MUESTRAS	% DE MUESTRAS
>99.9	1	6.25 %
99.9 - 99	5	31.25 %
90 - 99	1	6.25 %
<90	9	56.25 %
TOTAL	16	100 %

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos determinar que para las 8 horas de exposición si se alcanzó una remoción mayor al 99.9 % en un 6.25 % de las muestras, y un porcentaje de remoción mayor al 90 % en el 37.50 % de las 16 muestras que componen dicho punto de referencia.

Al igual que para las 6 horas de exposición, en este punto se obtuvo que 9 muestras que conforman el 56.25 % de la totalidad de las muestras no alcanzan una remoción del 90 %, dichas muestras están conformadas por los muestreos 3 y 4 donde no se alcanzó a determinar un porcentaje de remoción debido a las altas concentraciones de coliformes totales presentadas.

Para determinar cuál de las combinaciones es más eficiente para la desinfección de agua de lluvia mediante la metodología UV – SODIS en términos de los coliformes totales se analizarán los promedios de los porcentajes de remoción para cada uno de los intervalos de tiempo en cada una de las combinaciones de materiales utilizadas en el experimento.

Para tal propósito se utilizará una nueva simbología en cuanto a las combinaciones utilizadas, mismas que se presentan a continuación:

Tabla XXVI. **Simbología de las combinaciones de materiales utilizadas**

COMBINACIÓN	MATERIALES
COMB. 1	TECHO: LÁMINA
	BOTELLA: PET
COMB. 2	TECHO: LÁMINA
	BOTELLA: VIDRIO
COMB. 3	TECHO: TEJA
	BOTELLA: PET
COMB. 4	TECHO: TEJA
	BOTELLA: VIDRIO

Fuente: elaboración propia.

Una vez descrita la nueva simbología utilizada, a continuación, se muestra lo obtenido para el promedio de los porcentajes de remoción para cada una de las combinaciones utilizadas para los intervalos de exposición ya descritos.

Tabla XXVII. **Promedio de los porcentajes de remoción de coliformes totales**

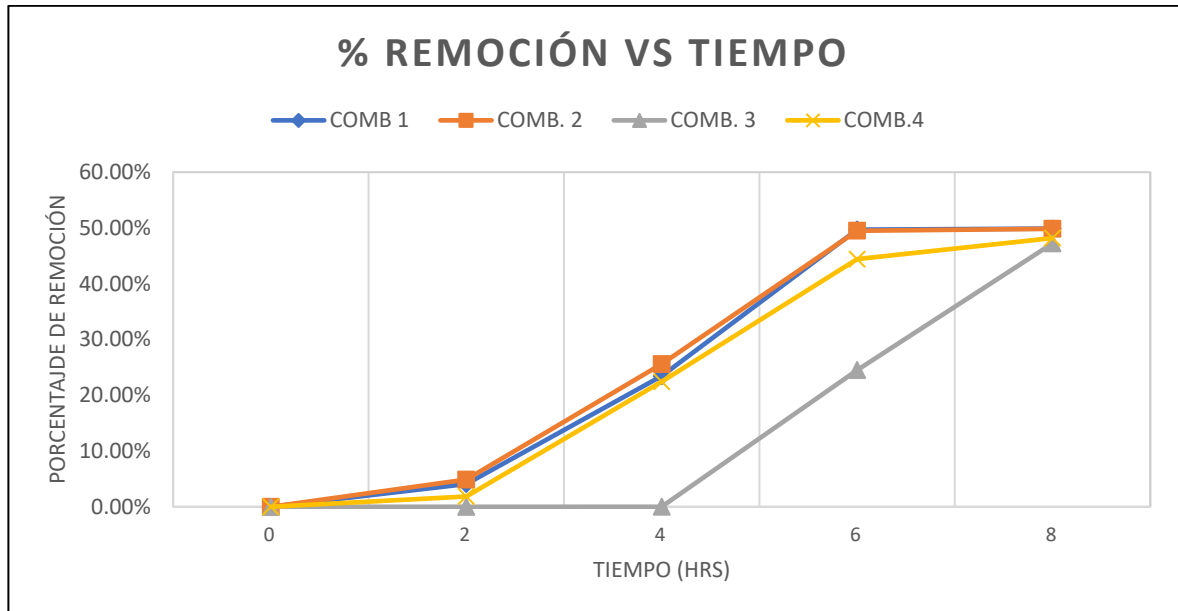
HORAS	COMB 1	COMB. 2	COMB. 3	COMB.4
0	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
2	4.08 %	4.88 %	0.00 %	1.85 %
4	23.44 %	25.59 %	0.01 %	22.44 %
6	49.71 %	49.50 %	24.52 %	44.41 %
8	49.88 %	49.85 %	47.24 %	48.19 %

Fuente: elaboración propia.

Agregado a la tabla No. XXVII, para ayudar a la comprensión de los resultados anteriormente presentados se realizó la figura No.16, en donde se muestra el comportamiento de los promedios de los porcentajes de remoción para cada una de las muestras debido a la cantidad de horas de exposición transcurridas previo a su análisis.

Para dicho comportamiento se obtuvo la siguiente gráfica:

Figura 16. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs tiempo de exposición transcurrido por combinación**



Fuente: elaboración propia.

De lo anteriormente presentado en la gráfica de la figura 16 y la tabla XXVII podemos concluir que para ninguna de las combinaciones se alcanzó un porcentaje de remoción promedio mayor al 50 %, derivado a que los muestreos 3 y 4 afectaron en gran medida dicho resultado.

En cuanto al comportamiento de la gráfica se puede decir que el comportamiento de los promedios fue normal, aumentando el porcentaje de remoción conforme las horas de exposición iban aumentando.

Para las combinaciones analizadas en el presente estudio, podemos observar que los mejores resultados transcurridas 6 y 8 horas de exposición fueron obtenidos por la combinación 1, seguida muy de cerca por la combinación 2 y la combinación 4 en tercera posición.

Con relación a los materiales que componen dichas combinaciones se observó que en ambos casos el material común es la lámina, por lo que podemos concluir también que, para poder tener una remoción eficiente y eficaz, dicho material como techo ayuda en gran medida el cumplimiento de tal objetivo sin alcanzar lo recomendado por la OMS.

Para el techo de teja, al comparar los resultados de las combinaciones que contienen dicho material como techo, podemos decir que se pueden esperar mejores valores de remoción al utilizar botellas de vidrio para la aplicación de UV SODIS.

4.8. Coliformes fecales

Al igual que para los coliformes totales, en el caso de los coliformes fecales se utilizó el método UV SODIS para su cuantificación aplicando el procedimiento alternativo utilizando una luz azul ultravioleta para su determinación.

En cuanto a los rangos de medición se utilizaron los mismos que para los coliformes totales, aplicando los mismos criterios descritos en páginas anteriores, con base en lo anterior, las concentraciones de coliformes fecales de cada una de las muestras analizadas en el presente estudio son las mostradas en la tabla No. VI del presente estudio especial.

