

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**REMOCIÓN DE COLIFORMES TOTALES APLICANDO LA
TÉCNICA DE FOTOSENSIBILIZACIÓN EN MUESTRAS
DE AGUA DE LA PLANTA DE BOMBEO CULATI.**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:

LISBET SÁNCHEZ GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS MANUEL GARCÍA LARA

ASESORES

DR. HUGO ALEJANDRO NÁJERA AGUILAR

DR. RUBÉN ALEJANDRO VÁZQUEZ SÁNCHEZ



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Junio de 2021

Dedicatoria

A mi yo del pasado por todas esas veces que me he reinventado y alcanzado cada propósito como este, tan feliz y orgullosa de mí porque este proyecto de investigación abre paso a mi camino como futura investigadora, cada capítulo escrito representan muchos retos correlacionados a nuevos aprendizajes, un cúmulo de emociones y noches de desvelos. No obstante, también le dedico a mis padres por guiarme e instruirme de una manera consciente.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi Dios y al maravilloso universo por cada aventura vivida y por la salud que me brinda para permitirme disfrutar el aquí y ahora. Por la sabiduría que me ha dado, por todo lo bueno y no tan bueno.

Por supuesto, a mis padres Francisco y Yolanda, que con su amor incondicional y sabiduría confiaron y me guiaron en cada uno de mis sueños, quienes me enseñaron a volar muy alto, los primeros que creyeron en mí cuando yo ni creía todo el potencial intelectual, emocional y físico que tengo. Valoro tanto el esfuerzo, todo su trabajo y tiempo en enseñarme, porque siempre me han recalcado lo orgullosos que están de mí y sobre todo por su inmenso amor.

De igual forma, recalco el apoyo de mis hermanos, Dulce, Francisco y Rodney, que como hermanos mayores supieron acobijar y proteger a su hermanita, encontrando en ellos un refugio y seguridad, asimismo por inspirarme a salir de mi zona de confort, encontrar en ellos la madurez, la paciencia, la alegría de la vida, el amor al trabajo de campo y el respeto a la naturaleza.

A mis sobrinos, Emily, Abner y Linet, quienes siempre me llenaron de amor y me exigían a darles una respuesta fundamentada ante las preguntas y curiosidades de nuestro universo, con la finalidad de que se entusiasmen con la ciencia.

Desde luego, a mi director de tesis, el Dr. Carlos Manuel García Lara quien también depositó su confianza en mí para desarrollar la presente investigación, por todo su tiempo, su paciencia, su conocimiento, por guiarme durante todo el proceso; le agradezco y reconozco también por su increíble labor como docente, director y persona, además por inspirarme a seguir en el camino de la investigación.

También al Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar y la Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez, quienes son unos excelentes docentes y personas, que con cada comentario construyeron mi ser.

Enormemente agradecida con las responsables del laboratorio de Ingeniería Ambiental, a Ing. Fabiola Velasco Ruiz, quien también me acompañó durante este proceso, por todas las recomendaciones y consejos aplicados en mi proyecto. A la Ing. Flor de Magali González Hilerio por su orientación, conocimientos y habilidades compartidas.

Al personal de la Planta de bombeo Culati en Chiapa de Corzo, quienes me facilitaron el acceso para tomar las muestras de agua las veces necesarias.

A la amistad, la hermandad y equipo de trabajo que construí con Emili, Lis, Karen, Xio, Kike y David, porque avanzamos juntos y me permitieron un espacio en su

corazón y en su casa, por lo momentos que nos hicieron hacer mejores personas, a Teresita, porque nos apoyamos y exigíamos mutuamente a lo largo del desarrollo de nuestra investigación, no obstante, estoy infinitamente agradecida con mis compañeros de grupo con los cuales también logramos formar una familia, compartiendo experiencias, conocimientos, viajes, sueños y mucho más.

A la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, al personal del Programa Educativo de Ingeniería Ambiental, por facilitar mi proceso de movilidad internacional estudiantil, por las actividades de campo, por los concursos académicos de los cuales muchos de ellos fui ganadora y por ceder un espacio para desarrollar mi tesis.

Y por último pero no menos importante agradezco a cada persona que ayudó a crecer en mi persona, en lo académico y en lo profesional, quienes me enseñaron lo que quiero ser y lo que no quiero ser, finalizo estos párrafos citando a Carl Sagan “en la vastedad del espacio y en la inmensidad del tiempo mi alegría es coincidir un planeta y una época contigo”.

Resumen

Las características microbianas del agua, están regidas por la población de microorganismos que alberga y que afectan de un modo importante a su calidad, algunos de estos organismos pueden dañar la salud humana dando lugar a las denominadas enfermedades hídricas (Marín, 2018). El estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de Coliformes totales en muestras de agua haciendo uso de la fotosensibilización con añil y azul de metileno como agentes sensibilizadores.

Se construyó un tren de tratamiento para la desinfección de agua proveniente de la planta de bombeo de Culati, posteriormente se registró lectura de los espectros de absorbancia de los fotosensibilizadores, de igual forma se midió el color del añil, el azul de metileno y una muestra del agua del Río Grijalva. Se realizaron dos tratamientos, en el primero se utilizó una concentración de 248.46 mg/ml con volumen de 12 litros, se irradió durante 75 minutos, la radiación solar promedio fue 533.75 W/m^2 y se tuvo un caudal de $2.66 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; en el segundo tratamiento se trabajó con 0.2 mg/ml de añil aplicado para 8 litros de agua colectada, se irradió durante 65 minutos con la radiación solar promedio de 741.18 W/m^2 y $2.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ como flujo volumétrico.

La reducción de Coliformes totales utilizando como fotosensibilizador el azul de metileno fue de 93.05%, mientras que con el añil se obtuvo una eficiencia de remoción del 85.41%. A pesar que el añil no tiene antecedentes de agente sensibilizador resultó ser eficiente para ser utilizado como junto con la técnica de fotosensibilización.

Índice general

Índice general	vi
Índice de tablas	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de gráficas	xiv
Listado de abreviaturas	xv
Glosario de términos.....	xvi
Normatividad aplicable	xviii
Norma Oficial Mexicana (NOM)	xviii
Norma mexicana (NMX).....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	5
CAPÍTULO II	1
Marco teórico.....	1
2.1. Calidad del agua	1
2.2. Principales microorganismos en el agua.....	1
2.2.1. Enfermedades transmitidas por el agua.....	3
2.3. Tratamientos del agua.....	5

2.3.1.	Filtración convencional.....	5
2.3.1.1.	Filtros de arena.....	5
2.3.1.2.	Filtros de carbón activado.....	6
2.3.2.	Laguna de estabilización.....	6
2.3.2.1.	Lagunas aireadas	6
2.3.3.	Humedales artificiales	7
2.3.4.	Procesos Avanzados de Oxidación (POAs).....	8
2.4.	Sistemas de desinfección.....	8
2.4.1.	Cloración.....	9
2.4.2.	Ozono	9
2.4.3.	Luz ultravioleta.....	9
2.4.4.	Procesos por membrana.....	10
2.4.4.1.	Microfiltración.....	10
2.4.4.2.	Ultrafiltración.....	10
2.4.4.3.	Nanofiltración.....	10
2.4.4.4.	Ósmosis inversa	10
2.5.	Normatividad aplicable.....	11
2.6.	Técnica de análisis.....	11
2.6.1.	Espectroscopia	11
2.6.2.	Espectroscopia UV-Visible.....	14
2.6.3.	Propiedades de la luz.....	16
2.6.3.1.	Dispersión.....	16
2.6.3.2.	Color	17
2.6.3.3.	Transmitancia y absorbancia	18
2.6.4.	Ley de Beer-Lambert	19
2.6.5.	Instrumentación espectrométrica	20
2.7.	Colorantes.....	21
2.7.1.	Colorantes naturales.....	21
2.7.1.1.	Añil.....	21
2.7.2.	Colorantes artificiales.....	22
2.7.2.1.	Azul de metileno	22
2.8.	Terapia fotodinámica.....	24

2.8.1.	Fotogeneración de oxígeno singulete	25
2.8.1.1.	Formas de oxidación del oxígeno singulete.....	26
2.8.1.2.	Ruta fotoquímica del azul de metileno	26
2.9.	Antecedentes	28
2.9.1.	Terapia fotodinámica en la medicina.....	28
2.9.2.	Terapia fotodinámica en tratamiento de aguas	28
CAPÍTULO III	30
3.1	Objetivos	30
3.1.1	Objetivo general.....	30
3.1.2	Objetivos específicos	30
3.2	Hipótesis	30
CAPÍTULO IV	31
4.1.	Metodología.....	31
4.1.1.	Selección del área de estudio	31
4.1.2.	Tren de tratamiento.....	32
4.1.3.	Análisis de variables del tren de tratamiento.....	34
4.1.4.	Preparación de solución.....	34
4.1.5.	Medición por espectroscopia	37
4.1.6.	Muestreo	39
4.1.7.	Parámetros evaluados	39
4.1.8.	Evaluación económica del sistema	39
CAPÍTULO V	40
5.1	Resultados	40
5.1.1	Análisis de variables	40
5.1.2	Preparación de solución y medición por espectroscopia	41
5.1.3.	Análisis microbiológico.....	51
CAPÍTULO VI	53
6.1.	Discusión de resultados	53
6.2.	Conclusiones.....	57

6.3. Recomendaciones.....	59
Referencias	60
Anexos	70
Anexo 1. Eficiencia de cloración por municipio	70
Anexo 2. Mortalidad por enfermedades diarreicas.....	71
Anexo 3. Diferencias entre los tratamientos convencionales para el agua.	72
Anexo 4. Fotografías de evidencia.....	74
Anexo 5. Tabla de costo de materiales e insumos para el sistema de desinfección.	79
Anexo 6. Evidencia fotográfica de la aplicación del tratamiento.....	81

Índice de tablas

Tabla 1. Agentes patógenos transmitidos en el agua y su importancia en los sistemas de abastecimiento de agua.	2
Tabla 2. Enfermedades infecciosas más comunes ocasionadas por bacterias.....	3
Tabla 3. Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	5
Tabla 4. Comparación de los sistemas naturales y sistemas convencionales.	8
Tabla 5. Normatividad aplicable	11
Tabla 6. Tipos de transiciones de energía en cada región de espectro electromagnético.	13
Tabla 7. Concentraciones propuestas de azul de metileno.....	35
Tabla 8. Concentraciones obtenidas de azul de metileno.	36
Tabla 9. Concentraciones de añil	37
Tabla 10. Resultado del análisis microbiológico agua antes y después del tratamiento con AM.	52
Tabla 11. Resultado del análisis microbiológico agua antes y después del tratamiento con añil.	52
Tabla 12. Tecnologías convencionales de potabilización de agua y sus limitaciones.	72
Tabla 13. Comparación de los diferentes métodos de desinfección.	73
Tabla 14. . Etiqueta para las muestras de agua colectadas.....	78
Tabla 15. Costo de inversión para el sistema de desinfección utilizando la técnica de fotosensibilización.	79

Índice de figuras

Fig. 1. Humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial. Fuente: Morató, 2006	7
Fig. 2. Espectro electromagnético de la región de la luz visible. Fuente: Walker, 2008	12
Fig. 3. Movimiento ondulatorio de la radiación electromagnética. Fuente Christian, 2009	12
Fig. 4. Sensibilidad relativa del ojo humano a ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda.	14
Fig. 5. Proceso de excitación de la energía en una molécula. Fuente:	15
Fig. 6. Estado de excitación de los electrones. Fuente:	15
Fig. 7. Dispersión de la luz blanca mediante un prisma. Fuente: Serway & Vuille, 2012.	16
Fig. 8. Refracción de la luz solar por una gota de lluvia esférica. Fuente: Serway & Vuille, 2012.	17
Fig. 9. Transmisión y percepción del color en el ojo humano. Fuente: Owen, 1996.	17
Fig. 10. Absorbancia y colores complementarios. Fuente: Owen, 1996	18
Fig. 11. Longitud de onda incidiendo en un compuesto químico (absorbancia). Fuente: Vanegas & Fonseca 2012.	19
Fig. 12. Absorción de la radiación. Fuente: Christian, 2009.	19
Fig. 13. Diagrama de bloques de un espectrómetro. Fuente: Gary, 2009.	21
Fig. 14. Colorante orgánico (añil) secado. Fuente: Ricoy, 2020.	22
Fig. 15. Proceso de secado de añil. Fuente: Ricoy, 2020.	22
Fig. 16. Estructura química del Azul de metileno (AM). Fuente: Anaya, 2012.	23
Fig. 17. Estructura tridimensional del AM. Fuente Anaya, 2012.	23

Fig. 18. Principales características del AM. Fuente: Anaya, 2012.....	23
Fig. 19. Mecanismo del proceso de fotosensibilización para la fotogeneración de oxígeno singulete. Fuente: Jiménez, 2010.....	25
Fig. 20. Ruta fotoquímica del AM. Fuente: Tardivo et al., modificado por Sabbahi <i>et al.</i> , 2010.....	27
Fig. 21. Desinfección solar de efluentes domésticos. Fuente: Orellana, 2005.	29
Fig. 22. Ubicación del área de estudio para la recolección de muestras de agua en pozos de abastecimiento. Fuente: Google Earth.....	31
Fig. 23. Esquema del tren de tratamiento para desinfección de agua.....	33
Fig. 24. Espectrómetro de fibra óptica Ocean Optics USB4000.....	38
Fig. 25. Collage de las concentraciones de azul de metileno.....	42
Fig. 26. Medición de absorbancia del blanco.	43
Fig. 27. Gránulos y/o partículas de añil.	46
Fig. 28. Solución del añil con residuos del colorante.....	46
Fig. 29. Collage de las concentraciones del añil.	48
Fig. 30. Eficiencia de cloración en el municipio de Chiapa de Corzo en el 2018. Fuente: COFEPRIS, SINA (2018).	70
Fig. 31. Eficiencia de cloración en el municipio de Chiapa de Corzo en el 2019. Fuente: COFEPRIS, SINA (2019).	70
Fig. 32. Mortalidad por enfermedades diarreicas (2004-2018) Fuente: Secretaría de Salud (2018) Sistema Nacional de Información de Agua (SINA).	71
Fig. 33. Evaluación de las variables (temperatura, volumen, tiempo) del tren de tratamiento.	74
Fig. 34. Diferentes masas de añil respectivamente pesadas.	75
Fig. 35. Cubeta de plástico con agua destilada utilizada como blanco.	75

Fig. 36. Medición de absorbancia de la solución de AM con una concentración de 10 mg/ml.....	76
Fig. 37. Medición de espectro de absorbancia de añil.	76
Fig. 38. Colecta y toma de temperatura del agua de la Planta de Bombeo Culati, Chiapa de Corzo.	77
Fig. 39. Colecta de la muestra de agua para posterior análisis microbiológico en la Planta de Bombeo Culati, Chiapa de Corzo.	77
Fig. 40. Muestra colectada de la salida del tren de tratamiento.	78
Fig. 41. Primer tratamiento utilizando como agente sensibilizador el azul de metileno.....	81
Fig. 42. Segundo tratamiento utilizando como agente sensibilizador el añil.....	82
Fig. 43. Sólidos sedimentados en el bidón 1, después del tratamiento.....	82

Índice de gráficas

Gráfica 1. Cobertura de agua potable y tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de cinco años, 1990 a 2015. Fuente: INEGI (2010), INEGI (2015).....	4
Gráfica 2. Comportamiento de las variables del tren de tratamiento del día 17 y 18 de marzo de 2020.	41
Gráfica 3. Longitudes de onda de las diferentes concentraciones de AM.	44
Gráfica 4. Curva de calibración de absorbancia (625 nm) del AM.	45
Gráfica 5. Longitudes de onda de las diferentes concentraciones de añil.....	49
Gráfica 6. Curva de calibración de absorbancia (625 nm) del añil.	50
Gráfica 7. . Diagrama de cromaticidad del AM, Añil, Blanco y muestra de agua del Río Grijalva (RG).....	51

Listado de abreviaturas

AM: Azul de metileno
UFC: Unidad Formadora de Colonias
COFEPRIS: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios
CONAGUA: Comisión Nacional del Agua
CONAPO: Consejo Nacional de Población
DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días
DQO: Demanda Química de Oxígeno
HpD: derivado de hematoporfirina
INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LED: Light Emitter Diode (Diodo Emisor de Luz)
NIH: National Cancer Institute (Instituto Nacional de Cáncer)
NOM: Norma Oficial Mexicana
NMX: Norma mexicana
NMP: Número Más Probable
O₂: Oxígeno singulete
OD: Oxígeno Disuelto
OMS: Organización Mundial de la Salud
nm: Nanómetro
PDE: Plan Estatal de Desarrollo
PDI: Inactivación fotodinámica
PDT: Photodynamic therapy (Terapia fotodinámica)
PS: Fotosensibilizador
PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
ROS: Reactive Oxygen Species (Especies reactivas de Oxígeno)
SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente
SMN: Servicio Meteorológico Nacional
SINA: Sistema Nacional de Información del Agua
SST: Sólidos Suspendidos Totales
SUAVE: Sistema Único Automatizado para la Vigilancia Epidemiológica

Glosario de términos

Agua potable, aquella cuyo uso y consumo no causa efectos nocivos al ser humano.

Agua purificada, aquella que ha sido sometida a tratamiento fisicoquímico, apta para consumo humano.

Añil: Pasta colorante de color azul oscuro y violeta que se extrae de los tallos y hojas compuestas, flores rojizas, agrupadas en racimos o espigas, y fruto en vaina arqueada con granillos lustrosos, de color pardusco, verdoso o gris, y muy duros.