Como se realizó para el análisis descriptivo de los resultados de los coliformes totales, para los valores de la tabla VI se tomaron tres puntos de referencia, con el fin de ir cumpliendo con los objetivos planteados para el presente estudio especial, dichos puntos de referencia son los tiempos de exposición solar de las muestras, tomando como referencia las horas 0, 6 y 8 de exposición solar de las muestras.

Para las muestras iniciales o bien el punto de referencia de las 0 horas se obtuvieron los siguientes resultados del análisis estadístico aplicado:

Tabla XXVIII. **Análisis estadístico de coliformes fecales con 0 horas de exposición**

AGUA DE LLUVIA CRUDA		
Valor Máximo	343.30	NMP/100 cm ³
Valor Promedio	111.21	NMP/100 cm ³
Valor Mínimo	5.00	NMP/100 cm ³

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos decir que la concentración máxima presentada en las muestras iniciales tomadas fue de 343.30 NMP/100 cm³, como una concentración promedio entre las muestras se obtuvo 111.21 NMP/100 cm³, y finalmente la menor concentración inicial fue de 5 NMP/100 cm³.

Con base en el párrafo anterior, la conclusión general de las muestras iniciales es que no se presentaron concentraciones excesivamente altas de coliformes fecales, esto producto de que es agua de lluvia y que en general la contaminación por dichos coliformes debe ser mínima puesto que el contacto con la superficie es de poco tiempo.

Para el segundo punto de referencia de 6 horas de exposición se obtuvieron los siguientes resultados del análisis estadístico aplicado:

Tabla XXIX. **Análisis estadístico de coliformes fecales con 6 horas de exposición**

TRATADA 6 HRS		
Valor Máximo	461.10	NMP/100 cm ³
Valor Promedio	90.94	NMP/100 cm ³
Valor Mínimo	1.00	NMP/100 cm ³

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos decir que la contaminación por coliformes fecales estuvo presente en el 50 % de las muestras analizadas a las 6 horas, obteniendo valores máximos con concentraciones de 461.10 NMP/100 cm³, una concentración promedio de 90.94 NMP/100 cm³ y con concentraciones mínimas con valores menores a 1 NMP/100 cm³.

Para la comparación con normas internacionales de fuentes de agua para consumo humano, se utilizará lo establecido por la Fundación SODIS en la Guía de desinfección solar emitida en el año 2003, en cuyo contenido principal, los autores de dicha guía, basados en el volumen 1 de la guía para la calidad de Agua para el Consumo Humano emitida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), determinaron la clasificación de la calidad del agua que se presenta en la siguiente tabla:

Tabla XXX. **Clasificación de los coliformes fecales en las fuentes de agua**

No. de coliformes por 100 ml.	Observación
0	Cumple con las normas de la OMS
1-10	Bajo riesgo
10-100	Riesgo intermedio
100-1000	Alto riesgo
> 1000	Muy alto riesgo

Fuente: Fundación SODIS. *Guía para la aplicación de la desinfección solar.* p. 84.

En conclusión, para un tiempo de exposición solar de 6 horas un 50 % de las muestras no presentaron presencia de coliformes totales, por lo que las mismas cumplen con las guías de la OMS que aplican, un 25 % de las muestras presentan un bajo riesgo y un 25 % un alto riesgo de enfermedades para las personas que la consuman.

Con base en el párrafo anterior, podemos concluir que para un tiempo de exposición de 6 horas en un 75 % de las ocasiones el agua puede ser consumida por seres humanos con un nulo o bajo riesgo, mientras que en un 25 % de las veces se necesitara un mayor tiempo de exposición solar o bien la aplicación de otro método de desinfección para que sea un agua segura de consumir.

Para el tiempo de referencia de 8 horas de exposición solar, se obtuvieron los siguientes valores de concentración luego del análisis estadístico:

Tabla XXXI. **Análisis estadístico de coliformes fecales con 8 horas de exposición**

TRATADA 8 HRS		
Valor Máximo	280.90	NMP/100 cm ³
Valor Promedio	52.95	NMP/100 cm ³
Valor Mínimo	1.00	NMP/100 cm ³

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos decir que la contaminación por coliformes fecales estuvo presente en el 75 % de las muestras analizadas a las 8 horas, siendo el muestreo No. 3 donde el tiempo de exposición no fue el necesario para poder remover la concentración de coliformes fecales en las muestras, obteniendo valores máximos con concentraciones de 280.90 NMP/100 cm³, una concentración promedio de 52.95 NMP/100 cm³ y con concentraciones mínimas con valores menores a 1 NMP/100 cm³.

Aplicando la tabla de clasificación de los coliformes fecales en las fuentes de agua se dedujo que un 75 % de las muestras cumplen con las guías establecidas por la OMS, mientras que el restante 25 % presentan un alto riesgo para la salud del consumidor.

En conclusión, la metodología UV SODIS de desinfección en un tiempo de 8 horas de exposición solar es efectivo en un 75 % de las veces, según los resultados de los muestres del presente estudio, siendo necesario un 25 % de las ocasiones un mayor tiempo de exposición o bien un método distinto de desinfección domiciliar para que su consumo no repercuta en la salud de sus consumidores.

Al igual que para los coliformes totales, es importante remarcar que, para el presente estudio, en las muestras donde la concentración de coliformes fecales era mayor que la concentración de la muestra inicial se homogenizo colocando un 0 % de remoción para cada uno de los casos tal y como se muestra en la tabla anterior.

Al igual que para el análisis estadístico de las concentraciones obtenidas, para los porcentajes de remoción se utilizaron 2 de los 3 puntos de referencia utilizados, (6 y 8 horas de exposición), además del análisis de la totalidad de las muestras, para realizar el análisis de la cantidad y porcentaje de muestras que alcanzaron cierto grado de remoción, resultado de dicho análisis se obtuvo:

Para la totalidad de las muestras, en el experimento se obtuvo lo siguiente:

Tabla XXXII. **Análisis de los porcentajes de remoción para la totalidad de las muestras**

% DE REMOCIÓN	No. DE MUESTRAS	% DE MUESTRAS
>99.9	16	22%
99.9 - 99	7	10%
90 - 99	11	15%
<90	38	53%
TOTAL	72	100%

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior podemos determinar que un 53 % de las muestras no alcanzaron un porcentaje de remoción del 90 %, debido a que para este punto de referencia se tomaron en cuenta las muestras de 2 y 4 horas de exposición solar, intervalos de tiempo que no son suficientes para realizar una desinfección mediante UV SODIS.

Además, la tabla muestra que el 22 % de las muestras alcanzó una remoción mayor al 99.9 %, mientras que un 25 % de las muestras alcanzaron una remoción mayor al 90 % equivalentes a 18 muestras de las 72 analizadas.

Para las 6 horas de exposición solar, en cuanto a los porcentajes de remoción se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XXXIII. **Análisis de los porcentajes de remoción a las 6 horas de exposición**

% DE REMOCIÓN	No. DE MUESTRAS	% DE MUESTRAS
>99.9	5	31 %
99.9 - 99	3	19 %
90 - 99	3	19 %
<90	5	31 %
TOTAL	16	100 %

Fuente: elaboración propia.

De lo anterior podemos decir que, para una exposición de 6 horas, en el 31 % de las muestras se alcanzó un porcentaje de remoción mayor al 99.9 %, agregado a un 19 % de las muestras con una remoción mayor al 99 % y una cantidad igual con un porcentaje mayor al 90 % de remoción.

De las 16 muestras analizadas a las 6 horas de exposición un total de 5 muestras no alcanzaron una remoción del 90 %, dichas muestras están conformadas principalmente por aquellas del muestreo 3 y 4 donde no se pudo

determinar una remoción con el método de cuantificación utilizado y en los demás casos el porcentaje no supero el 20 % de remoción de coliformes fecales.

Para las 8 horas de exposición, los resultados son los siguientes:

Tabla XXXIV. **Análisis de los porcentajes de remoción a las 8 horas de exposición**

% DE REMOCIÓN	No. DE MUESTRAS	% DE MUESTRAS
>99.9	9	56.25 %
99.9 - 99	3	18.75 %
90 - 99	0	0.00 %
<90	4	25.00 %
TOTAL	16	100 %

Fuente: elaboración propia.

Con la tabla anterior, podemos determinar que para las 8 horas de exposición si se alcanzó una remoción mayor al 99.9 % en un 56.25 % de las muestras, y un porcentaje de remoción mayor al 90 % en el 18.75 % de las 16 muestras que componen dicho punto de referencia.

Para este punto de referencia se obtuvo que 4 muestras que conforman 25 % de la totalidad de las muestras no alcanzan una remoción del 90 %, dichas muestras están conformadas por los muestreos 3 y 4 donde en algunos casos no se alcanzó a determinar un porcentaje de remoción debido a las altas concentraciones de coliformes totales presentadas y en otros la remoción se mantuvo menor al 55 %.

Para determinar cuál de las combinaciones es más eficiente para la desinfección de agua de lluvia mediante la metodología UV – SODIS al igual que en los coliformes totales se analizarán los promedios de los porcentajes de remoción para cada uno de los intervalos de tiempo en cada una de las combinaciones de materiales utilizadas en el experimento.

Para tal propósito se utilizará una nueva simbología en cuanto a las combinaciones utilizadas, mismas que se presentan a continuación:

Tabla XXXV. **Simbología de las combinaciones de materiales utilizadas**

COMBINACIÓN	MATERIALES
COMB. 1	TECHO: LÁMINA
	BOTELLA: PET
COMB. 2	TECHO: LÁMINA
	BOTELLA: VIDRIO
COMB. 3	TECHO: TEJA
	BOTELLA: PET
COMB. 4	TECHO: TEJA
	BOTELLA: VIDRIO

Fuente: elaboración propia.

Una vez descrita la nueva simbología utilizada, a continuación, se muestra lo obtenido para el promedio de los porcentajes de remoción para cada una de las combinaciones utilizadas para los intervalos de exposición ya descritos.

Tabla XXXVI. **Promedio de los porcentajes de remoción de coliformes fecales**

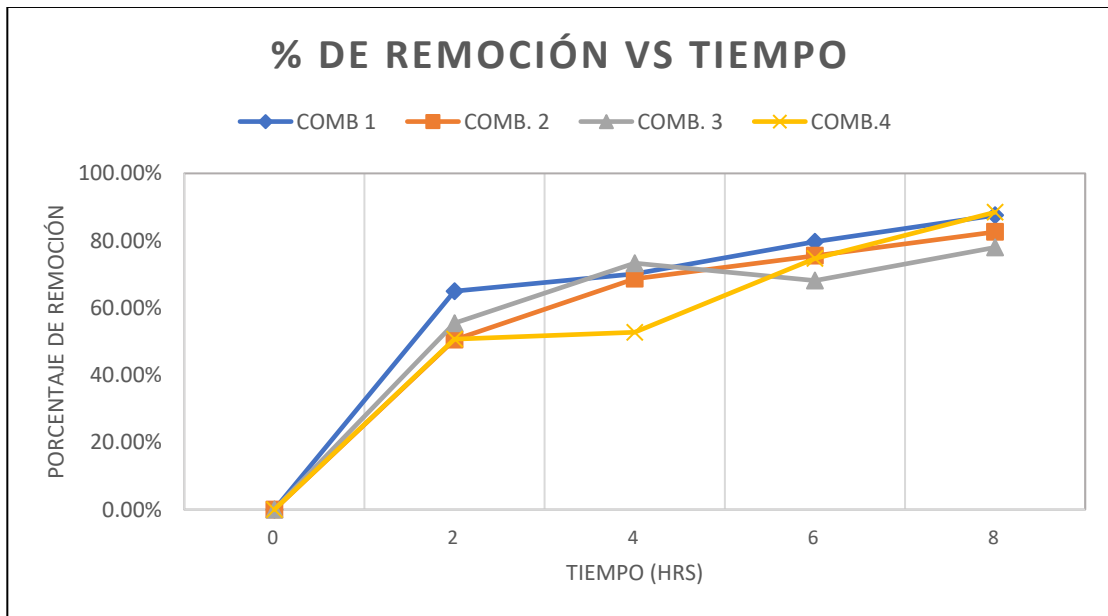
HORAS	COMB 1	COMB. 2	COMB. 3	COMB.4
0	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
2	64.97 %	50.51 %	55.44 %	50.70 %
4	70.13 %	68.65 %	73.30 %	52.73 %
6	79.66 %	75.50 %	68.12 %	74.69 %
8	87.54 %	82.58 %	77.97 %	88.45 %

Fuente: elaboración propia.

Agregado a la tabla No. XXXVI, para ayudar a la comprensión de los resultados anteriormente presentados se realizó la figura 17, en donde se muestra el comportamiento de los promedios de los porcentajes de remoción para cada una de las muestras debido a la cantidad de horas de exposición transcurridas previo a su análisis.

Para dicho comportamiento se obtuvo la siguiente gráfica:

Figura 17. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs. tiempo de exposición transcurrido por combinación**



Fuente: elaboración propia.

De lo anteriormente presentado en la figura No. 17 y la tabla XXXVI podemos concluir que para ninguna de las combinaciones se alcanzó un porcentaje de remoción promedio mayor al 90 %, derivado a que los muestreos 3 y 4 afectaron en gran medida dicho resultado.

En cuanto al comportamiento de la gráfica se puede decir que el comportamiento de los promedios fue normal, aumentando el porcentaje de remoción conforme las horas de exposición iban aumentando.

Para las combinaciones analizadas en el presente estudio, podemos observar que los mejores resultados transcurridas 6 y 8 horas de exposición fueron obtenidos por la combinación 1, seguida muy de cerca por la combinación 4 y la combinación 2 en tercera posición.