Azul de metileno: Su nombre científico Cloruro de Metiltionina; es un tinte o colorante.

Agente sensibilizador o fotosensibilizador: Colorante que es su estado excitado es capaz de ceder o transferir su exceso de energía a otra molécula presente en el medio circundante, obteniéndose un estado excitado de la misma.

Calidad del agua: Es una medida de las propiedades físicas, químicas y biológicas del líquido que resulta fundamental conocer para poder aprovechar adecuadamente y de forma segura el líquido.

Coliformes totales: Organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35° C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 h.

Coliformes termotolerantes: Organismos coliformes los cuales tienen las mismas propiedades fermentativas en un periodo de 24 h a 44,5 °C ± 0,2 °C.

Desinfección: Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

Espectro electromagnético: Intervalo de ondas electromagnéticas cuya frecuencia va desde las ondas de radio hasta los rayos gamma

Fotosensibilización: Proceso en el cual se transfiere la energía de excitación electrónica de una molécula a otra.

Límite permisible: Concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

Oxígeno singulete: El término oxígeno singulete se refiere habitualmente solo al estado Δg .

Onda electromagnética: Onda portadora de energía emitida por una carga eléctrica vibratoria (frecuentemente electrones), formada por campos eléctricos y magnéticos que oscilan y se regeneran entre sí.

Potabilización: Conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano.

Sistema de abastecimiento: Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

Terapia fotodinámica: Consiste en el uso de un tinte fotoactivador al cual se lo llama Fotosensibilizador o Sustancia Fotosensibilizadora, el cual actúa cuando es expuesto a la luz de una longitud de onda específica en presencia de oxígeno; la cual puede eliminar a microorganismos patógenos de infecciones localizadas.

Normatividad aplicable

Norma Oficial Mexicana (NOM)

NOM-127-SSA1-994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Norma mexicana (NMX)

NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua – Enumeración de organismos Coliformes totales y Coliformes fecales (Termotolerantes) y *Escherichia coli* – Método del Número Más Probable en tubos múltiples.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

La contaminación de los cuerpos naturales de agua es una problemática que se presenta en la actualidad principalmente en los países en vías de desarrollo (Larrea *et al.*, 2013), esta puede ser de manera natural o por actividades antropogénicas; el primero, por lo general son en bajas concentraciones, mientras que el segundo, destacan los vertidos de aguas residuales urbanas y agrícolas (García, 2009). Dentro de las principales fuentes de contaminación del agua, también se consideran los residuos que se arrojan a los sistemas de alcantarillado, así como ríos y lagos (Arreguín *et al.*, 2010).

La presencia o aumento de bacterias, parásitos, virus y hongos en el agua surge usualmente por efecto directo o indirecto de cambios en el medio ambiente y cambios relacionados con las actividades antropogénicas, que se ven reflejadas en nuestro entorno (Ríos *et al.*, 2017). Si bien, las aguas superficiales están expuestas a una amplia variedad de factores que alteran su calidad con diferentes niveles de intensidad (Robert, 2014), de manera que este líquido en algunas ocasiones se convierte en un vehículo transportador de microorganismos causantes de enfermedades en humanos y en otros animales que suelen afectar el aparato digestivo (Jiménez, 2010). Desde luego, cuando se presenta la contaminación del agua incide en la reducción la disponibilidad inmediata del líquido (SEMARNAT, 2012).

Se considera que el agua salubre y fácilmente accesible es importante para la salud pública, ya sea que se utilice para beber, para uso doméstico, para producir alimentos o para fines recreativos (OMS, 2019). Así pues, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2012) menciona que para evitar los problemas de salud a la población, se procura que el agua suministrada se someta a procesos de desinfección y/o potabilización que le garanticen las características adecuadas; por lo tanto, se requiere contar con tecnologías eficientes y de bajo costo para cumplir con los estándares requeridos (Casierra *et al.*, 2016).

Existen diferentes tecnologías que van desde lo tradicional, los cuales incluyen principalmente sistemas biológicos y fisicoquímicos, siendo los primeros de menor costo en operación y mantenimiento (Casierra *et al.*, 2016). Las nuevas tecnologías de tratamiento incluyen Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TOA) que se definen

por procesos fotocatalíticos que se basa por una energía de determinada longitud de onda (Anaya, 2012), capaz de excitar a un material semiconductor para producir especies fuertemente oxidantes a partir del agua adsorbida ($\text{OH}\bullet$) los cuales son capaces de degradar la práctica totalidad de posibles contaminantes en el agua (Orellana *et al.*, 2011).

Por otro lado, la desinfección es una etapa del proceso del tratamiento de aguas, consiste en tratamientos químicos, cuyo objetivo es la inactivación de microorganismos patógenos para minimizar el riesgo de enfermedades (Orellana *et al.*, 2011). En particular, los procesos de desinfección del agua basados en la fotosensibilización, los cuales se caracterizan por utilizar sensibilizadores cuya iluminación con luz UV o visible, se conoce por su eficiencia en la inactivación bacteriana (Orellana *et al.*, 2011). Dicho tratamiento, es utilizado en la fotoquímica para la generación de oxígeno singulete mediante energía solar permite el desarrollo de nuevas tecnologías fotoquímicas limpias y basadas en energías renovables, aplicables a la desinfección de aguas (García, 2010). Así por ejemplo, cuando se irradian con luz visible, diversos colorantes como el azul de metileno muestra efectos citotóxicos mediados por O_2 sobre gran variedad de patógenos (Orellana *et al.*, 2011). Sin embargo, dentro de las limitantes de este tipo de tratamiento se puede presentar una desactivación del oxígeno singulete por el medio o ya sea por el propio fotosensibilizador (García, 2005).

Es un hecho que cada vez se presentan alternativas innovadoras para la desinfección del agua, mismas que se ajustan en la medida posible de acuerdo a las necesidades y recursos de la zona en donde se utilicen; en este sentido la implementación de un tren de tratamiento para la desinfección basado por procesos fisicoquímicos aplicado para aguas superficiales con la técnica de fotosensibilización, con la finalidad de evaluar la eficiencia de remoción conforme al parámetro de Coliformes totales por su efectividad fundamentada y comprobada en el proceso de desinfección del agua

1.2. Planteamiento del problema

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera el agua contaminada como una alteración con respecto a uno o varios parámetros físicos, químicos y/o biológicos, conforme a su estado natural. Asimismo, afirma que en el mundo, al menos 2000 millones de personas se abastecen de una fuente de agua potable que está contaminada por heces (OMS, 2019). La presencia de microorganismos patógenos en el agua, disminuyen la capacidad de ser apta para uso y/o consumo humano. Por su parte, los Coliformes Totales son un grupo amplio de bacterias que en mucho de los casos resultan estar en algunas fuentes de abastecimiento de agua potable, perjudicando la salud humana.

Existen diferentes tipos de tratamiento no convencionales, como filtración convencional, desinfección para el agua, filtración por membrana; sin embargo, se presentan limitantes, como es el costo de operación y mantenimiento, la generación de subproductos, entre otras limitantes (Leal, 2005). Por otro lado, aunque la cloración es efectiva para la inactivación de bacterias y virus, no obstante, la formación durante la desinfección de productos potencialmente tóxicos y cancerígenos es un aspecto preocupante (Orellana *et al.*, 2011).

El Instituto Estatal del Agua del Estado de Chiapas (INESA) señala que solamente el 70% de la población no tiene acceso a agua potable, mientras que el 26% de las viviendas cuenta con agua entubada (2013). Incluso en el 2019, el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) reportó al estado de Chiapas con una eficiencia de cloración de 66.62%, de los 31 estados siendo este el de menor eficiencia. En particular, el municipio de Chiapa de Corzo en el 2018 registró una eficiencia de 38.19% (Fig. 30, ver anexo 1), sin embargo para el 2019 dicha eficiencia se redujo a 27.19% (Fig. 31, ver anexo 1).

Por otra parte, la morbilidad en Chiapas presenta una composición diferenciada según grupos poblacionales y ubicación urbana o rural; de acuerdo con el Sistema Único Automatizado para la Vigilancia Epidemiológica (SUAVE), de las veinte principales causas de morbilidad en la entidad, las enfermedades intestinales ocupan el segundo lugar con una tasa de 3,398.26 de cada 100,000 habitantes. Mientras que la tasa de mortalidad en el estado es de 10.60 por cada 100,000 habitantes, de forma que se posiciona en el lugar número 10 de las veinte principales enfermedades (Trujillo, García, Orantes, Cuesy, 2014).

Asimismo, en Chiapas la tasa de mortalidad por cada 100 mil menores de 5 años en el 2018 es el 23.92% (Fig. 32, ver anexo 2; SINA; COFEPRIS, 2018). De manera que autores como Trujillo *et al.*, consideran que los grupos más vulnerables son los menores de un año de edad (2014).

La falta de garantías en la seguridad del recurso hídrico hace que la comunidad quede expuesta al riesgo de brotes de enfermedades relacionadas con el agua (Ríos *et al.*, 2017). Otros autores como, Villén, Manjón, García & Orellana (2006) señalan que las enfermedades transmitidas por el agua, están asociadas con la falta de mejoras en el suministro de agua doméstica y un saneamiento adecuado.

La CONAGUA (2018) afirma que existe una relación inversa entre la cobertura de agua potable y la tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas, de manera que autores como Robert (2014) señala en su investigación acerca de los microorganismos indicadores de calidad de agua potable, en donde el principal riesgo de contaminación del agua en la red de distribución es la contaminación con materia fecal por infiltraciones y debido a la presencia de sedimentos en el fondo de las tuberías que favorecen la colonización de microorganismos.

Por último, de acuerdo a lo mencionado en los párrafos anteriores, se considera como alternativa la combinación de luz solar y un fotosensibilizador como opción prometedora para áreas con infraestructura insuficiente pero con varias horas de radiación solar (Orellana *et al.*, 2011), de tal manera que se garantice la calidad del agua.

1.3. Justificación

Datos sobre la distribución del agua en México, indican que el 71% le corresponde al uso agrícola, mientras que el 14% para abastecimiento público, 5% para generación de energía por medio de termoeléctricas y 4% para la industria, pero, la distribución temporal, la distribución espacial de la precipitación y la distribución de la población limitan el aprovechamiento adecuado de este recurso (*Arreguín, et al., 2010*)

En Chiapas, el 51% de la población vive en áreas donde el acceso a servicios básicos es limitado (CONAPO, 2015). El Plan Estatal de Desarrollo (PDE) 2019-2024 menciona que de acuerdo a la Encuesta Intercensal 2015 del INEGI muestra que 87.2% de viviendas particulares cuentan con servicio de agua entubada. Sin embargo, aún existe un rezago de más de 156,000 viviendas, sobre todo en localidades dispersas en zonas geográficas irregulares, que ubica a la entidad por debajo de la media nacional.

En particular, la problemática de acceso a fuentes de agua con la calidad y disponibilidad adecuada para abastecimiento humano es un tema de vital importancia tanto para las autoridades como para la sociedad en general (CARE, 2012 citado por Faviel *et al., 2019*)

Por otra parte, el agua en ocasiones puede ser un vehículo transportador de microorganismos causantes de enfermedades en humanos y en otros animales que suelen afectar al aparato digestivo (Jiménez, 2010), los cuales constituyen un problema mundial que demanda un urgente control. La contaminación microbiológica es responsable de más del 90% de las intoxicaciones y transmisión de enfermedades por el agua (Robert, 2014). Así pues, los indicadores de contaminación fecal más utilizados son los Coliformes totales y termotolerantes, *Escherichia coli* y *enterococos* (Larrea *et al., 2013*). Por su parte, los Coliformes totales se encuentran en grandes cantidades en el ambiente (fuentes de agua, vegetación y suelos; Robert, 2014).

Desde luego, la contaminación del agua es uno de los temas más estudiados para dar soluciones a las diferentes afectaciones, por ende existen diversos tratamientos para este líquido, tratamientos que la hacen apta para uso y/o consumo humano.

Si bien, en los sistemas seguros de distribución de agua para el consumo humano, el agua natural de origen superficial debe someterse a tratamientos de desinfección (Jiménez, 2010). La etapa de desinfección es esencial para la remoción de microorganismos patógenos, aunque ya existen diversos tratamientos y/o técnicas, sin embargo, debido al costo de mantenimiento y operación de los métodos, los hacen menos factibles para adquirirlos y aplicarlos, principalmente en zonas rurales

o en lugares donde no cuenten con una planta de tratamiento de agua (Mehdi *et al.*, 2013).

Entre los métodos químicos de desinfección, la adición de cloro es eficaz para la inactivación de virus y bacterias; sin embargo, la formación de productos secundarios potencialmente tóxicos o cancerígenos supone un importante inconveniente (Jiménez, 2010). Además, la fabricación de cloro y sus derivados, así como su almacenaje, transporte y uso plantea una amenaza continua para los productores, los operarios y para el medio ambiente (Orellana *et al.*, 2011). Por otro lado, los métodos de filtración por membranas son de manejo más complicado, con costos elevados y eficiencias altas (Tabla 12, ver anexo 3; Leal, 2005).

En comparación con otras técnicas de desinfección utilizadas en áreas urbanas a gran escala, que requieren grandes plantas de tratamiento con altos costos (Tabla 13, ver anexo 3), agentes reactivos tóxicos y personal capacitado; por su parte la tecnología basada en oxígeno singulete para la desinfección del agua en zonas rurales aisladas donde los gastos operativos deben ser necesariamente bajos (Jiménez *et al.*, 2006)

Por ende, se plantea que esta técnica de menor costo en la cual se construyó un tren de tratamiento para la desinfección del agua, utilizando la técnica de fotosensibilización; por otro lado, se comprobó la eficiencia que ofrece dicho sistema, en términos de factibilidad, costo, porcentaje de remoción de Coliformes totales, de manera que se garantice la calidad del agua para satisfacer las necesidades de acuerdo al uso que se le dé a este vital líquido.

Cabe mencionar, que la selección del lugar para la colecta de muestras de agua tiene antecedentes en el *“Estudio preliminar de la calidad del agua en pozos localizados en el tramo comprendido entre C.H Belisario Domínguez y la C.H. Manuel Moreno Torres”* de acuerdo a los resultados que la autora obtuvo específicamente en el parámetro de Coliformes totales, en donde los valores finales en época de estiaje y lluvias estuvieron por encima del límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994.

CAPÍTULO II

Marco teórico

2.1. Calidad del agua

Con sus múltiples usos para beber, recreación, saneamiento, higiene e industria, el agua es nuestro recurso mundial más valioso (Centers for Disease Control and Prevention, CDC, 2019). Puesto que, la calidad biológica de las aguas es un modo de definir la riqueza biológica y el valor ambiental de las comunidades de seres vivos asociados al ecosistema de un curso fluvial, o de un tramo concreto de él (Larrea *et al.*, 2013). Así pues, la OMS (2017) considera que la salubridad y la calidad del agua son fundamentales para el desarrollo y el bienestar humanos.

Si bien, la calidad del agua es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o cualquier propósito (SINA, 2018), No obstante, el agua potable se define como “adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal”, es libre de microorganismos causantes de enfermedades (Ríos *et al.*, 2017) y, se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad (CONAGUA & SEMARNAT, 2018), de manera para que haya sistemas seguros de distribución de agua para el consumo humano, el agua natural de origen superficial debe someterse a tratamientos de desinfección (Jiménez, 2010).

2.2. Principales microorganismos en el agua

Según la OMS existen diversos agentes patógenos que pueden transmitirse por el agua de consumo contaminada, de igual forma la gama de patógenos cambia en función de factores variables como el aumento de las poblaciones de personas y animales (2019). Además, consumir agua en mal estado es una de las principales fuentes de infección y la causa de diversas enfermedades gastrointestinales (Morató *et al.*, 2006).

Estudios mencionan que incluso durante el proceso de abastecimiento del agua, pueden surgir causas que predisponen el ingreso y multiplicación de microorganismos a partir de distintas fuentes como: las conexiones cruzadas, rotura de las tuberías, cámaras de bombeo, reservorios de distribución e irregular mantenimiento de estas instalaciones (Robert, 2014); por ejemplo, especies de

géneros *Enterobacter* y *klebsiella* colonizan superficies de tuberías de agua y tanques de almacenamiento que forman biopelículas en presencia de nutrientes. Dentro de las bacterias que se encuentran presentes en el agua, las que provienen del tracto gastrointestinal se asocian con contaminación fecal (Ríos et al., 2017).

Tabla 1. Agentes patógenos transmitidos en el agua y su importancia en los sistemas de abastecimiento de agua.

Agente patógeno	Importancia para la salud	Persistencia en los sistemas de abastecimiento de agua	Resistencia al cloro
Bacterias			
<i>Escherichia coli</i> patógena	Alta	Moderada	Baja
<i>Pseudomonas aeruginosae</i>	Moderada	Puede proliferar	Moderada
<i>Salmonella typhi</i>	Alta	Moderada	Baja
<i>Shigella spp.</i>	Alta	Puede proliferar	Baja
<i>Vibrio cholerae</i>	Alta	Corta	Baja
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Alta	Corta	Baja
Virus			
Virus de la hepatitis A	Alta	Larga	Moderada
Rotavirus	Alta	Larga	Moderada
Helmintos			
<i>Dracunculus medinensis</i>	Alta	Moderada	Moderada
<i>Schistosoma spp.</i>	Alta	Corta	Moderada

Fuente: OMS (2019)

Es fundamental conocer la presencia de agentes patógenos en las aguas de origen, ya que facilita la selección de la fuente de mayor calidad para alimentar el sistema de abastecimiento de agua de consumo (OMS, 2019).