Con relación a los materiales que componen dichas combinaciones se observó que, de los materiales para techo, la lámina posee propiedades térmicas que sin importar la botella que se utiliza puede llegar a presentar porcentajes de remoción aceptables, por lo que podemos concluir también que, para poder tener una remoción eficiente y eficaz, dicho material como techo ayuda en gran medida el cumplimiento de tal objetivo.

Para el techo de teja, al comparar los resultados de las combinaciones que contienen dicho material como techo, podemos decir que se pueden esperar mejores valores de remoción al utilizar botellas de vidrio para la aplicación de UV SODIS.

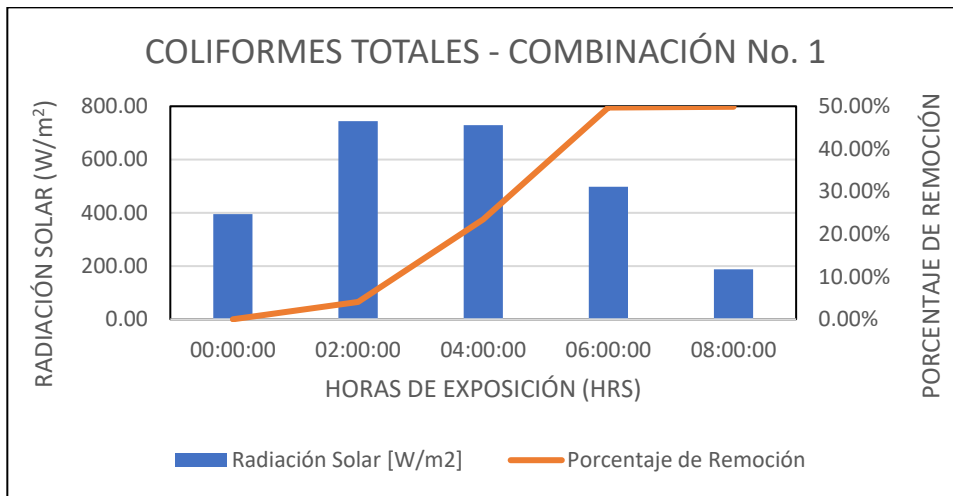
Como integración del análisis de cada uno de los parámetros del presente estudio especial, se determinó que la combinación de materiales que presenta mayor eficiencia para la desinfección de agua de lluvia y hace está última apta para consumo humano mediante la metodología UV – SODIS en cumplimiento con la Guía para la calidad de Agua para el Consumo Humano emitida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la combinación de los materiales de techo lámina y botella PET¹¹.

Como análisis adicional a lo mostrado en las páginas anteriores, se trazaron gráficas en donde se comparó el porcentaje de remoción de coliformes totales y fecales al transcurrir las horas de exposición, con la radiación solar presente en los mismos intervalos de tiempo y que fue la responsable de la inactivación microbiológica al estar ligada directamente con la temperatura del agua y siendo uno de los parámetros principales que influyen en la desinfección solar mediante la Metodología UV SODIS.

¹¹ Organización Mundial de la Salud (OMS). *Guías para la calidad del agua para consumo humano*. p.636.

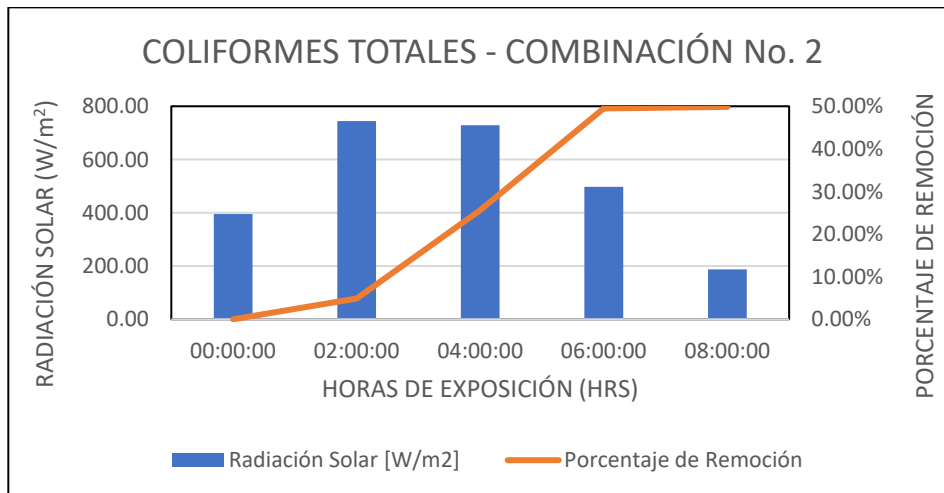
A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para cada una de las combinaciones de materiales analizadas en el experimento.

Figura 18. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 1**



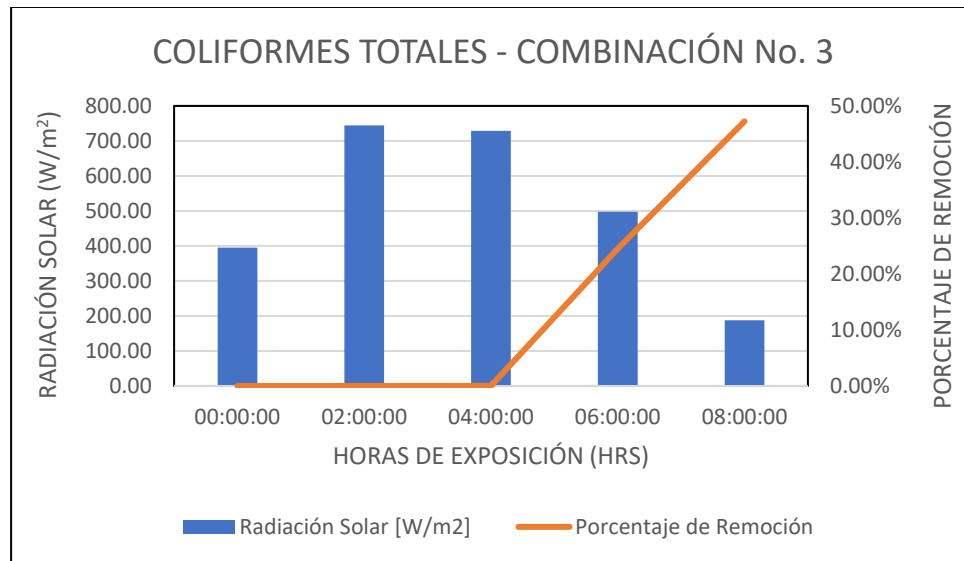
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 2**