2.2.1. Enfermedades transmitidas por el agua

Las enfermedades asociadas con el agua siguen siendo una causa principal de morbilidad y mortalidad (Ferro *et al.*, 2019), sobre todo entre las poblaciones que carecen de acceso a los servicios más básicos de agua y saneamiento (Peranovich, 2019). En este sentido, la OMS (2019) afirma que el agua contaminada y el saneamiento deficiente están relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, otras diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis.

Ahora bien, los riesgos para la salud relacionados con el agua de consumo más comunes y extendidos son las enfermedades infecciosas ocasionadas por agentes patógenos como bacterias, virus y parásitos (Carmona *et al.*, 2017). Cabe mencionar, el grupo de los protozoos, quienes pueden causar enfermedades en el hombre como: giardiasis, criptosporidiosis, malaria, diarrea por flagelados, disentería amebiana, meningoencefalitis amebiana, disentería balantidiana, infecciones diseminadas e infecciones intestinales (Robert, 2014). En la tabla 2, se muestran algunos microorganismos y la enfermedad que desarrolla.

Tabla 2. Enfermedades infecciosas más comunes ocasionadas por bacterias.

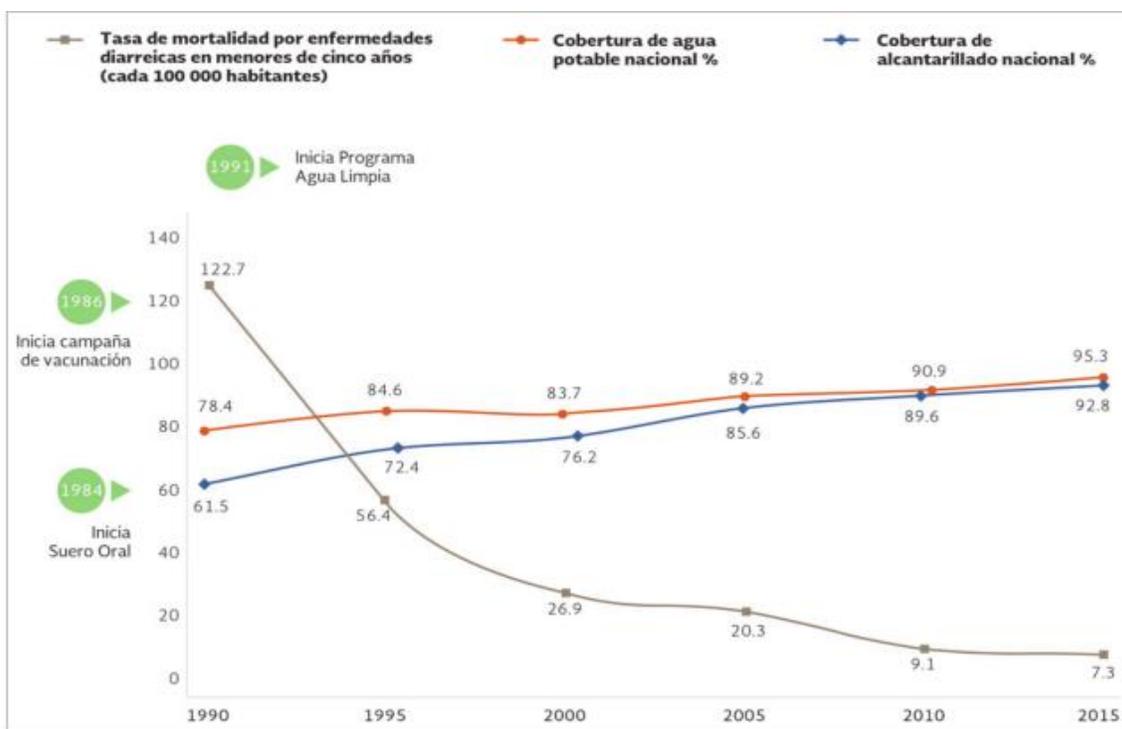
Microorganismo	Enfermedad
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniosis (fiebre, dolor abdominal y diarrea hasta hemorrágica)
<i>Helicobacter pylori</i>	Úlcera hepática, cáncer gástrico
<i>E. coli enterotoxigénica</i>	Diarrea del viajero
<i>E. coli enteropatogénica</i>	Episodio diarreico, destrucción de las microvellosidades
<i>E. coli enteroinvasiva</i>	Diarrea disenteriforme, muerte celular
<i>Salmonella spp</i>	Salmonelosis (fiebre tifoidea/paratifoidea)

<i>Shigella spp.</i>	Shigelosis (diarrea, fiebre, dolor abdominal, vómitos y náuseas)
<i>Vibrio Cholerae</i>	Cólera (enfermedad aguda diarreica)

Fuente: Robert, 2014

Las enfermedades transmitidas por el agua son de distribución mundial, causantes de epidemias tanto en países desarrollados como en vía de desarrollo (Ríos *et al.*, 2017). Se calcula que 842,000 personas de países de ingresos bajos y medianos mueren cada año como consecuencia de la insalubridad del agua y de un saneamiento y una higiene deficientes. Estas muertes representan el 58% del total de muertes por diarrea (OMS, 2019).

En particular, la diarrea suele ser un síntoma de una infección del tracto digestivo, que puede estar ocasionada por diversos organismos bacterianos, víricos y parásitos, se transmite por el consumo de alimentos o agua contaminados. En este contexto, en México, la tasa de mortalidad infantil en menores de 5 años por cada 100,000 habitantes se ha reducido de 122.7 a 56.4 entre 1990 y 1995, para después disminuir hasta llegar a 7.3 en el año 2015, conforme a la gráfica 1. (CONAGUA & SEMARNAT, 2018).



Gráfica 1. Cobertura de agua potable y tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de cinco años, 1990 a 2015. Fuente: INEGI (2010-2015) citado de CONAGUA & SEMARNAT, 2018.

2.3. Tratamientos del agua

Existen diversas técnicas de tratamiento de agua para consumo humano empleadas a gran, media y pequeña escala, según su objetivo. Dadas las características de aislamiento de una gran parte de la población mundial situada en regiones con problemas de abastecimiento de agua potable, las técnicas convencionales de tratamiento resultan de difícil aplicación (Manjón, 2011).

En México, el proceso de tratamiento de la Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se caracteriza por un tratamiento primario, seguido de un secundaria y, por último la aplicación de un terciario (Arreguín *et al.*, 2010). La siguiente tabla se puntualiza de manera general el proceso de cada uno.

Tabla 3. Tipos de tratamiento de aguas residuales.

Tipo de tratamiento	Propósito
Primario	Ajustar el pH y remover materiales orgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm.
Secundario	Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos.
Terciario	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus.

Fuente: CONAGUA, 2018

Durante el tratamiento del agua se emplean diferentes procesos, a continuación se describe los principales técnicas.

2.3.1. Filtración convencional

2.3.1.1. Filtros de arena

El Centro de Tecnología Asequible y Saneamiento de Agua (CAWST, por sus siglas en inglés) indica que el filtro de bioarena puede utilizarse con agua proveniente de cualquier fuente, como agua de lluvia, agua subterránea profunda, agua subterránea poco profunda, ríos, lagos u otras superficies de agua (2009). De acuerdo con la autora Leal (2005), los filtros de arena forman una película delgada

de microorganismos quienes atrapan y destruyen algas, bacterias y materia orgánica, incluso antes de que el agua llegue a los filtros propiamente dichos. Sus ventajas residen en que son de bajo costo, confiables, pueden remover algunos microorganismos hasta en 99.9% y la operación y control del proceso son muy sencillas. Dentro de las limitaciones principales se debe a que no pueden remover turbiedades elevadas.

2.3.1.2. Filtros de carbón activado

Los filtros de carbón activado son utilizados cuando se desean remover malos olores, sabores o color desagradable del agua, compuestos orgánicos volátiles, plaguicidas e incluso radón. El carbón activado tiene una gran área superficial y por lo tanto alta capacidad de adsorción de compuestos, que quedan adheridos a la superficie del mismo (Leal, 2005).

2.3.2. Laguna de estabilización

Las lagunas de estabilización son estanques excavados con el propósito de embalsar agua residual con largos periodos de retención básicamente se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos (Cortés *et al.*, 2017). Las lagunas se dividen en tres tipos:

Aerobias: donde la estabilización de la materia orgánica soluble y la conversión de los nutrientes se realiza en presencia de oxígeno disuelto, el cual se suministra en forma natural o artificial.

Anaerobias: la depuración se realiza en ausencia de oxígeno libre (condiciones anóxicas) y/o combinado (anaerobia).

Facultativas: La estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo tanto en condiciones aerobias como anaerobias. Las primeras se mantienen en el estrato superior de la laguna, mientras que en el inferior, se realiza la degradación anaerobia en ausencia de oxígeno.

2.3.2.1. Lagunas aireadas

A diferencia de las lagunas de estabilización en las que el agua residual se somete a procesos de autodepuración, las lagunas aireadas son estanques con aireación artificial y la aireación se lleva a cabo fundamentalmente mediante la acción de aireadores superficiales (Menéndez & Díaz, 2009). Como menciona la CONAGUA

(2010), la ventaja que presentan las lagunas aireadas es que puede utilizarse la infraestructura de las lagunas de estabilización, e instalarse aireadores como parte de una rehabilitación, o para aumentar la eficiencia de remoción de materia orgánica.

Las lagunas se clasifican en dos tipos:

Lagunas aireadas de mezcla completa: se diseñan con los niveles de potencia de manera tal que se alcance una mezcla completa, con la intención de mantener en suspensión todos los sólidos e incrementar la concentración de oxígeno disuelto en la masa de agua de la laguna.

Lagunas aireadas de mezcla parcial: se diseñan con niveles de potencia de aireación para realizar una mezcla parcial y mantener en suspensión tan solo una fracción de los sólidos suspendidos, lo que propicia que se depositen en el fondo.

De igual manera CONAGUA y SEMARNAT mencionan que para este tipo de tratamiento se requiere gran inversión para comprar los equipos aireadores y en el gasto mensual de operación, mantenimiento y personal capacitado, además de altos consumos de energía y se debe considerar un terreno donde se ubique la planta el cual debe ser plano y con características impermeables del material subyacente.

2.3.3. Humedales artificiales

En la figura 1, se representa a los humedales de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos. En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular (con una profundidad de la lámina de agua de alrededor de 0,6 m) y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos (Morató *et al.*, 2006).

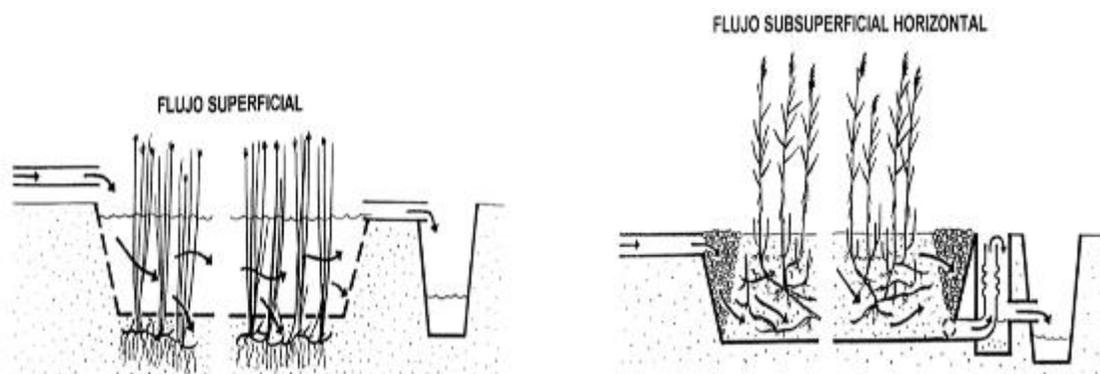


Fig. 1. Humedales de flujo superficial y flujo subsuperficial. Fuente: Morató, 2006

2.3.4. Procesos Avanzados de Oxidación (POAs)

Los procesos fotoquímicos avanzados de oxidación son ventajosos para el tratamiento de aguas con carga microbiológica o de contaminantes químicos, pues permiten su degradación a través de la generación de especies muy oxidantes.

De manera general, los POAs consisten en la aplicación de un agente oxidante (O_3 , H_2O_2 , etc.) combinado con un agente catalítico (TiO_2 , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc.) y la posibilidad de utilizar una fuente de energía (radiación UV, energía eléctrica y/o ultrasonidos), siendo los procesos más comunes: la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , el proceso Fenton y foto Fenton, el sistema UV/ H_2O_2 , la ozonización y la electro-oxidación (Rubio *et al.*, 2014).

De manera general, las ventajas y desventajas de los sistemas biológicos y sistemas convencionales se describen en la siguiente tabla.

Tabla 4. Comparación de los sistemas naturales y sistemas convencionales.

Sistemas naturales	Sistemas convencionales
Costo de proyecto medio	Elevado costo del proyecto
Bajo costo mantenimiento	Alto costo de mantenimiento
Bajo o nulo consumo energético	Requiere consumo energético
No requiere personal técnico	Requiere personal técnico
Producción fangos bajo o nula	Elevada producción de fangos
Buena integración en el medio	Baja integración en el medio
No genera malos olores	Producción de malos olores

Fuente: Morató, *et al.* 2006

2.4. Sistemas de desinfección

Según Chulluncuy (2011), es el último proceso de tratamiento del agua, que consiste en la destrucción selectiva de los organismos potencialmente infecciosos. El autor Leal (2004), indica que la desinfección inactiva a los organismos causantes de enfermedades, que se considera como una etapa fundamental para proteger la seguridad del ecosistema y la salud humana (Mehdi *et al.*, 2013). Dentro de los métodos que se utilizan se encuentran los siguientes:

2.4.1. Cloración

El cloro es un desinfectante convencional, sin embargo la cloración del efluente da como resultado la formación de subproductos de desinfección mutagénicos/cancerígenos (DBPs), derivados de la reacción del cloro con compuestos orgánicos en las aguas residuales (Mehdi *et al.*, 2013). Puesto que la adición directa de cloro es complicada por tratarse de un gas irritante y tóxico, el proceso se efectúa a través de sustancias en solución (hipoclorito sódico) o en fase sólida (hipoclorito cálcico) que, una vez puestas en contacto con el agua, liberan cloro libre que inactiva los microorganismos patógenos de una manera muy efectiva (Manjón, 2011).

La normatividad mexicana la NOM-127-SSA1-1994 establece un límite permisible de cloro residual libre de 0.2-1.50 mg/l.

2.4.2. Ozono

El ozono es una forma alótropa del oxígeno que tiene tres átomos en cada molécula, en lugar de la forma usual de dos átomos (Leal, 2005). El ozono tiene potencialidades como alternativa eficiente para el tratamiento de aguas en los casos que se requiera de una gran calidad microbiológica, así como para mantener otros requerimientos específicos de calidad (Bataller *et al.*, 2007). Las ventajas principales del ozono se deben a que requiere de tiempos de contacto y dosis menores que el cloro y debido a la inestabilidad de la molécula de ozono, el gas debe ser generado *in situ* y ser utilizado de inmediato. Los voltajes elevados que se manejan en los equipos los hacen técnicamente complejos en su mantenimiento y operación y caros en su costo de operación (Leal, 2005).

2.4.3. Luz ultravioleta

Por otra parte, el uso de radiación UV como proceso físico para la desinfección de agua y aguas residuales, se ha incrementado en los últimos años, debido a múltiples ventajas, entre ellas, por no utilizar agentes químicos, por los tiempos cortos de respuesta y por la seguridad de su uso (Lin & col., 2012 citado por Pantoja *et al.*, 2015). De igual forma, la radiación UV, emitida por una lámpara de arco de mercurio de baja presión, tiene actividad biocida a longitudes de onda de 180 a 320 nm. Puede utilizarse para inactivar protozoos, bacterias, bacteriófagos, levaduras, virus, hongos y algas. La turbidez del agua puede inhibir su desinfección mediante

radiación UV. La radiación UV, cuando se aplica junto con ozono, puede ejercer una potente acción catalizadora de reacciones de oxidación (OMS, 2019).

2.4.4. Procesos por membrana

Otro de los procesos que caben mencionar, son los procesos de membrana de los cuales los más importantes en el tratamiento del agua son la ósmosis inversa, la ultrafiltración, la microfiltración y la nanofiltración, sin embargo son procesos de elevado costo por la necesidad de limpieza o reemplazo frecuente de las membranas (Noriega *et al.*, 2012).

2.4.4.1. Microfiltración

La separación por membrana micrométrica contiene poros de 68 aproximadamente 0.03 a 10 μm . Generalmente es capaz de remover material particulado como arena, arcilla, *Giardia*, *Cryptosporidium*, algas y algunas especies bacterianas. No retiene virus pero tiene cierta capacidad de remoción de compuestos orgánicos.

2.4.4.2. Ultrafiltración

Se realiza por medio de membrana de tamaño de poro aproximado entre 0.002 y 0.1 μm y ejercicio de presión para que el agua atraviese la membrana. Impide el paso de bacterias y la mayoría de los virus, pero es permeable a algunos tipos de virus y de materia disuelta, como sustancias húmicas.

2.4.4.3. Nanofiltración

Pueden remover virtualmente todo tipo de bacterias, virus, quistes y material disuelto húmico, poseen un tamaño de poro de 0.001 μm . En ellas se retienen moléculas de peso molecular mayor a 1,000 daltons.

2.4.4.4. Ósmosis inversa

También conocido como hiperfiltración La membrana tiene poros menores a 10 Å (1 nm). El agua es sujeta a una alta presión que la obliga a pasar a través de la membrana; todas las sales disueltas permanecen en una solución que se concentra de sales, motivo por el cual se le conoce como salmuera o agua de rechazo o retrolavado.

2.5. Normatividad aplicable

Tabla 5. Normatividad aplicable

N°	Grupo: Salud
1	NOM-127-SSA1-1994 - Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
	Grupo: Normas mexicanas
1	NMX-AA-042-SCFI-2015 – Análisis de agua. Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia coli</i> – método del Número Más Probable en tubos múltiples.

La NOM-127-SSA1-1994 establece los lineamientos para garantizar el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada. Esta norma establece límites permisibles de características bacteriológicas (Coliformes Fecales y Coliformes totales); de características físicas y organolépticas (color, olor, sabor y turbiedad); de características químicas (comprende 34 parámetros, tales como aluminio, arsénico, bario, etc.), así como los métodos de tratamiento que se deben aplicar según los contaminantes encontrados.

Por su parte, la NMX-AA-042-SCFI-2015 especifica el proceso de colecta, almacenamiento y preservación de muestras así como la preparación del medio de cultivo y los reactivos, básicamente una guía del proceso para el método enumeración en agua de organismos Coliformes, organismos Coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* (*E. coli*) mediante cultivo en un medio líquido contenido en tubos múltiples y cálculo de su número más probable en la muestra, en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

2.6. Técnica de análisis

2.6.1. Espectroscopia

Según Niels Bohr un fotón puede comportarse como partícula y como onda, partiendo de ello “las partículas son objetos diminutos, tienen masa y obedecen las leyes de Newton; viajan por el espacio en línea recta a menos que actúe sobre ellas una fuerza”; las ondas por su parte “son fenómenos que se extienden en el espacio.

Cuando una onda se propaga por una abertura o rodea una barrera, se difracta y se interfieren algunas de sus partes” (Hewitt, 2004 citado por Madera Gómez, 2016).

Desde luego, la espectroscopia es el estudio de la interacción de la radiación electromagnética (luz, ondas de radio, rayos x, etc.) con la materia. En espectroscopia de absorbancia, abarcan regiones ultravioleta (UV, 195-400 nm) y el visible (400-780 nm), ondas de infrarrojo (Harris & Bertolucci, 2000).

Actualmente, se conocen un amplio espectro de ondas electromagnéticas lo que se conoce como el “arcoíris de Maxwell”, ver figura 2, (Halliday *et al.*, 2009), cuyas longitudes de onda se miden en fracciones de un angstrom, hasta las ondas de radio, cuyas longitudes de onda se expresan en metros e incluso kilómetros. Todas estas ondas tienen la misma velocidad: $3 \cdot 10^{10}$ cm por segundo (Morrison & Boyd, 1998).

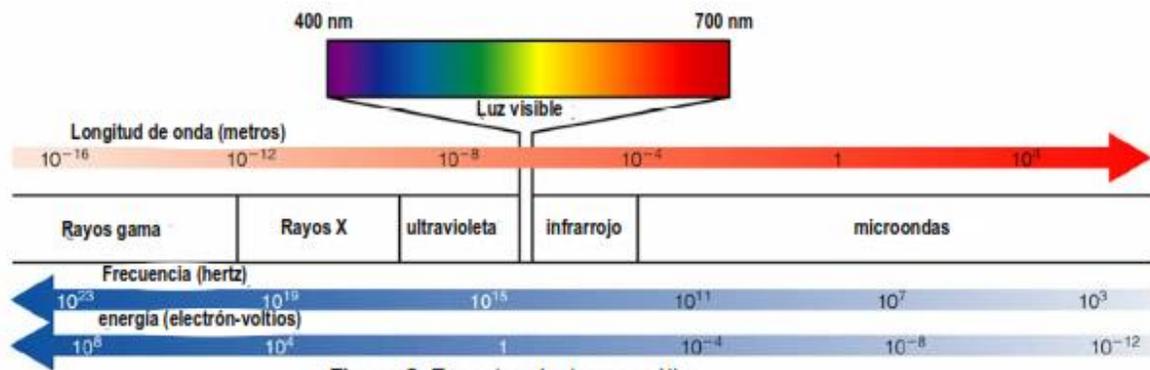


Fig. 2. Espectro electromagnético de la región de la luz visible. Fuente: Walker, 2008

Por otro lado, la radiación electromagnética es una forma de energía radiante que se propaga en forma de ondas transversales. Su vibración es perpendicular a la dirección de su propagación, lo cual imparte un movimiento ondulatorio a la radiación, tal como se muestra en la figura 3.

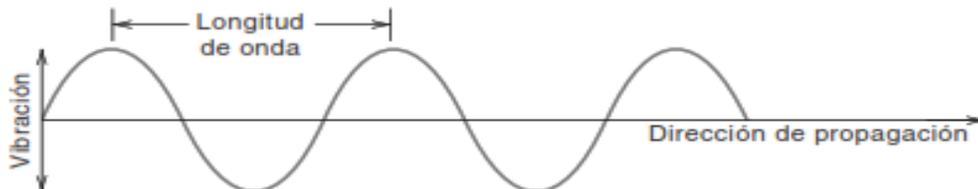


Fig. 3. Movimiento ondulatorio de la radiación electromagnética. Fuente Christian, 2009

La relación entre longitud de onda y frecuencia es

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Donde λ es la longitud de onda en centímetros (cm), ν es la frecuencia en segundos recíprocos (s^{-1}), o Hertz (Hz) y c es la velocidad de la luz (3×10^{10} cm/s).

Cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es la frecuencia. Si se hace pasar un haz de radiación electromagnética por una sustancia, la radiación puede ser absorbida o transmitida, dependiendo de su frecuencia y de la estructura de las moléculas que encuentra. La radiación electromagnética es energía, por lo que cuando una molécula absorbe radiación, gana energía (Morrison & Boyd, 1998).

Tabla 6. Tipos de transiciones de energía en cada región de espectro electromagnético.

Región de espectro	Transiciones de energía
Rayos X	Conexiones rotas
Ultravioleta / Visible	Electrónica
Infrarroja	Vibracional
Microondas	Rotacional
Frecuencias de radio	Resonancia magnética nuclear
	Resonancia de espín electrónico

Fuente: Pavia D., Lampman Gary, Kriz George & Vyvyan James. (2000)

Los métodos experimentales en espectroscopia ofrecen contribuciones notables al estado de arte de la física atómica y molecular, la química y de la biología molecular (Alcantara, 2002).

Para la mayoría de las técnicas espectroscópicas, la naturaleza ondulatoria del fotón es la más crítica porque la longitud de onda de la luz que se emite, absorbe o dispersa es donde se encuentra la información sobre la muestra. Cuando la radiación interactúa con la materia, ocurren varios procesos que incluyen la reflexión, dispersión, absorbancia, fluorescencia/fosforescencia y reacción fotoquímica (Owen, 1996).

2.6.2. Espectroscopia UV-Visible

El fundamento de la espectroscopia se debe a la capacidad de las moléculas para absorber radiaciones, entre ellas las radiaciones dentro del espectro UV-visible (Díaz *et al.*, 2009).

Si bien, la región visible del espectro es de interés, la figura 4 muestra la sensibilidad relativa del ojo humano a la radiación de diferentes longitudes de onda. De acuerdo con el autor Halliday los límites de las longitudes de onda aproximadamente van desde los 430 y 690 nm; no obstante el ojo puede detectar radiaciones fuera de estos límites, sí son lo suficientemente intensos (2009).

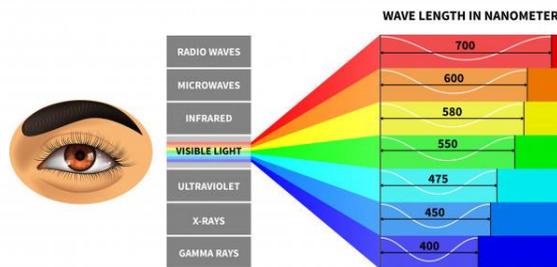


Fig. 4. Sensibilidad relativa del ojo humano a ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda.

Fuente: https://www.freepik.es/vector-premium/plantilla-espectro-luz-visible_6958648.htm

Cuando un átomo absorbe un fotón UV o un fotón de luz visible, la energía de ese fotón puede excitar uno de los electrones del átomo de tal forma, que se alcance un nivel de energía mayor (Halliday *et al.*, 2009). Lo anterior ocurre como resultado de la absorción de energía, los átomos o moléculas pasan de un estado de menor energía (estado fundamental) a un estado de mayor energía (estado excitado) y solo se absorberá la energía que permita el salto al estado excitado (Pavia *et al.*, 2007) Cada molécula tiene una serie de estados excitados (o bandas) que la distingue del resto de moléculas, como se muestra en la figura 5 y 6.

Como consecuencia, la absorción que a distintas longitudes de onda presenta una molécula que constituye una señal de identidad de la misma. Por último, la molécula en forma excitada libera la energía absorbida hasta el estado energético fundamental (Díaz *et al.*, 2009).

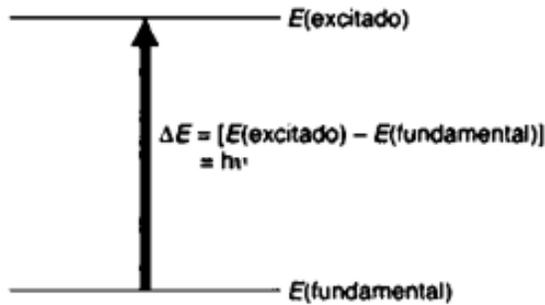


Fig. 5. Proceso de excitación de la energía en una molécula. Fuente:

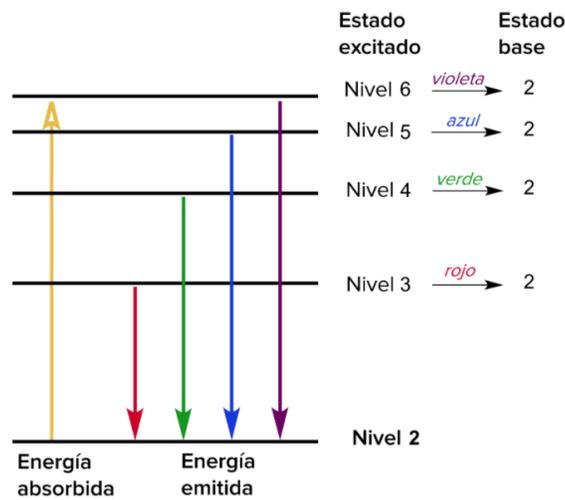


Fig. 6. Estado de excitación de los electrones. Fuente:

Nota: La absorción de energía luminosa hace que la molécula pase desde un estado fundamental (E1) a otro excitado (E2). Posteriormente la molécula relaja su energía mediante distintos mecanismos (vibración, rotación, etc.).

Los autores Arenas & López (2004) aumento del nivel energético interno de la molécula produce unos cambios en los enlaces intramoleculares y/o movimiento de los electrones alrededor del átomo. Estos enlaces se llaman transiciones y se clasifican en tres tipos:

Transiciones electrónicas	átomos		Energía requerida
Transiciones vibracionales	moléculas o iones		
Transiciones rotacionales	moléculas o iones		

La espectroscopia UV-Vis es una técnica de medición basada en la absorción de radiación UV y/o visible por parte de las moléculas que componen a una sustancia. Esta espectroscopia se trabaja en un intervalo de longitud de onda de 200 a 800 nm, brindando información de los estados energéticos, atómicos o moleculares, de la muestra de estudio (Perkampus, 1992 citado por Maldonado *et al.*, 2018).

2.6.3. Propiedades de la luz

2.6.3.1. Dispersión

Cuando la luz blanca pasa a través de un bloque de vidrio, los diferentes colores son refractados o desviados en distinta medida (Vanegas & Fonseca, 2019), la separación de los distintos colores que la forma, a esta separación de la luz en colores ordenados por su frecuencia se le llama dispersión (Hewitt, 2009). También, la dispersión cromática, en donde “dispersión” se refiere a la dispersión de la luz según la longitud de onda y la palabra “cromática” se asocia a los colores relacionados con las diferentes longitudes de onda (Halliday *et al.*, 2009).

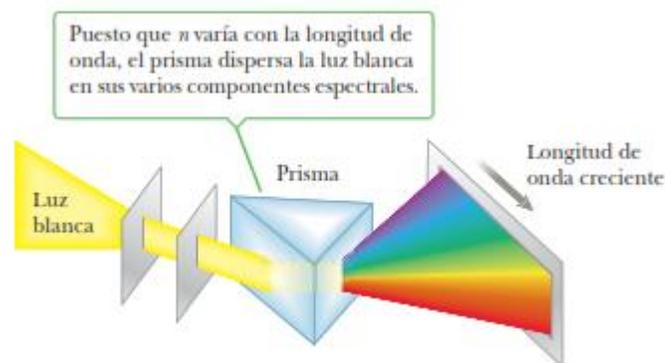


Fig. 7. Dispersión de la luz blanca mediante un prisma.
Fuente: Serway & Vuille, 2012.

De acuerdo con Halliday *et al.*, la manifestación más notoria de la dispersión cromática es el arcoíris. Cuando la luz solar, que contiene rayos de muchas longitudes de onda, es interceptada por una gota de lluvia, parte de la luz se refracta en la gota y se refracta nuevamente afuera (2009).

Esta segunda refracción se parece a la de un prisma, donde la refracción en la segunda superficie aumenta la dispersión que ya se produjo en la primera superficie (Hewitt, 2009). Los rayos salen de la gota de modo que el ángulo entre la luz blanca incidente y el rayo violeta de regreso es 40° y el ángulo entre la luz blanca y el rayo

rojo de regreso es 42° . Esta pequeña diferencia angular entre los rayos de regreso hace que vea el arco (Serway & Vuille, 2012).

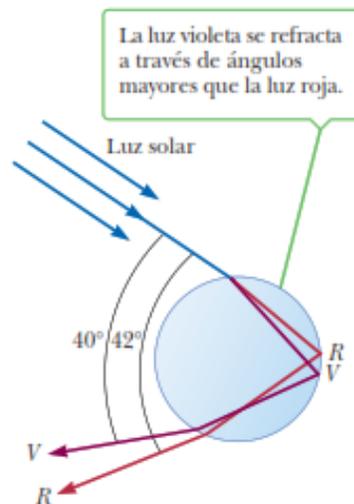


Fig. 8. Refracción de la luz solar por una gota de lluvia esférica. Fuente: Serway & Vuille, 2012.

2.6.3.2. Color

El color es una propiedad importante de una sustancia. El color de la materia está relacionado con su capacidad de absorción o reflectividad. El ojo humano ve el color complementario al que se absorbe, tal como se observa en la figura 9.

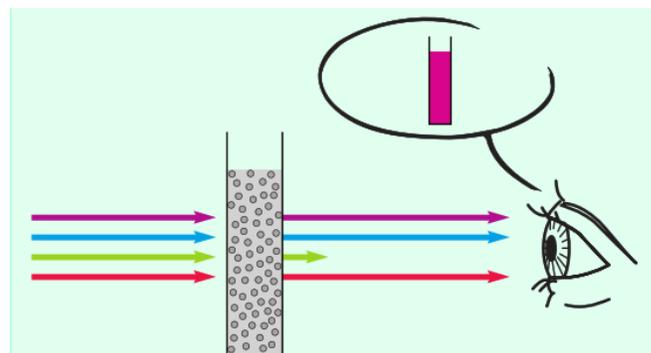


Fig. 9. Transmisión y percepción del color en el ojo humano. Fuente: Owen, 1996.

Cabe mencionar que cuando la luz policromática, o luz blanca, que contiene todo el espectro de longitudes de onda en la región visible, atraviesa un objeto, el objeto absorberá ciertas longitudes de onda y transmitirá las longitudes de onda que no absorba. Esas longitudes de onda residuales transmitidas se percibirán como un color, y este a su vez es complementario a los colores absorbidos (ver figura 10).

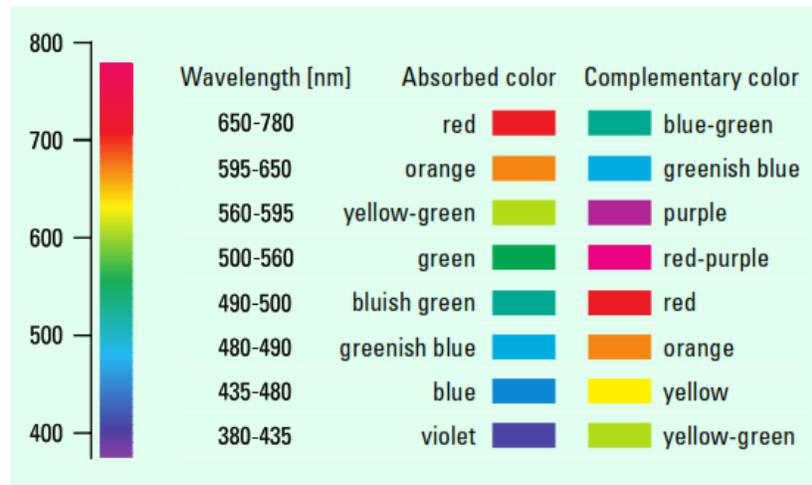


Fig. 10. Absorbancia y colores complementarios. Fuente: Owen, 1996

2.6.3.3. Transmitancia y absorbancia

La transmitancia (T), se define como la fracción de la luz incidente que pasa a través de la muestra .

$$T = \frac{P}{P_0}$$

Por tanto, T puede valer de 0 a 1. El porcentaje de transmitancia es simplemente $100T$ y puede valer desde 0 a 100%.