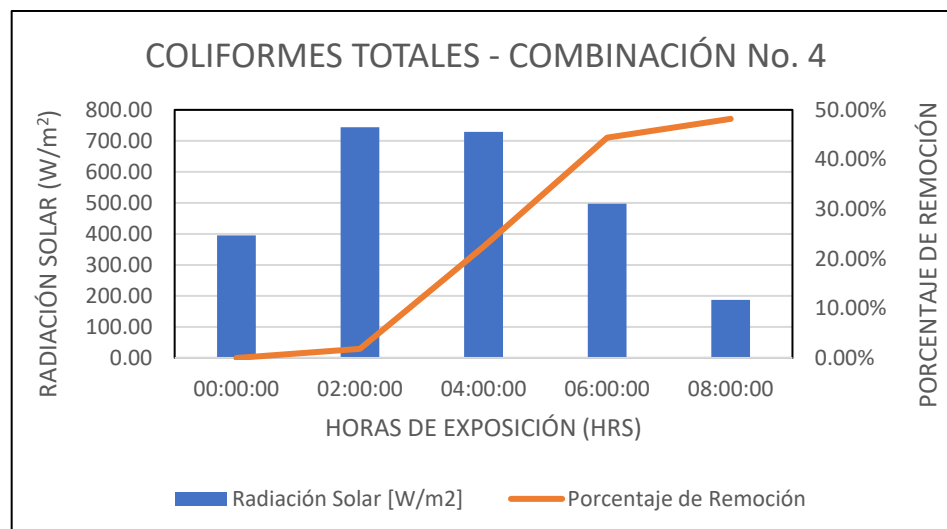
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 3**



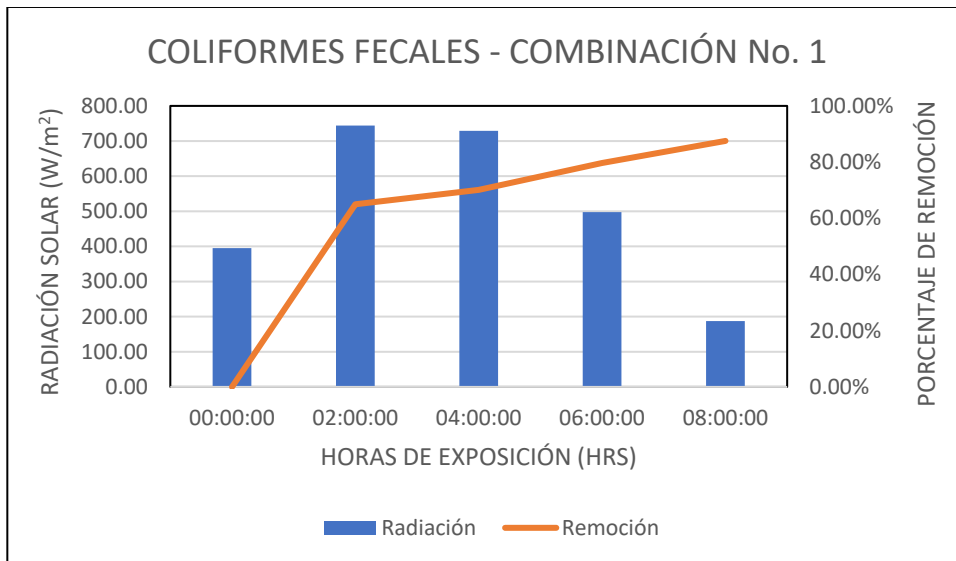
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 4**



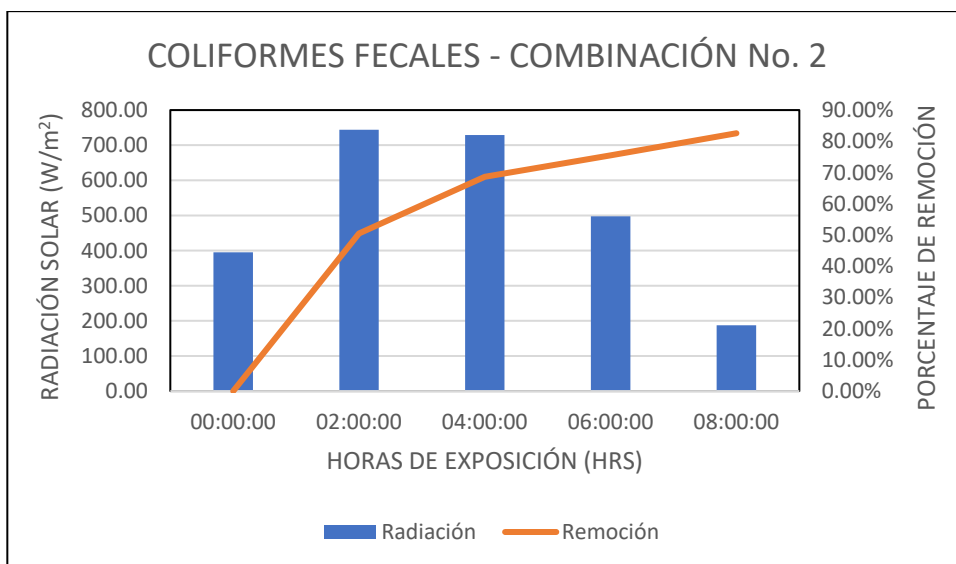
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 1**



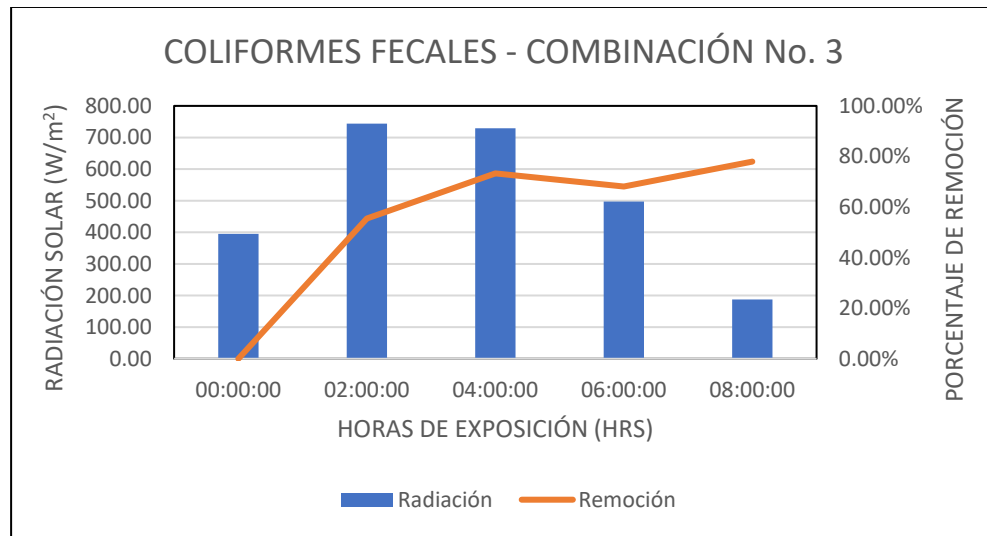
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 2**



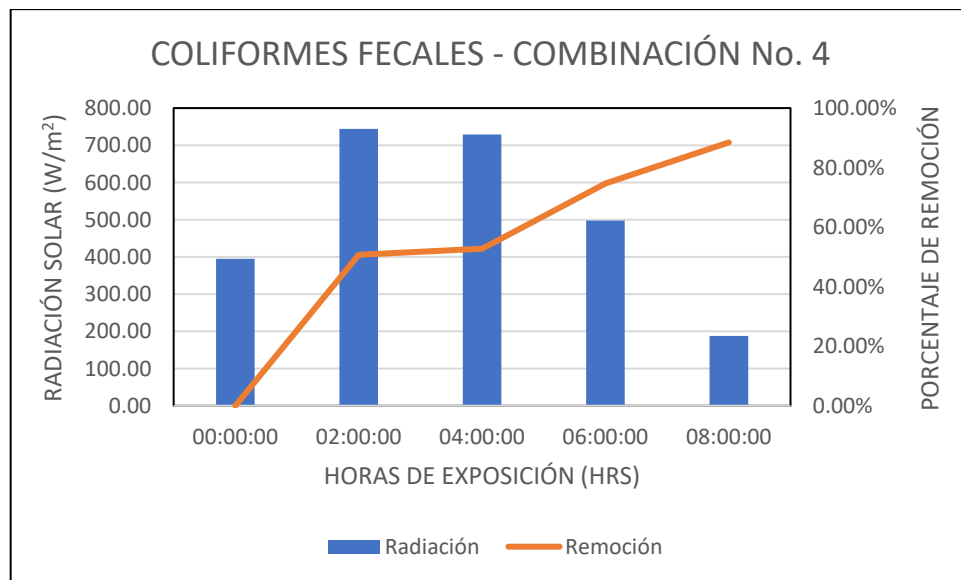
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 3**



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs. radiación solar para el tiempo de exposición transcurrido para combinación 4**



Fuente: elaboración propia.

De las gráficas anteriores se pudo determinar que el comportamiento del experimento a lo largo de tiempo de exposición fue normal, aumentando el porcentaje de remoción conforme transcurría el tiempo, además de que los mayores aumentos en dicho porcentaje se dieron en los intervalos de tiempo donde la radiación solar tuvo valores altos, reflejándose en la temperatura del agua al salir de la exposición, valores que fueron mostrados en el capítulo de resultados del presente estudio especial.

CONCLUSIONES

1. Con base en los resultados obtenidos, se rechaza la hipótesis planteada, ya que en un alto porcentaje de las muestras no se alcanzó dicha hipótesis.
2. Entre las principales características del agua de lluvia captada se puede encontrar una baja coloración y turbiedad con un rango de valores de 16 a 330 U Pt-Co y de 1.23 a 8.98 NTU respectivamente, en cuanto a conductividad y sólidos disueltos las concentraciones encontradas fueron bajas con rangos entre 20 a 100 $\mu\text{s/cm}$ y 10.4 a 52 mg/L , por último en términos del potencial de hidrogeno se determinó que es un agua acida con un rango de 3.9 a 6.3, lo que implica que no es apta para consumo humano.
3. Para el presente estudio el 50 % de los muestreos realizados mostraron resultados favorables en cuanto a la desinfección mediante la tecnología UV SODIS, mientras que el otro 50 % mostro una desinfección ineficiente o nula para las muestras analizadas, tanto para coliformes totales como coliformes fecales por lo que para el presente estudio especial la eficiencia de la metodología UV SODIS se considera como insuficiente para la desinfección de agua de lluvia para consumo humano.
4. En cuanto a la eficiencia de remoción de las combinaciones de materiales en cada intervalo de tiempo, se puede decir que la combinación que alcanzó los mejores resultados fue la combinación de techo de lámina y botella PET, seguida por la combinación de techo de lámina con botella de vidrio, dejando en tercera posición a la combinación de techo de teja con botella

de vidrio y como la que alcanzó los peores resultados la de techo de teja con botella PET.

5. La combinación de materiales más eficiente para la desinfección de agua de lluvia para consumo humano mediante la metodología UV SODIS es la combinación número 1, conformada por un techo de lámina y la utilización de botellas de PET como componentes de la metodología.

RECOMENDACIONES

1. Generar planes y programas de estudio de distintos tipos de fuentes de agua alternativas para consumo humano como lo es el agua de lluvia previo a la implementación de la metodología UV SODIS de desinfección, esto derivado a que, en los resultados del presente estudio especial, el tiempo de exposición solar no fue suficiente para tener un agua 100% segura, por lo que se recomienda generar programas de análisis de agua previo a implementar la Metodología UV SODIS en una determinada comunidad para verificar la aplicabilidad del mismo.
2. Implementar las superficies de exposición solar de lámina, ya que tal y como se muestra en los resultados del presente estudio especial, brinda buenos resultados en términos de desinfección de coliformes.
3. Socializar la captación de agua de lluvia para usos secundarios en zonas urbanas del país, debido a que tal y como se muestra en el presente estudio, no es apta para consumo humano por su acidez y su alta concentración de coliformes, ya que en dichas zonas cae lluvia conocida como “lluvia acida” debido a la contaminación atmosférica existente.
4. Tomar como base el presente estudio para comparar tiempos de exposición de mayor extensión para verificar la eficiencia y eficacia de UV SODIS para fuentes de agua con concentraciones de coliformes elevadas.
5. Replicar el presente estudio especial en distintas zonas del país, ya que debido la diversidad climática que existe en el país el comportamiento de los parámetros analizados y los resultados obtenidos podrían variar según el clima propio de cada región.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR MUÑOZ, Rolando David. *Captación de Agua de Lluvia (Almacenamiento y Calidad), por Medio de un Módulo Sanitario Familiar de Rápida Instalación*. Guatemala: Estudio Especial. USAC, ERIS. 2017. 9 p.
2. BRAGHET, Anne. *La Importancia de Tratamiento Domiciliar de Agua Potable*. Project Concern International (PCI), Agua para la salud (APS). Guatemala: PCI. 2017. 24 p.
3. Centro de tecnología asequible de agua y saneamiento. *Introducción al tratamiento del agua a nivel domiciliario y su almacenamiento seguro*. Calgary: CAWST. 2011. 24 p.
4. División de la Salud Pública de Carolina del Norte. *Hoja informativa sobre el agua de los Pozos #3 Los Coliformes Fecales*. Carolina del Norte: Editorial North Carolina Public Health (NCPH). 2009. 2 p.
5. Fundación SODIS. *Guía para la aplicación de la desinfección solar*. Lima: Fundación SODIS. 2003. 84 p.
6. GARCÍA-GIL, Ángela; PABLOS, Cristina; GARCÍA-MUÑOZ, Rafael; MCGUIGAN, Kevin, y MARUGÁN, Javier. *Selección de materiales y predicción de irradiancia solar en dispositivos plásticos para la aplicación de desinfección solar de agua (SODIS) para inactivar virus, bacterias y protozoos*. Guatemala: Ciencia del Medio Ambiente Total. 2020. 9 p.