Por otro lado, cuando la luz atraviesa o se refleja en una muestra, la cantidad de luz absorbida es la diferencia incidente (I_0) y la radiación transmitida (I). La cantidad de luz absorbida se expresa como transmitancia o absorbancia (Owen, 1996). Se dice que la absorbancia de una disolución está relacionada con la transmitancia de una forma logarítmica, a medida que la absorbancia de una disolución incrementa, la transmitancia disminuye

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = -\log T$$

Cuando un rayo de luz de una determinada longitud de onda de intensidad I_0 incide perpendicularmente sobre una disolución de un compuesto químico que absorbe luz o cromóforo, el compuesto absorberá una parte de la radiación incidente (I_a) y dejará pasar el resto (I_t), de forma que se cumple: $I_0 = I_a + I_t$

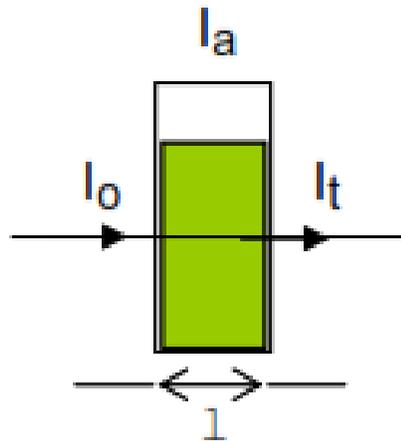


Fig. 11. Longitud de onda incidiendo en un compuesto químico (absorbancia). Fuente: Vanegas & Fonseca 2012.

2.6.4. Ley de Beer-Lambert

La Ley de absorción también conocida como Ley de Beer-Lambert, indica la radiación incidente, con potencia radiante P_0 , atraviesa una solución de una sustancia absorbente con concentración c recorriendo una trayectoria b (la longitud de la celda donde se encuentra la muestra); de aquí sale como radiación emergente (o transmitida), la cual posee una potencia radiante P . Esta potencia radiante es la cantidad que miden los detectores espectrométricos (Christian, 2009).



Fig. 12. Absorción de la radiación. Fuente: Christian, 2009.

P_0 = Potencia de la radiación incidente, P = Potencia e la radiación transmitida, c = concentración, b = distancia recorrida por la radiación

De acuerdo con la Ley de Beer, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes, c , y a la longitud de la trayectoria, b , del medio absorbente, como se expresa en la ecuación

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = abc$$

En donde, a es una constante de proporcionalidad llamada absorptividad. Debido a que la absorbancia es una cantidad adimensional, la absorptividad debe tener unidades que cancelen las unidades de b y c (Holler & Crouch, 1982).

La siguiente ecuación se denomina ley de Lambert-Beer o Ley de Beer. La concentración de la muestra, c , normalmente viene dada en unidades de mol/L (M). El camino óptico, b , normalmente se expresa en centímetros. La cantidad ε (epsilon) se llama absorptividad molar y tiene unidades como unidades $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$, y así el producto εbc es adimensional). La absorptividad molar es la característica de una sustancia que nos dice cuánta luz absorbe a una longitud de onda determinada (Harris, 2016).

$$A = \varepsilon bc$$

En el caso de líquidos ópticamente lineales, la absorción obedece a la ley conocida de intensidad

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I$$

Después de la integración de la ecuación diferencial lineal de primer orden, se obtiene la ley conocida de Beer-Lambert

$$I = I_0 e^{-\alpha(\lambda)d}$$

Donde I_0 es la intensidad de la luz incidente, α es el coeficiente de absorción, λ es la longitud de onda de la luz, d es el espesor de la muestra líquida. Dicha ecuación, es la base de los espectrofotómetros que se utilizan en la medición de la transmisión de luz a través de medios absorbentes (Raty *et al.*, 2004).

2.6.5. Instrumentación espectrométrica

Un espectrómetro o espectrofotómetro es un instrumento para medir la transmitancia o absorbancia en función de la longitud de onda de la radiación electromagnética (Owen, 1996). Todos los espectrómetros necesitan: 1) una fuente de radiación continua en las longitudes de onda que interesan; 2) un monocromador

para seleccionar una banda angosta de longitudes de onda del espectro de la fuente; 3) una celda para la muestra; 4) un detector o transductor, para convertir energía radiante en energía eléctrica, y 5) un instrumento para interpretar la respuesta del detector. La muestra puede estar antes o después del monocromador (Christian, 2009).

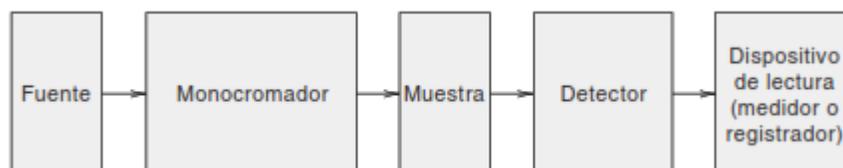


Fig. 13. Diagrama de bloques de un espectrómetro. Fuente: Gary, 2009.

2.7. Colorantes

2.7.1. Colorantes naturales

Dentro de las fuentes de colorantes naturales se consideran las plantas, las algas, hongos, líquenes, algunos insectos, así como algunos organismos marinos invertebrados (Sing, 1997). Ahora ha resurgido el interés por los colorantes naturales para aplicaciones alimenticias, cosmetológicas y textiles, debido a que se consideran más saludables y sus procesos de producción dañan menos al ambiente (Sandoval *et al.*, 2006). Específicamente, son muchas plantas que producen colorantes; a pesar de su universalidad no están lo suficientemente concentrados para permitir una rápida y económica extracción. Se menciona que el obtener colorantes naturales puros puede costar de 30 a 100 veces más que el producir colorantes sintéticos (Sing, 1997).

2.7.1.1. Añil

Indigofera suffruticosa

Esta especie produce el colorante añil o índigo, que es propio de tierras tropicales, mide aproximadamente un metro y pertenece al grupo de leguminosas (Contreras, 2010). El índigo de origen vegetal está compuesto por indigotina y una serie de componentes minoritarios, como indirubina, flavonoides, sales inorgánicas, entre otros (Castañeda, 2019).

No obstante, el añil es considerado el colorante más antiguo y único colorante azul usado por muchas culturas en lugares diferentes a través de todos los continentes

(González *et al.*, 2012). Si bien, este colorante fue uno de los más comercializados en el Viejo Mundo, en donde los nativos lo empleaban para teñir el algodón, los hilos, pintar vasijas, códices, murales, entre otros usos (Martínez, 2014).

En México, el colorante se obtiene de dos especies de arbustos, y aunque la más importante de ellas también tiene aplicaciones medicinales, alimenticias y cosmetológicas, el uso más conocido y tradicional es el tintóreo (Martínez, 2014). Sin embargo, otras especies de añil se han utilizado en otros países. En este sentido, el autor Ariizumi (2004), manifiesta que los textiles teñidos con índigo tienen actividad bactericida (Citado por Sandoval *et al.*, 2006).

Actualmente, se cultiva localmente en algunas partes de la región del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca y su importancia ha aumentado ligeramente en los últimos años por la demanda de colorantes naturales (Hanan & Mondragón, 2009).



Fig. 15. Proceso de secado de añil.
Fuente: Ricoy, 2020.



Fig. 14. Colorante orgánico (añil) secado.
Fuente: Ricoy, 2020.

2.7.2. Colorantes artificiales

Desde los inicios de la alquimia ha existido relación entre ésta y la producción de nuevos pigmentos, así como con las técnicas asociadas a la extracción de colorantes, favoreciendo la obtención de numerosos pigmentos de origen artificial, y la paulatina aparición de estos nuevos productos, así como la sustitución de ciertos pigmentos de origen natural de elevado precio (Andrés *et al.*, 2010).

2.7.2.1. Azul de metileno

El azul de metileno cuyo nombre científico es Cloruro de metilionina ($C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$), es un colorante heterocíclico aromático (fig. 16 y 17). Es

ampliamente utilizado en diferentes campos, como son biología, medicina, química e industria. En biología, el AM se emplea en diferentes procesos de tinción como medio de contraste. También es utilizado como un indicador para determinar si las células están vivas o no. En medicina es utilizado por sus propiedades antisépticas (Anaya, 2012).

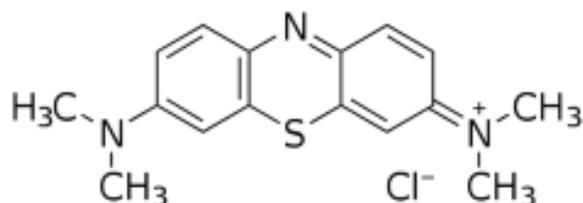


Fig. 16. Estructura química del Azul de metileno (AM). Fuente: Anaya, 2012.

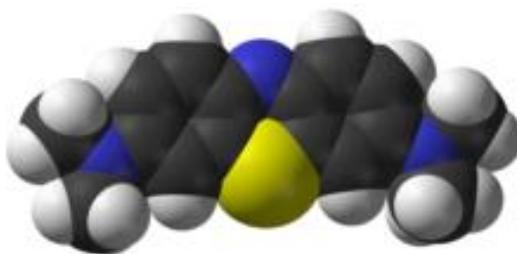


Fig. 17. Estructura tridimensional del AM. Fuente Anaya, 2012.

Es un indicador útil en química analítica debido a sus propiedades de óxido-reducción (redox). Cuando el azul de metileno está en un ambiente oxidante, el color que presenta es azul, pero cuando se expone a un agente reductor se vuelve incoloro (fig. 18; Anaya, 2012).

Nombre químico	3,7-bis (dimetilamino)-cloruro <i>d</i> fenazationio Cloruro de tetrametiltionina
Fórmula química	$C_{16}H_{18}N_3ClS$
Masa molecular	319,85 g/mol
Densidad	--- g/cm ³
Punto de fusión	100 °C
Punto de ebullición	Se descompone

Fig. 18. Principales características del AM. Fuente: Anaya, 2012.

2.8. Terapia fotodinámica

La terapia fotodinámica (PDT, por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente estudiada para aplicaciones terapéuticas, particularmente en el tratamiento de tumores y cáncer; se basa en la administración tópica o sistémica de un fotosensibilizador (PS, por sus siglas en inglés), seguido de irradiación de baja dosis con luz visible a la longitud de onda apropiada (Gad *et al.*, 2004, citado de Hasegawa, Lopes, Soares, *et al* 2015). Los fotosensibilizadores fotoactivados reaccionan con el oxígeno, generando especies reactivas del oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) que ayudan a la destrucción de células (Hasegawa *et al.*, 2015).

La inactivación fotodinámica (PDI) es el nombre de un proceso, derivado de la terapia fotodinámica (De Paula *et al.*, 2010); consiste que un fotosensibilizador es absorbido favorablemente por las bacterias y posteriormente activado por la luz del parámetro físico apropiado en presencia de oxígeno reactivo citotóxico, que son tóxicos a especies bacterianas (Fekrazad *et al.*, 2016).

El proceso de fotosensibilización se produce al generar, por absorción de luz de longitud de onda adecuada, el estado excitado de las moléculas de un colorante llamado sensibilizador (García, 2010). El fotosensibilizador se regenera de manera que actúa como una especie de catalizador y muchas moléculas de oxígeno singlete se puede formar a partir de una sola molécula de fotosensibilizador, tanto tiempo como el oxígeno y la luz molecular están presentes (Sabbahi *et al.*, 2010).

Entre los fotosensibilizadores más comúnmente utilizados para la generación de oxígeno singlete son la fenalona, el rosa de bengala, el azul de metileno, entre otros (García, 2010); los fotosensibilizadores pueden iniciar una reacción fotoquímica Tipo I o Tipo II o una combinación de ambos (Sabbahi *et al.*, 2010). Las reacciones de tipo I implican la transferencia de electrones o protones desde el estado triplete del fotosensibilizador, lo que lleva a la formación de especies citotóxicas como los radicales superóxido, hidroxilo e hidroperóxido (Hasegawa *et al.*, 2015). En una reacción de Tipo II, se produce una transferencia de energía al estado fundamental del oxígeno molecular, lo que conduce a la producción del oxígeno reactivo singlete (Sabbahi *et al.*, 2010).

El exceso de energía de las moléculas de dicho colorante se transfiere al oxígeno mediante choque con las moléculas de dioxígeno presentes en el medio, durante el tiempo de vida excitado del sensibilizador, resultando así la formación de oxígeno singlete (García, 2010). La excitación electrónica del fotosensibilizador en presencia de oxígeno implica la generación de especies reactivas de oxígeno, como por ejemplo el oxígeno singlete (De Paula *et al.*, 2010).

De acuerdo con García, entre las aplicaciones más recientes del oxígeno singlete está el desarrollo de procesos de desinfección de aguas, ya que este es susceptible de reaccionar con biomoléculas presentes en la pared celular de microorganismos (los lípidos y proteínas de membrana), lo que conduciría a su inactivación (2010).

2.8.1. Fotogeneración de oxígeno singlete

El proceso de fotosensibilización, mediante el cual tiene lugar la fotogeneración de oxígeno singlete, una molécula de fotosensibilizador absorbe un fotón de luz ultravioleta o visible, generándose inmediatamente su estado excitado singlete (García, 2005), mediante un proceso de cruce entre sistemas se relaja parcialmente a un estado excitado triplete (Jiménez, 2010). Dicho estado evoluciona rápidamente hasta un estado excitado triplete más estable y de tiempo de vida más largo, el cual puede colisionar con una molécula de oxígeno en estado fundamental (Orellana *et al.*, 2011).

En dicha colisión, mediante un proceso de transferencia de energía por intercambio electrónico, se genera de nuevo el fotosensibilizador en estado fundamental y oxígeno singlete (García, 2005).

El resultado de dicha colisión es la producción de una molécula de oxígeno singlete y la recuperación del sensibilizador en estado fundamental, por lo que el proceso de fotosensibilización se considera como un proceso fotocatalítico con consumo exclusivo de fotones y dióxigeno (García, 2010).

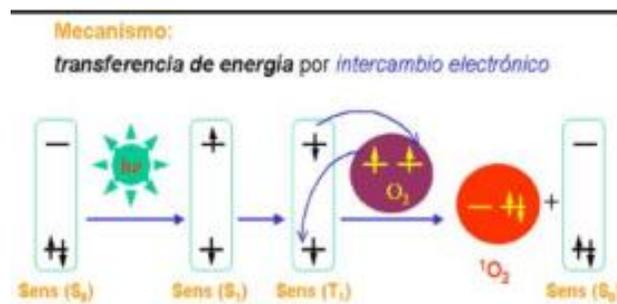


Fig. 19. Mecanismo del proceso de fotosensibilización para la fotogeneración de oxígeno singlete. Fuente: Jiménez, 2010.

Nota: Sens: Sensibilizador; S0: estado fundamental del sensibilizador; S1 y T1 son los estados excitados singlete y triplete del sensibilizador, respectivamente; hv representa el proceso de absorción de un fotón de luz UV-Vis por parte del sensibilizador.

2.8.1.1. Formas de oxidación del oxígeno singulete

El autor García (2005), describe las siguientes características que pueden causar las limitaciones de la eficiencia en la generación de oxígeno singulete

- ***Cambios en la fotofísica del fotosensibilizador***

Como resultado de la inmovilización del fotosensibilizador sobre el polímero pueden ocurrir cambios espectrales que afecten a su absorción de luz, disminuyéndola, por lo que se generarán menos estados excitados del mismo. Tras la inmovilización, el tiempo de vida del estado excitado del fotosensibilizador sea acorta, con lo que el proceso de transferencia de energía al oxígeno molecular será menos eficiente y, como consecuencia, el rendimiento cuántico de producción de oxígeno singulete será menor que el determinado para el sensibilizador en disolución.

- ***Desactivación del oxígeno singulete por el medio***

Si el oxígeno singulete fotogenerado reacciona eficientemente con especies químicas presentes en el medio, llegará un momento en que la concentración de oxígeno molecular en el mismo se agote, con lo que la producción de oxígeno singulete cesa, por lo que es importante que exista una aireación o reposición del oxígeno que se va consumiendo tras la reacción química.

- ***Desactivación del oxígeno singulete por el propio fotosensibilizador***

En dado caso, si la concentración del agente fotosensibilizador sobre el polímero es muy grande puede suceder que el oxígeno singulete fotogenerado sea eficientemente desactivado por colisiones con el mismo fotosensibilizador que lo está produciendo, lo que disminuye apreciablemente el rendimiento cuántico de producción de oxígeno singulete.

- ***Agotamiento de la concentración de oxígeno por el medio***

Si el oxígeno singulete fotogenerado reacciona eficientemente con especies químicas presentes en el medio, llegará un momento en que la concentración de oxígeno molecular en el mismo se agote, con lo que la producción de oxígeno singulete cesa, por lo que es importante que exista una aireación o reposición del oxígeno que se va consumiendo tras la reacción química.

2.8.1.2. Ruta fotoquímica del azul de metileno

Autores como (Sabbahi *et al.*, 2010) explican acerca de las rutas de reacción fotoquímica de azul de metileno (fig. 20).

Donde MB^+ (por sus siglas en inglés, azul de metileno, AM), $^1\text{MB}^{**}$, $^3\text{MB}^+$ son estados básicos de azul de metileno, estados excitados de singulete y triplete, respectivamente, MB. MB^{2+} son radicales semi-oxidados de azul de metileno, respectivamente.

Ω_1 es absorción de luz. Φ_f , Φ_{nr} , Φ_T , son fluorescencia, rendimiento no radiactivo y triple cuántico.

Las reacciones (1) - (4) representan las rutas de desactivación del estado excitado AM^+ y las especies radicales donde (1) es la desintegración espontánea de $^3\text{AM}^+$, (2) es la reacción de $^3\text{AM}^+$ con oxígeno molecular, (3) es la supresión redox de $^3\text{AM}^+$ mediante agentes reductores, (4) es la oxidación de MB por el oxígeno molecular que devuelve el colorante del estado fundamental y forma superóxido, (5) es la constante de dimerización del estado fundamental, (6) es la supresión redox de ($^3\text{MB}^+ \rightleftharpoons \text{MB}$), después de excitar dímeros de estado fundamental; (7) - (9) son reacciones de Fenton.