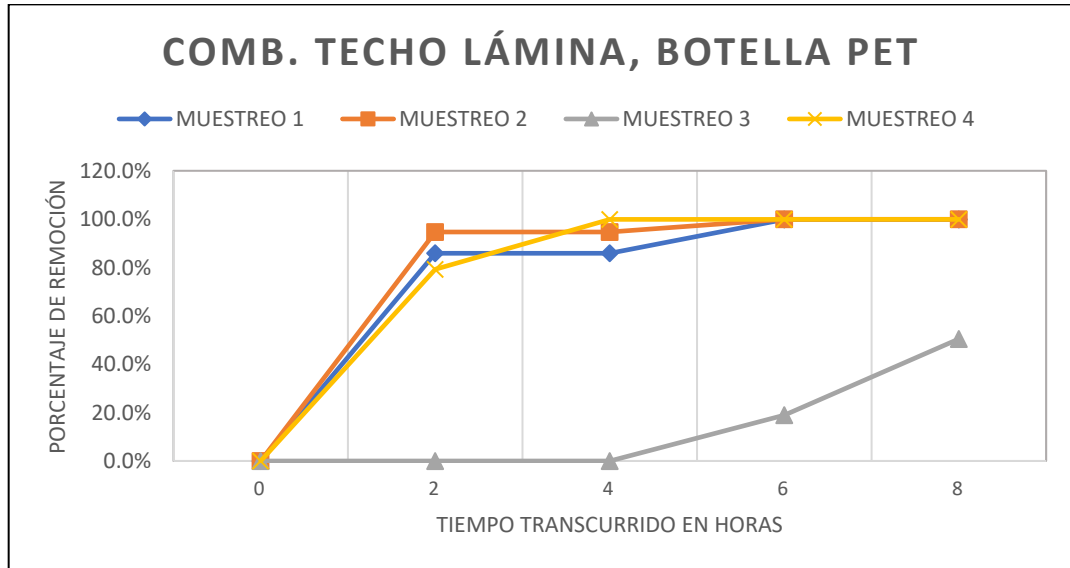
7. Google Earth. *Ubicación de la planta piloto Aurora II Ing. Arturo Pazos*. [en línea]. <<https://earth.google.com/web/@14.57821188,-90.53657636,1454.66758857a,291.06035257d,35y,-0h,0t,0r>> [Consulta 10 de noviembre de 2020].
8. Instituto Nacional de Estadística. *Compendio Estadístico Ambiental 2014*. (2015). Guatemala: Gobierno de Guatemala. 319 p.
9. _____. *Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI) 2014*. Guatemala: INE. 2015. 56 p.
10. LAWRIE, Katherine, MILLS, Andrew, FIGUEREDO-FERNÁNDEZ, Manuel, GUTIÉRREZ-ALFARO, Sergio, MANZANO, SALADIN, Mathias. *Dosimetría UV para desinfección solar de agua (SODIS) realizada en diferentes botellas y bolsas de plástico*. Guatemala: Sensores y Actuadores B: Chemical. 2014. 8 p.
11. LÓPEZ GONZÁLEZ, Rafael Augusto. *Aplicación del Método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales utilizadas para consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez, Guatemala*. Tesis de titulación para Químico Biólogo, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 85 p.
12. 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 y Canalitos de la planta potabilizadora "Santa Luisa" de la ciudad de Guate*. Guatemala: ERIS-USAC. 2002. 31 p.
13. NALWANGA, R., MUYANJA, C., MCGUIGAN, K., y QUILTY, B. *Un estudio de la calidad bacteriológica del agua de lluvia recolectada en los techos y una evaluación de SODIS como tecnología de*

tratamiento adecuada en las zonas rurales de África subsahariana.
Guatemala: Ingeniería Química Ambiental. 2016. 8 p.

14. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. París: UNESCO. 2019. 213 p.
15. Organización Mundial de la Salud (OMS). *Guías para la calidad del agua para consumo humano*. Ginebra: OMS. 2011. 636 p.
16. ORTIZ GUZMÁN, Oscar Fernando. *Línea base de calidad de agua del método SODIS en doce comunidades de Tacaná, Tajumulco y Sibinal*. Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 2008. 101 p.
17. PLANAS, O. *Radiación Solar*. [en línea]. <<https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/radiacion-solar>> [Consulta: 13 de mayo de 2015].
18. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Tratamiento de Aguas Residuales*. Colombia: Escuela colombiana de Ingeniería. 2004. 227 p.
19. SANTOS, Zenoch. *Manual de Prácticas de Laboratorio de Química*. Guatemala: ERIS USAC. 2020. 26 p.
20. VIVAR, M, FUENTES, M., CASTRO, J., y GARCÍA-PACHECO, R. *Efecto de los materiales habituales en tejados como base de apoyo para Desinfección solar (SODIS) en zonas rurales de climas templados*. Guatemala: ScienceDirect. 2015. 214 p.

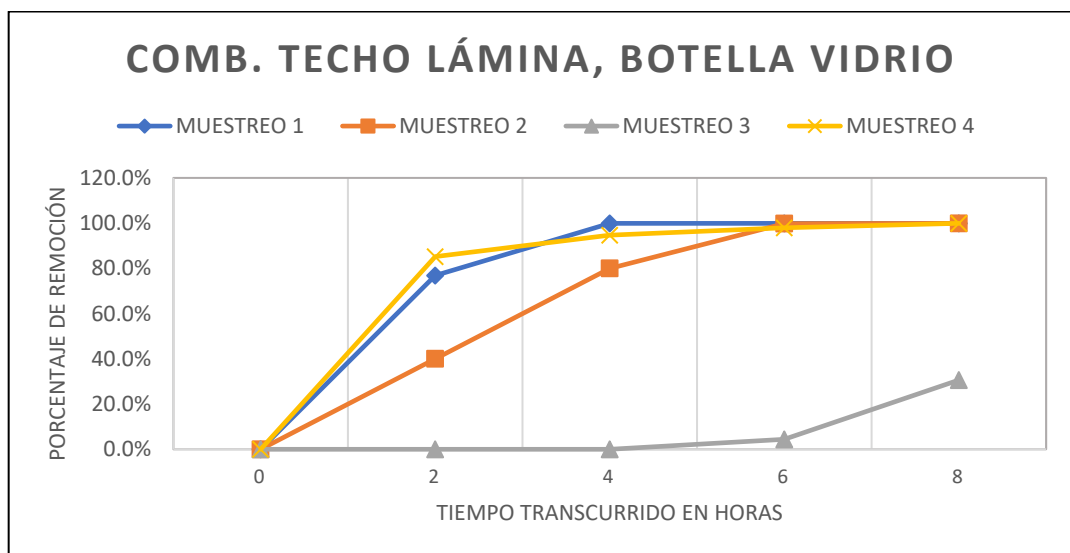
APÉNDICES

Apéndice 1. Comparación de los muestreos para la combinación de techo de lámina con botella PET



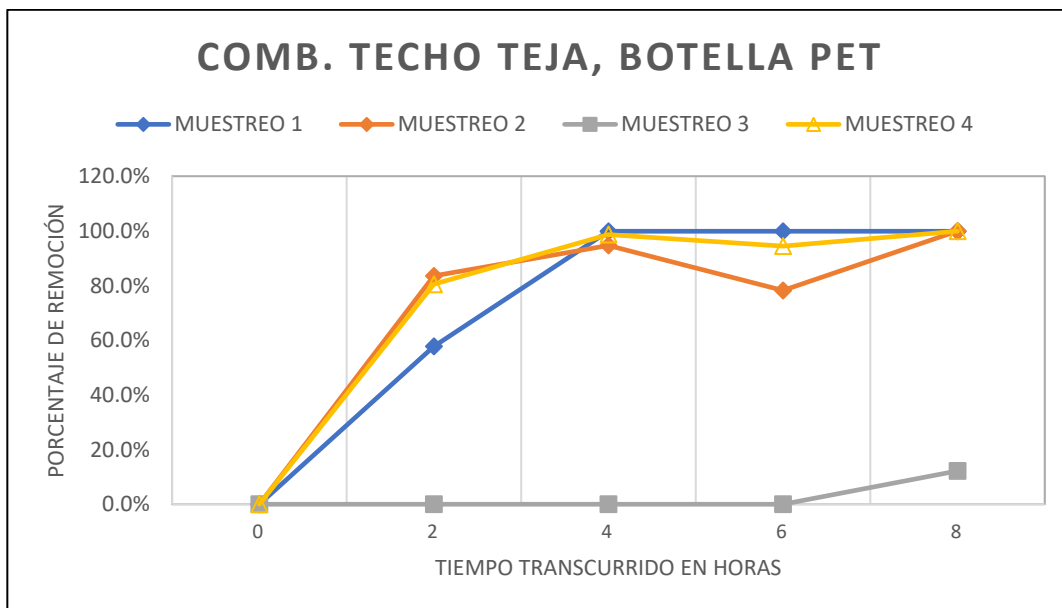
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Comparación de los muestreos para la combinación de techo de lámina con botella de vidrio



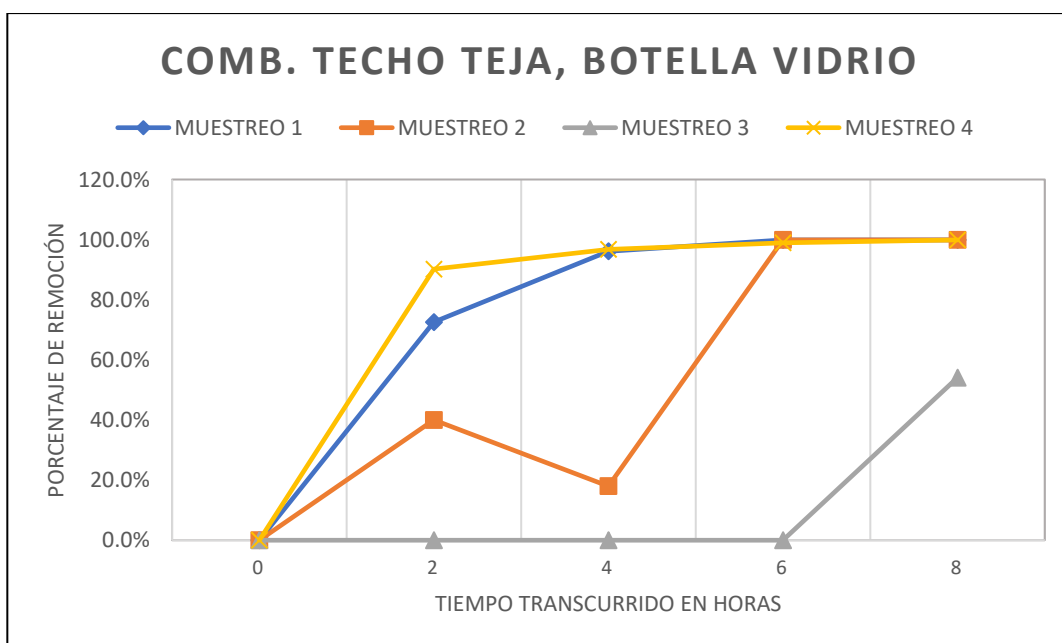
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Comparación de los muestreos para la combinación de techo de teja de barro con botella PET



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Comparación de los muestreos para la combinación de techo de teja de barro con botella de vidrio



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Fotografía de la rehabilitación del sistema de captación de agua de lluvia



Fuente: Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II “Ing. Arturo Pazos”

Apéndice 6. Fotografía del sistema de captación de agua de lluvia



Fuente: Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II “Ing. Arturo Pazos”

Apéndice 7. Fotografía de la construcción de la estructura de exposición solar utilizada



Fuente: Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II “Ing. Arturo Pazos”

Apéndice 8. Fotografía de la estructura de exposición solar utilizada



Fuente: Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II “Ing. Arturo Pazos”

Apéndice 9. **Fotografías de la exposición solar realizada**



Continuación apéndice 9.



Continuación apéndice 9.



Fuente: Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II “Ing. Arturo Pazos”

Apéndice 10. **Fotografía de los Insumos del Método Colilert**



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 11. Fotografía de la identificación de muestras



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"

Apéndice 12. Fotografía de la incubación de muestras



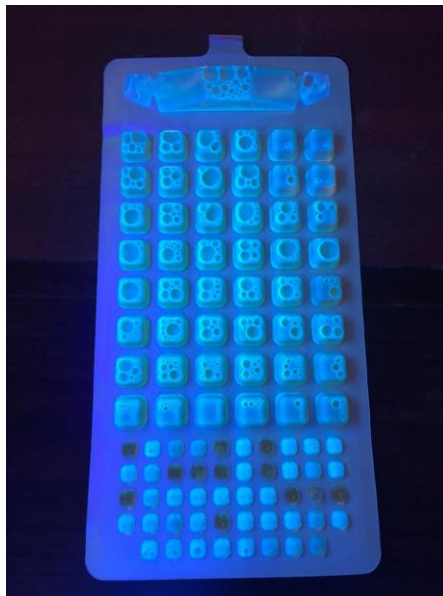
Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"

Apéndice 13. **Fotografía de la presencia de coliformes totales para el Método Collert**



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 14. **Fotografía de la presencia de coliformes fecales para el Método Collert**



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 15. Fotografía de muestra luego de una desinfección exitosa durante el experimento



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 16. Equipo utilizado para sellar las charolas del Método Colilert



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 17. Equipo utilizado para la determinación de la turbiedad de las muestras



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 18. Equipo utilizado para la determinación del color aparente de las muestras



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Apéndice 19. Equipo utilizado para la determinación de los parámetros medidos in situ de las muestras



Fuente: Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II “Ing. Arturo Pazos”

Apéndice 20. Investigador cuantificando coliformes fecales con el Método Colilert



Fuente: Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”