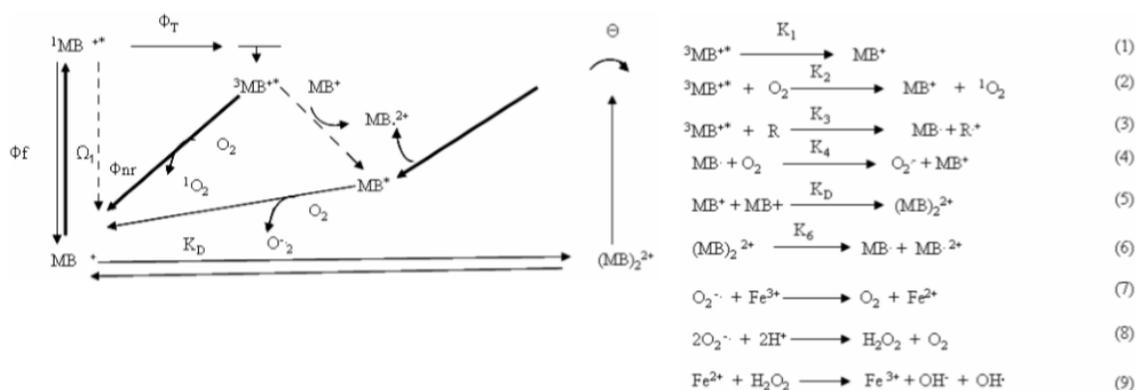


Fig. 20. Ruta fotoquímica del AM. Fuente: Tardivo et al., modificado por Sabbahi et al., 2010

2.9. Antecedentes

2.9.1. Terapia fotodinámica en la medicina

Raab demostró que la combinación de la luz con agentes sensibilizadores y el oxígeno podían destruir células y acuñaron el término reacción fotodinámica (PDR, por sus siglas en inglés). Por su parte, Tappeiner y Jesionek, utilizaron eosina tópica para tratar con éxito las lesiones de células basales de la piel al exponerlas intencionalmente a la luz del Sol, siendo quizás el primer caso del uso de PDT (Allison *et al.*, 2004). Sin embargo, este tratamiento no tuvo el alcance suficiente hasta la década de los 50's cuando Lipson & Schwartz redescubrieron la PDR, sus estudios revelaron la ablación de tumores (Allison & Moghissi, 2013). Posteriormente en los 70's, Dougherty y colegas informaron que el derivado de hematoporfirina (Hpd, por sus siglas en inglés) sistémico, activado por una luz roja de una lámpara de xenón, erradicaron un tumor mamario de ratón sin ningún daño excesivo a la piel (Dougherty, 1960), así pues con el fármaco fotosensibilizante adecuado, la fuente de luz fiable y los ensayos clínicos apropiados demostraron el valor de PDT en la oncología (Allison & Moghissi, 2013).

Actualmente, el Instituto Nacional de Cáncer (NIH, por sus siglas en inglés) utiliza la terapia fotodinámica para el tratamiento de cáncer de esófago y el cáncer de pulmón, aunque normalmente se usa para tratar tumores de la piel (2011).

2.9.2. Terapia fotodinámica en tratamiento de aguas

En una recopilación de estudios anteriores aplicado en la desinfección del agua, autores como Orellana *et al.* (2011), mencionan acerca de la desinfección de aguas usando azul de metileno disuelto, en donde lograron con éxito a escala de laboratorio y en una planta piloto experimental, tras 35 min de irradiación solar (0.84 kW m^{-2}) de efluentes suplementados con *E. coli*, con una disminución de la población microbiana de 4 a 5 órdenes de magnitud. Con respecto al efluente desinfectado, los autores proponen un filtro de arena para eliminar el colorante.

Por otra parte, los autores Sabbahi, Alouini, Ben Ayed, (2010) realizaron un estudio utilizando muestras de efluentes aguas de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Charguia. Para ello, primeramente, mediante el método de Número Más Probable (NMP) determinaron la presencia de Coliformes termotolerantes y *E. coli* Para la inactivación de bacterias, utilizaron una lámpara 500 wtt, tipo halógeno (OSRAM) como fuente de luz, el espectro de la irradiación de la lámpara fue de 650 nm. A su vez, la concentración de AM varió de 5 a 70 μM .

Como resultado obtuvieron que a partir de 20 μM de AM presenciaron la inactivación de bacterias. Asimismo, después de 2 h, utilizando una concentración de 50 μM de AM, las muestras resultaron una reducción >99% de Coliformes termotolerantes. Los autores concluyen, utilizando una concentración de 10 μM seguido de una exposición de 12 horas de luz solar, se puede utilizar para fotoblanquear MB, presentando una eficiencia de fotoblanqueo del 92%.

Asimismo, otro estudio denominado Inactivación fotodinámica de *Escherichia coli* con Azul de metileno y verde malaquita bajo luz LED roja, los autores Hasegawa, *et al.* (2015), quienes prepararon una suspensión estándar de *E. coli* (ATCC 25922) que contenía 10^6 CFU mL^{-1} y utilizaron fotosensibilizadores como el azul de metileno y verde malaquita, irradiaron con una longitud de onda de 600-680 nm, utilizando una concentración de 1000 $\mu\text{mol mL}^{-1}$ de AM, redujeron el 94.6% de *E. coli*, en contraste, el verde malaquita un 90% de *E. coli*; ambos tras 15 minutos de exposición de irradiación.

Además (De Paula *et al.*, 2010), en su trabajo “Un estudio comparativo de los sistemas de irradiación para la fotoinactivación de microorganismos”. Utilizaron tres diferentes equipos, AMS-II, LED600 y una lámpara halógena (OSRAM, modelo ENH, 250 W). Si bien, la cepa que utilizaron corresponde a *S. aureus* (ATCC 25923). Además, prepararon las soluciones de azul de metileno, con concentraciones 5×10^{-5} , 5×10^{-6} y 5×10^{-7} $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. De manera que, irradiaron muestras de agua durante 20 minutos. La primer fuente de radiación (AMS-II; pico de radiación de 652 nm), presentó una fotoinactivación superior al 99%. Los otros equipos que utilizaron para irradiar (LED600; pico de 663 nm, y HPLS; radiación de 675-700 nm) también presentaron buenos resultados de fotoinactivación de *Staphylococcus aureus*, puesto que a la concentración de 5×10^{-5} $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ y la aplicación de la radiación no hubo formación de colonias.

Otro ejemplo, es el del autor Orellana (2005) en una planta piloto experimental, como agente sensibilizador el autor utilizó una concentración de 0.7 g/m^3 AM, iluminación de 0.28-0.84 kW/m^2 , el tratamiento duró 35 min en el cual removieron Coliformes y *E. coli*, *Enterococcus fecalis*, polivirus, tras aplicar 4 horas de irradiación solar la degradación del agente fotosensibilizador se aproximó al 100%.

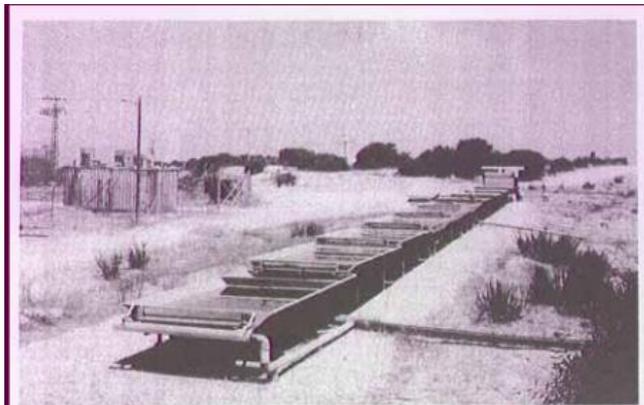


Fig. 21. Desinfección solar de efluentes domésticos. Fuente: Orellana, 2005.

CAPÍTULO III

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de Coliformes totales en muestras de agua de la Planta de bombeo Culati aplicando la técnica de fotosensibilización utilizando dos agentes sensibilizadores.

3.1.2 Objetivos específicos

- Definir el punto de colecta de acuerdo al área de estudio y el índice de concentración de Coliformes totales en el sitio.
- Evaluar parámetros físicos del tren de tratamiento (temperatura, volumen, caudal)
- Estimar la concentración óptima de los agentes sensibilizadores -azul de metileno y añil- para la remoción de Coliformes Totales.
- Determinar eficiencia de remoción de la concentración de Coliformes totales utilizando la técnica de fotosensibilización.
- Estimar los costos de operación del tren de tratamiento para desinfección de agua.

3.2 Hipótesis

El empleo de colorantes orgánicos como el añil, de origen natural y por procesos de producción artesanal, permitirá mejorar la remoción Coliformes totales que aquellos industriales como el azul de metileno.

CAPÍTULO IV

4.1. Metodología

El proceso que comprende la investigación, inició con la selección del área de estudio, así como el análisis referente a Coliformes totales.

4.1.1. Selección del área de estudio

Ubicación de un pozo de abastecimiento de agua (fig. 22), como sitio estratégico para la colecta de las muestras de agua, basándose en la metodología planteada en la NMX-AA-042-SCFI-2015.



Fig. 22. Ubicación del área de estudio para la recolección de muestras de agua en pozos de abastecimiento. Fuente: Google Earth

Previo a la elección del sitio, se recurrió al trabajo de *“Un estudio preliminar de la calidad del agua en pozos localizados en el tramo comprendido entre la C.H.*

Belisario Domínguez y la C.H. Manuel Moreno Torres”, puesto que en el sitio de muestreo del Puente Belisario Domínguez, exactamente con latitud 16°41’47.8” y longitud 93°00’52.9” (ubicado con un GPS) se encontraba por encima de 1000 UFC de organismos de Coliformes Totales, teniendo este dato como antecedente se optó por elegir un lugar cercano para coleccionar las muestras de agua. De manera que, el sitio estratégico resultó ser la planta de bombeo Culati ubicada en localidad de Chiapa de Corzo, con coordenadas 16°41’35.65” N y 93°00’33.46” W, mismo que fue localizado a través de Google Earth.

El personal laboral proporcionó facilidad y accesibilidad para ingresar a la planta de bombeo para la colecta de las muestras, también se consideró un factor importante la distancia y el tiempo con la finalidad de optimizar el traslado de la muestra de agua entre la planta y al laboratorio para su posterior análisis.

4.1.2. Tren de tratamiento

Orellana (2005) realizó el experimento de fotoinactivación mediada por O₂, en una planta piloto experimental, que consistía en un tren de tratamiento con material de acero galvanizado. Basado en el estudio anterior se optó por hacer un tren de tratamiento, sin embargo, los materiales que se utilizaron para la estructura se eligieron de forma que fueron asequibles en términos de costo y disponibilidad de los materiales. El tren de tratamiento consta de un soporte compuesta por estructuras de tubos cpvc con diámetro de ½ pulgada, que funcionó como la base del sistema.

En la figura 23 se muestra el diagrama del tren de tratamiento. La estructura se conformó por un bidón con una capacidad de 19 litros (1), que funcionó como almacenamiento para el influente; seguido de cuatro contenedores, cada uno con volumen de 3.5 litros, conectados entre sí con tubos de cpvc de ½ pulgada. Para regular el flujo volumétrico se tomó en cuenta las válvulas de globo de ½ pulgada; se colocaron 4 válvulas en donde la primer conexión tuvo lugar entre el bidón 1 y Contenedor 1 (C1), seguido del C1 y Contenedor 2 (C2), después se conectó otra válvula entre el C2 y Contenedor 3 (C3) y por último, el C3 y el cuarto contenedor (C4). Para la salida del agua del último contenedor se utilizó un microgotero y partiendo de ahí, se conectó una manguera de un equipo para venoclisis (**FLEBOTEX**®), mismo que se encargó de conducir el agua hasta el bidón 2, con capacidad de 20 litros. El bidón 2 utilizó como almacenamiento del agua tratada. Por último, cada uno de los cuatro contenedores constan de un jarro de aire para expulsar el aire contenido en líneas de agua.

Por otra parte, por cada tratamiento se colocó una bolsa para enema (**IPM, Industrias Plásticas Médicas**) con una capacidad de 1000 ml, mismo que sirvió

como almacenamiento de la solución del AM y añil, respectivamente, esta a su vez se introdujo con una aguja en una pequeña abertura en el tren de tratamiento de forma que se diluyó con el agua.

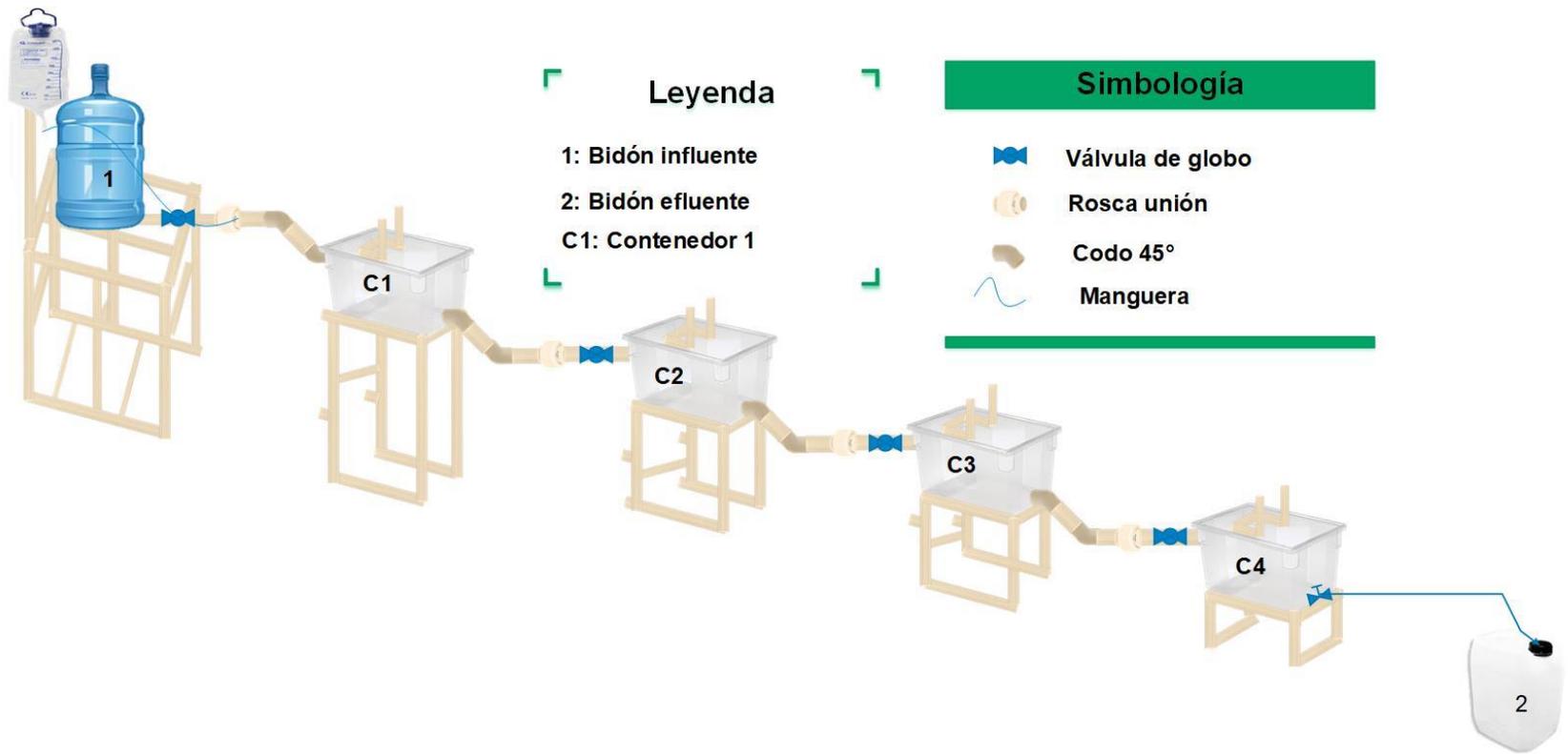


Fig. 23. Esquema del tren de tratamiento para desinfección de agua.

4.1.3. Análisis de variables del tren de tratamiento

Dentro de esta etapa se procedió a experimentar con diferentes volúmenes de agua de llave, se consideró los siguientes volúmenes: $1\frac{1}{2} l$, $1 l$, $\frac{1}{2} l$, $\frac{1}{4} l$, los cuales se colocaron en cada contenedor en dicho orden. Para el análisis de variables, se manejó dos escenarios, “agua en reposo” y “agua en movimiento” en el tren de tratamiento.

Según Orellana (2005), tras irradiar durante 35 minutos en el tratamiento que realizó, se decidió monitorear durante 40 minutos. En el caso de agua en reposo, se agregaron los volúmenes ya mencionados en los cuatro contenedores, en el cual cada 10 minutos se registró la temperatura del agua por cada contenedor (ver figura Fig. 33, anexo 4), la temperatura ambiente y de igual manera se tomó en cuenta la radiación solar del día. Se registraron los datos de las variables en diferentes horarios, (8:00 a.m. - 13:00 p.m.).

Por otro lado, en el contexto de agua en movimiento se agregó 3 litros de agua en el C1, las válvulas se mantuvieron a la mitad de abertura y se prosiguió a evaluar el tiempo en que tarda en drenar el agua del bidón 1, pasando por los 4 contenedores hasta llegar al bidón 2 y se conoció el tiempo en que fluye el agua en todo el tren de tratamiento.

4.1.4. Preparación de solución

Azul de metileno

Para la preparación de la solución se utilizó el azul de metileno solución alcohólica al 1% de 500 ml de la marca LABESSA. Se aplicó una regla de tres simples para determinar la cantidad en volumen de AM y alcohol que contenía el frasco.

Volumen (ml)	%
500	100
5	1

Por tanto, los otros 495 ml equivalen a la cantidad de alcohol que había en el frasco.

Luego, se prosiguió a realizar el cálculo para conocer la masa del AM a través de la siguiente fórmula

$$m = \rho * V \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde m es la masa, mientras que ρ representa la densidad del azul de metileno y V es el volumen de AM que hay en el reactivo. Sustituyendo los datos en la fórmula, la masa fue la siguiente:

$$m_{AM} = 8.785 \text{ g}$$

Asimismo, se pudo conocer cualquier otra cantidad de concentración que se deseó llegar, a través de la siguiente operación

$$C_{AM} = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$C_{AM} = 17.747 \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$$

En donde C_{AM} , es la concentración inicial, m es la masa y V es el volumen, en este caso el volumen del alcohol que había en el frasco y la concentración del AM en el frasco fue de 17.747 mg/ml.

Por otra parte, se propusieron diferentes concentraciones (Tabla 7), teniendo como referencia el valor de 0.7 g/m³ AM utilizado en un estudio por Orellana (2005). Sin embargo, como tal no se alcanzó llegar al valor propuesto, debido a que no se contaba con materiales de laboratorio como son pipetas graduadas, vasos de precipitados y morteros, no obstante, se adaptó en la medida posible sustituyendo los insumos de laboratorio por insumos médicos como las jeringas de 1 ml, 10 ml y 20 ml y de esta forma aproximarse al valor deseado.

Tabla 7. Concentraciones propuestas de azul de metileno.

Concentración	Concentración propuesta (mg/ml)
AM1	0.04
AM2	0.03
AM3	0.02
AM4	0.01
AM5	0.005

Previo a la preparación de la solución, se calculó el volumen de agua añadir y se determinó a través de la siguiente fórmula

$$V_{AD} = \frac{C_{AM} * V_{MJ}}{AM1} - V_{MJ} \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde, V_{AD} , resulta ser el volumen de agua destilada a añadir, mientras que AM_1 representa la primera concentración del azul de metileno a preparar y V_{MJ} es el volumen mínimo de la jeringa (0.04 ml)

Ahora bien, la preparación de la solución del AM, se utilizó un vaso de precipitado de 100 ml como recipiente, inicialmente se agregó 0.04 mg/ml utilizando la jeringa de 1 ml, se adicionó 17.8 ml de agua destilada y llegó a la concentración 0.03979 mg/ml, de manera sucesiva se añadió el agua destilada y se obtuvo las concentraciones que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Concentraciones obtenidas de azul de metileno.

Volumen de agua destilada a añadir (ml)	Concentración alcanzada de AM (mg/ml)
17.8	0.03979
6	0.02978
11.8	0.01992
35.4	0.00999
71	0.00499

Añil

Por otra parte, con respecto al colorante orgánico (añil) en primera instancia con una báscula analítica se procedió a pesar dos repeticiones de diferentes masas (2 mg, 5 mg, 10 mg, 15 mg y 25 mg; Fig. 34, anexo 4) de añil, este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de ingeniería ambiental.

Para obtener comenzar a preparar la solución con añil se recurrió a la ecuación 2, teniendo en cuenta los datos de masa y la concentración inicial propuesta, se halló el siguiente volumen:

$$v = 2.5 \text{ ml}$$

Después, para preparar la solución en un vaso de precipitado se agregó la masa de 25 mg de añil y se añadió el volumen hallado (2.5 ml), se mezcló y se tuvo una concentración inicial de 10 mg/ml. Partiendo de la primera concentración, se llegó a las concentraciones establecidas.

Para la determinación de las concentraciones, se utilizó la ecuación 2. No obstante, partiendo de la solución inicial (10 mg/ml), se restó el segundo volumen calculado con el primer volumen, así sucesivamente hasta que se conoció el volumen de agua destilada a añadir correspondiente a cada solución.

$$v_t = v_2 - v_1$$

Tabla 9. Concentraciones de añil

Masa	Concentración añil	Volumen total (ml)	Volumen de agua destilada a añadir (ml)
25 mg	10 mg/ml	2.5000	2.5000
	8 mg/ml	3.1250	0.6250
	6 mg/ml	4.1667	1.0417
	4 mg/ml	6.2500	2.0833
	2 mg/ml	12.5000	6.2500
	1 mg/ml	25.0000	12.5000
	0.8 mg/ml	31.2500	6.2500
	0.6 mg/ml	41.6667	10.4167
	0.4 mg/ml	62.5000	20.8333
	0.2 mg/ml	125.0000	62.5000

4.1.5. Medición por espectroscopia

Para la medición de absorbancia se utilizó un espectrómetro de fibra óptica Ocean Optics Inc. USB4000 (Fig. 24), el cual tiene un conector de puerto USB y se conectó a una computadora. A través del software Ocean Optics SpectraSuite se obtuvieron las mediciones de los espectros de las muestras. La luz de la fuente se transmite a través de la fibra óptica. Se utilizó la longitud de onda de 625 nm para medir la absorbancia del blanco así como la de los agentes sensibilizadores.



Fig. 24. Espectrómetro de fibra óptica Ocean Optics USB4000.

Por lo anterior, primero se leyó el espectro del blanco y se usó una cubeta de plástico rectangular con agua destilada como blanco (Fig. 35, anexo 4). Luego se midieron las muestras, iniciando con AM1, seguido de AM2, así sucesivamente hasta llegar a la muestra AM5, se guardaron los datos de cada espectro.

En el caso del añil, se tomaron las lecturas correspondientes a las concentraciones establecidas en la tabla 9. En general, por cada lectura se apagaban las luces, además de que se usó un cubo negro que cubrió en su totalidad cada muestra, con la finalidad de que alguna fuente de luz no deseada influyera en las mediciones de los espectros.

De acuerdo a los autores Junqueira, Severino, Dias, Gugliotti & Baptista (2002), la absorción del azul de metileno se encuentra en la región 550-700 nm, con absorptividad máxima a 664 nm, por ende se optó por obtener los promedios de datos en un rango de longitud de onda de 620 nm – 630 nm para absorbancia. En el caso del añil, al no tener antecedente de absorbancia se adecua en la medida posible a la referencia del azul de metileno.

Por cada concentración se tomó lectura de absorbancia e intensidad, con un tiempo de integración de 30 milisegundos (Fig. 36 y Fig. 37, ver anexo 4). Una vez teniendo los valores de absorbancia de las diferentes concentraciones, se calculó el promedio cada una de ellas. Posteriormente, se elaboraron dos curvas de calibración correspondiente a los datos del azul de metileno y el añil, respectivamente, por consiguiente se obtuvieron los modelos matemáticos.

Con base a los datos de absorbancia, además de las coordenadas espectrales y mediante el software Originlab se realizó el diagrama de cromaticidad del azul de

metileno, el añil, el blanco y como dato extra de una muestra de agua del planta de bombeo Culati que proviene del Río Grijalva.

Por último, para el primer tratamiento de desinfección que se realizó, se siguieron los procedimientos anteriores, se procedió a preparar la solución con azul de metileno utilizando 14 ml en dos litros de agua destilada, que equivale a una concentración del colorante de 248.46 mg/ml. En contraste, utilizando como agente sensibilizador el añil se utilizó la concentración de 0.2 mg/ml para la desinfección de 8.5 litros de agua en el tren de tratamiento.

4.1.6. Muestreo

Influente: Para el primer tratamiento se colectó 10 litros y para el segundo tratamiento se colectó 20 litros de agua en un bidón (Fig. 39, anexo 4) y se tomó una muestra en una bolsa estéril de 500 ml seguido del protocolo que establece en la NMX-AA-042-SCFI-2015.

Efluente: Se colectó el agua tratada salida del tren de tratamiento en una bolsa estéril de 500 ml seguido del protocolo que establece en la NMX-AA-042-SCFI-2015 (Fig. 40, anexo 4).

En ambos casos (influyente y efluente) durante el traslado de las muestras de agua al laboratorio correspondiente, se mantuvieron a una temperatura alrededor de $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ como indica la NMX-AA-042-SCFI-2015.

Desde luego, para los muestreos se tomó en cuenta el etiquetado para identificar las muestras (Tabla 14, ver anexo 4).

4.1.7. Parámetros evaluados

El parámetro principal fueron los Coliformes Totales, tanto como el influente y el efluente. Para el tratamiento utilizado azul de metileno, las muestras de agua fueron enviadas para su análisis en el laboratorio del Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) ubicado en San Cristóbal de las Casas, Chiapas. En cuanto al segundo tratamiento aplicado con añil, las muestras de agua del influente y efluente se enviaron a analizar en el laboratorio IQUISSA ubicado en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

4.1.8. Evaluación económica del sistema

Por último, se estimó los costos de los materiales e insumos requeridos para la desinfección del agua (Tabla 15, ver anexo 5).

CAPÍTULO V

5.1 Resultados

Se realizaron visitas de campo a la planta de bombeo Culati en Chiapa de Corzo, en donde no hubo ningún inconveniente en tomar las muestras de agua, siendo muy favorable para el desarrollo del proyecto. Se efectuaron dos visitas para coleccionar las muestras de agua, la primera visita se llevó a cabo el 05 de octubre de 2020 y la segunda visita fue el 09 de diciembre de 2020.

Por otro lado, se obtuvo un tren de tratamiento con materiales accesibles, como son estructuras de tubos de cpcv, contenedores de plástico, válvulas de globo, entre otros materiales, que funcionaron de forma correcta en el proceso para la desinfección de agua, cumpliendo con su función y propósito de manera adecuada.

5.1.1 Análisis de variables

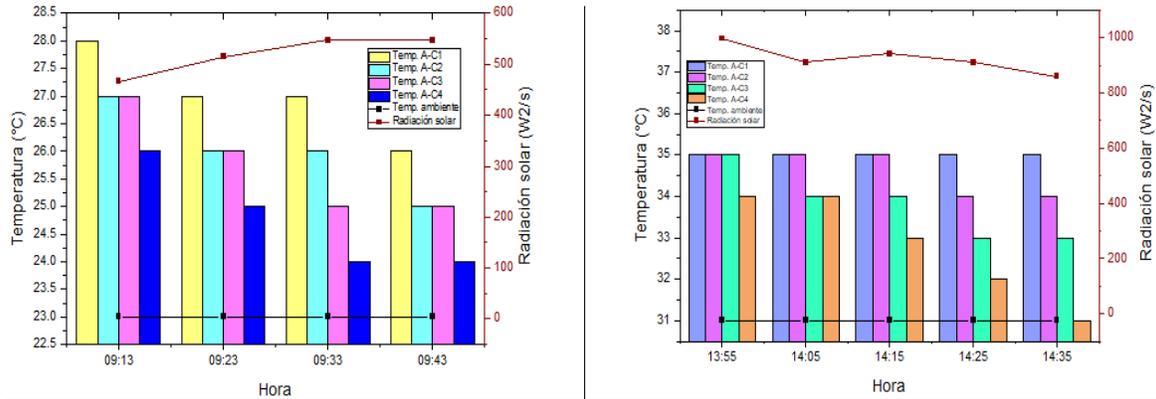
La evaluación de las variables del tren de tratamiento, como temperatura, volumen y tiempo, permitieron tener una idea más acertada acerca de la función del tren de tratamiento. El monitoreo del agua inició el 14 de marzo de 2020 al 18 de marzo de 2020, se registró la temperatura del agua en cada contenedor y temperatura ambiente, a su vez la radiación solar de los días referidos; estos últimos datos fueron obtenidos a través del sitio del Servicio Meteorológico Nacional.

La gráfica 2 muestra el comportamiento de la temperatura del agua en cada contenedor, la temperatura ambiente, así como la radiación solar de los días 17 y 18 de marzo de 2020, se refleja que los horarios por la mañana en ambos días la temperatura ambiente se mantiene y la radiación solar va en aumento; sin embargo existe una variación de la temperatura del agua que van desde los 28°C hasta los 24°C en los cuatro contenedores. Mientras que en el horario de la tarde, la temperatura fluctúa por encima de los 30°C, en ambos días existe una relación entre la temperatura del agua de cada contenedor y radiación solar, el 17 de marzo de 2020 la radiación solar decae de igual forma la temperatura del agua en los contenedores.

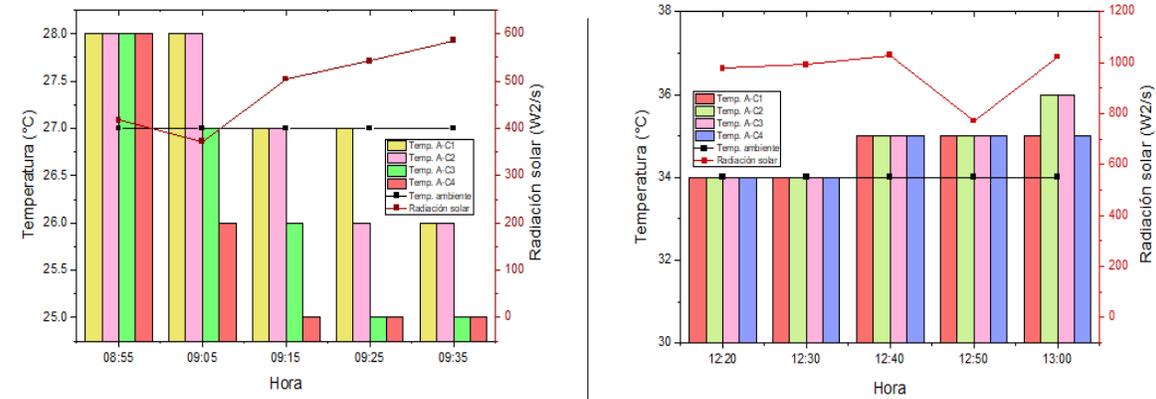
Para el 18 de marzo de 2020 la radiación presentó un incremento, de igual forma la temperatura del agua y como último dato se registró 34°C de temperatura ambiente.

Comportamiento de la temperatura y radiación solar

17 de marzo de 2020



18 de marzo de 2020



Gráfica 2. Comportamiento de las variables del tren de tratamiento del día 17 y 18 de marzo de 2020.

También se midió el tiempo en el que 8 litros de agua fluyen durante en el tren de tratamiento considerando una abertura completa de las 4 válvulas de globo, dando como resultado una hora, valor que sirvió como referencia al momento de aplicar el tratamiento de la desinfección del agua.

5.1.2 Preparación de solución y medición por espectroscopia

La primera concentración que se obtuvo fue de 0.03979 mg/ml de azul de metileno, en la Fig. 25 se muestran las diferentes muestras de azul de metileno utilizadas, así como el blanco. Si bien, se observa diferencias entre las cinco concentraciones, presentando diversas tonalidades que va de un azul celeste con tendencia a azul más transparente; la última muestra (0.00499 mg/ml) tenía una tonalidad de azul transparente.

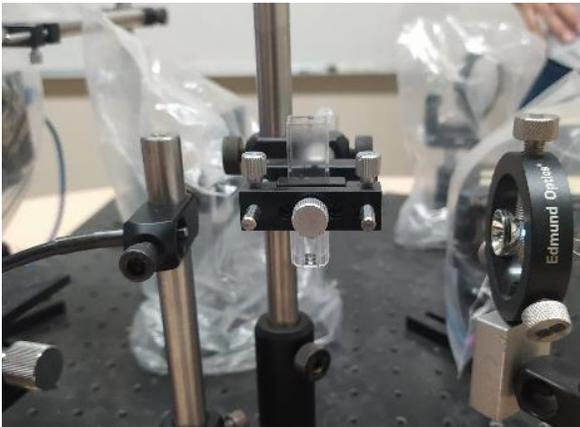
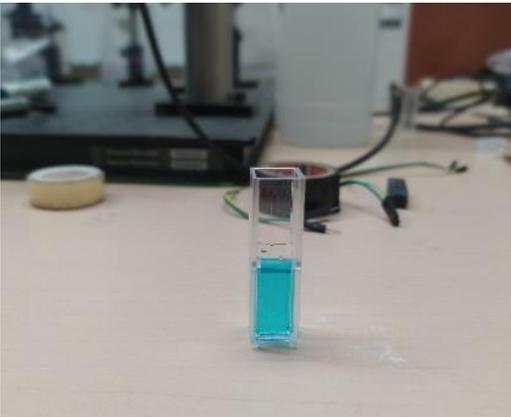
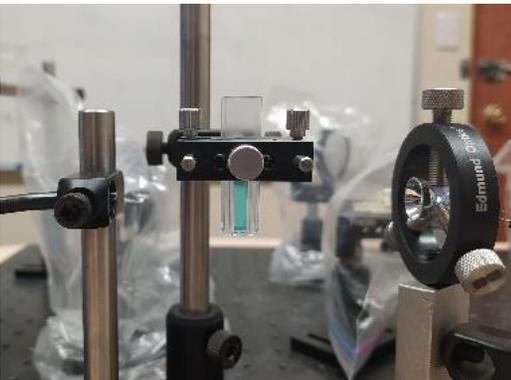
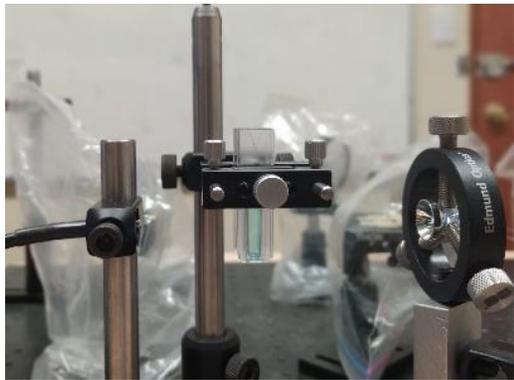
		
<p>Blanco</p>	<p>0.03979 mg/ml</p>	<p>0.02978 mg/ml</p>
		
<p>0.01992 mg/ml</p>	<p>0.00999 mg/ml</p>	<p>0.00499 mg/ml</p>

Fig. 25. Collage de las concentraciones de azul de metileno.

La medición mediante espectroscopia utilizando el espectrómetro Ocean Optics Inc. USB4000 se representa en la siguiente figura, teniendo en cuenta la Fig. 12 de la Ley de Beer-Lambert. De igual manera, se representa la instrumentación espectrométrica. Los resultados de los datos de los espectros de las diferentes concentraciones de AM sirvieron para hacer las mediciones de absorbancia.

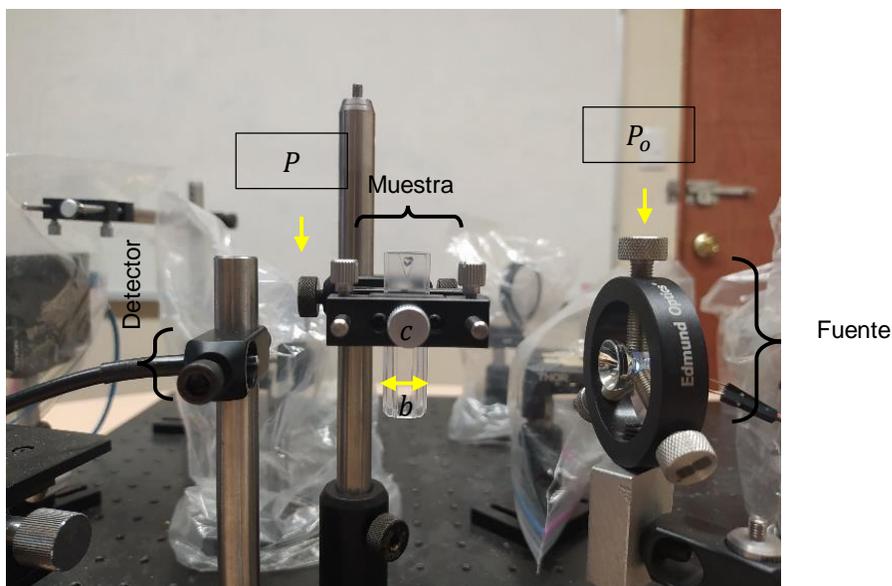
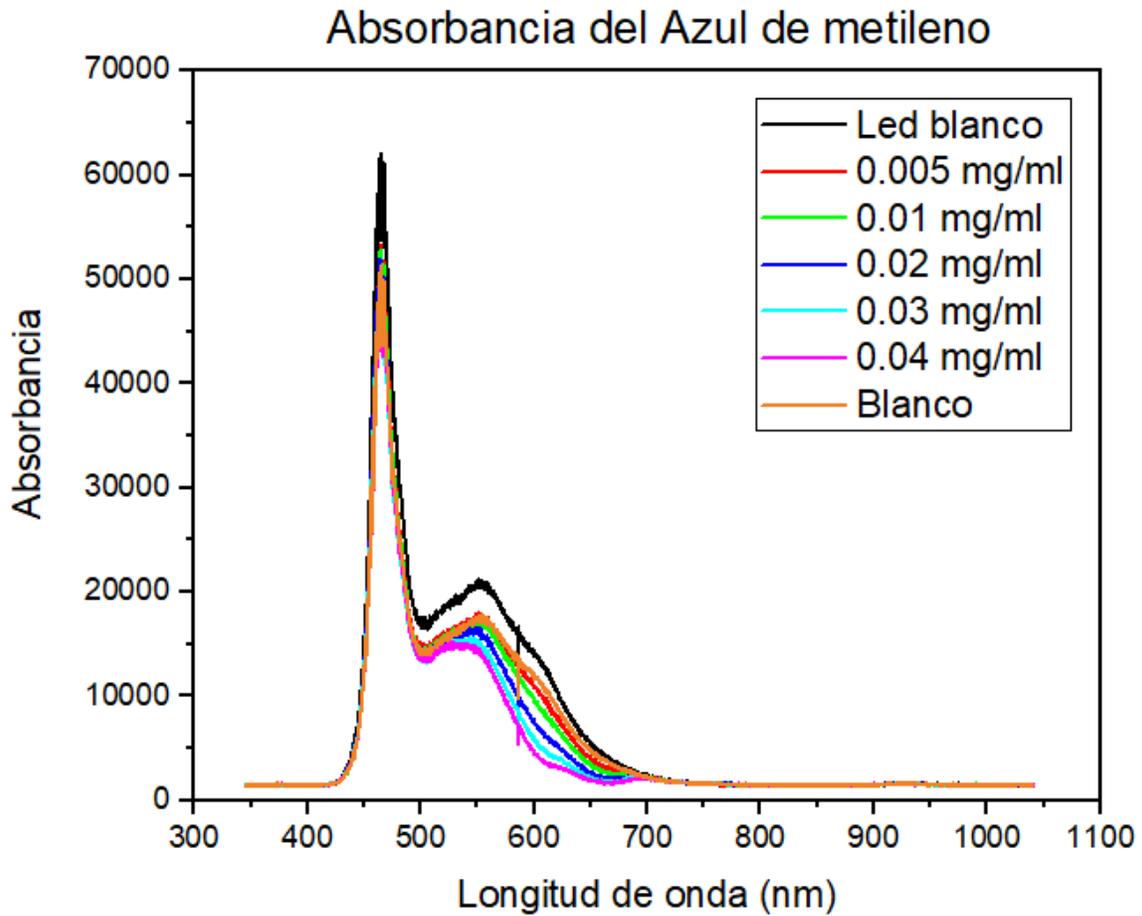


Fig. 26. Medición de absorbancia del blanco.

En la Gráfica 3 se aprecia que el Led blanco abarca la región de la luz visible, seguido del blanco. En cambio, el espectro del azul de metileno tiene un ligero incremento a partir de los 450 nm. La $\lambda_{\text{máx}}$ de transmisión oscila entre los 460 nm, siendo este el pico más alto de los espectros. Mientras que la $\lambda_{\text{máx}}$ de absorbancia ronda entre los 625 nm.

También, se aprecia que los espectros de las diferentes concentraciones del AM se encuentran cercanas al espectro del blanco, aproximándose aún más el espectro de la concentración de 0.00499 mg/ml, por el contrario, el espectro más atenuado resultó la concentración ser la concentración más alta (0.03979 mg/ml).

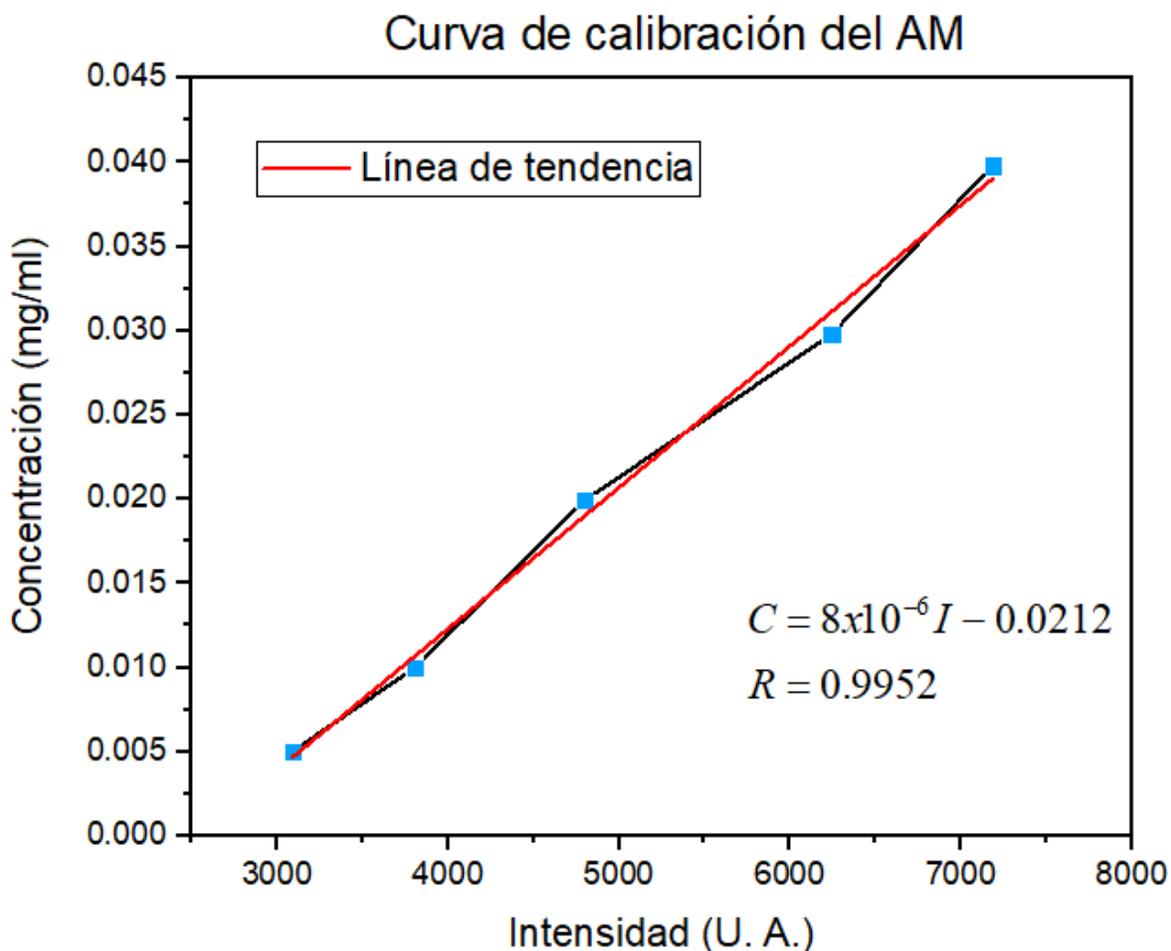


Gráfica 3. Longitudes de onda de las diferentes concentraciones de AM.

La curva de calibración (Gráfica 4), presenta en su eje horizontal los promedios obtenidos de los datos intensidad de la absorbancia considerando un rango de 620 nm - 630 nm y en su eje vertical se refleja las concentraciones del AM. Desde la concentración más alta se observa un descenso de manera paulatina, por consiguiente, se obtuvo una curva de calibración y un modelo matemático lineal,

$$C = 8 \times 10^{-6} I - 0.0212$$

y la línea de tendencia se ajustó al 99.52%.



Gráfica 4. Curva de calibración de absorbancia (625 nm) del AM.

Con respecto al añil, este tiene la presentación sólida ya sea en gránulos grandes o pequeños (Fig. 27). Además, la mezcla entre el agua y dicho colorante no fue homogénea porque quedaron residuos del añil y a su vez quedaron esparcidas en el frasco, o bien, se sedimentaban en él (Fig. 28).

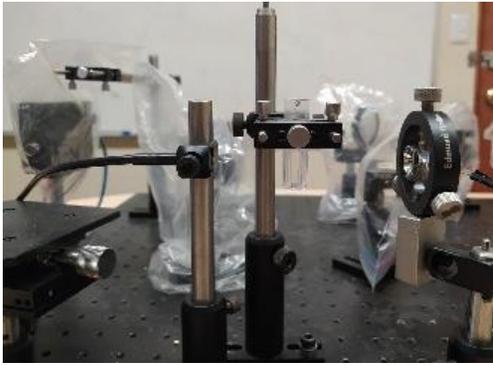
Teniendo en cuenta lo anterior, las soluciones preparadas del añil resultaron que las primeras cuatro concentraciones tenían una tonalidad de azul oscuro, mientras que a partir de la concentración de 1 mg/ml la tonalidad cambió a un azul marino más transparente, así hasta la última concentración (Fig. 29).



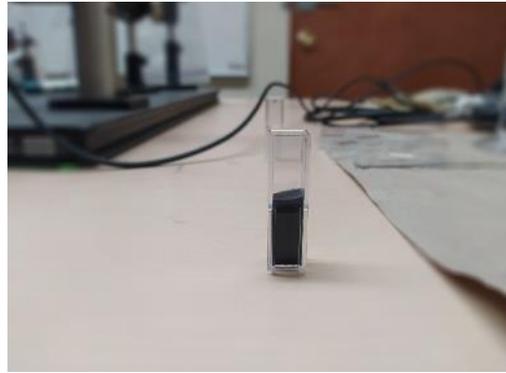
Fig. 27. Gránulos y/o partículas de añil.



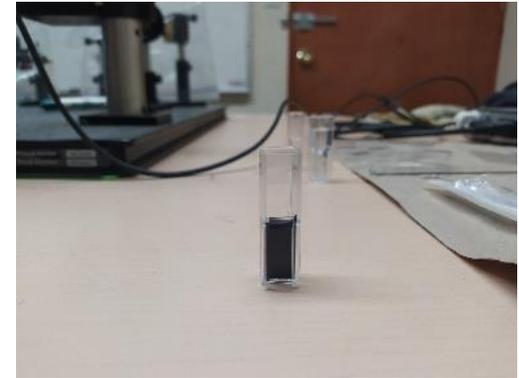
Fig. 28. Solución del añil con residuos del colorante



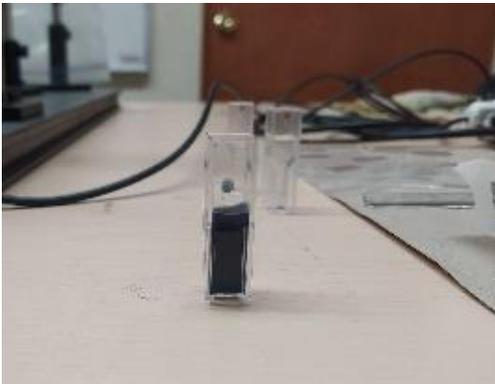
Blanco



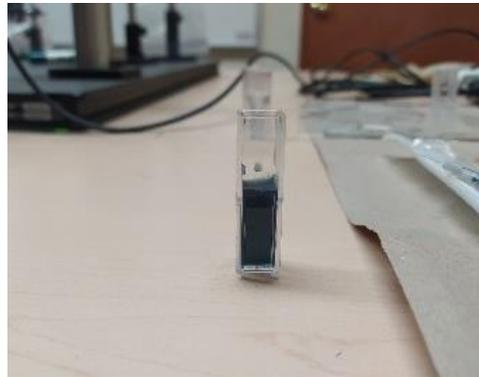
10 mg/ml



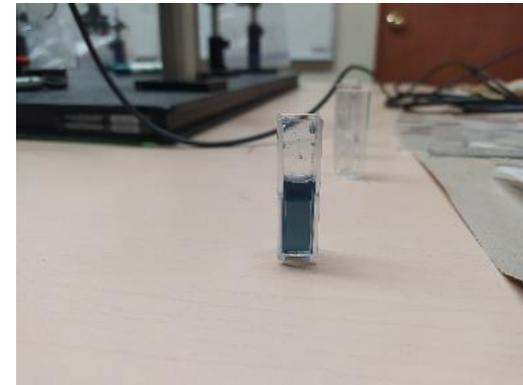
8 mg/ml



6 mg/ml



4 mg/ml



2 mg/ml

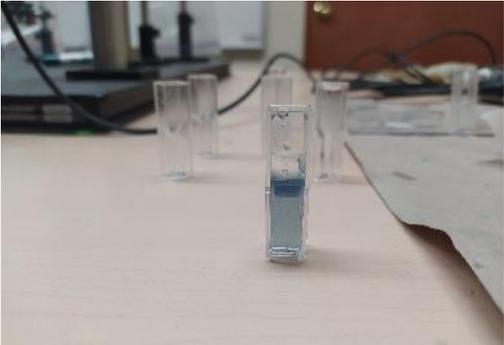
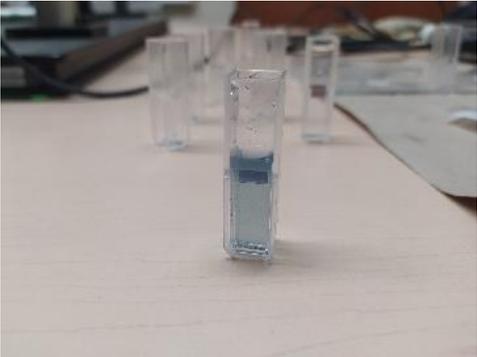
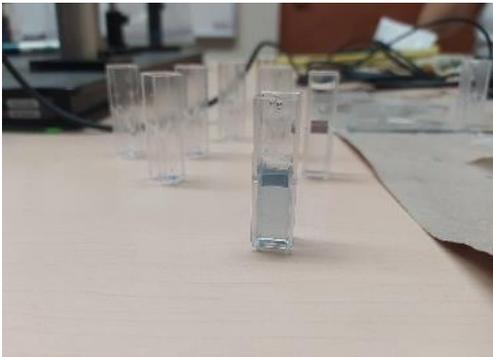
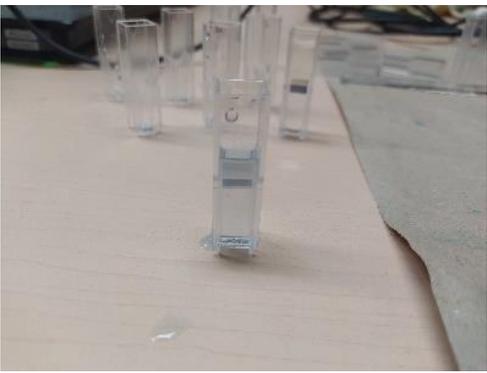
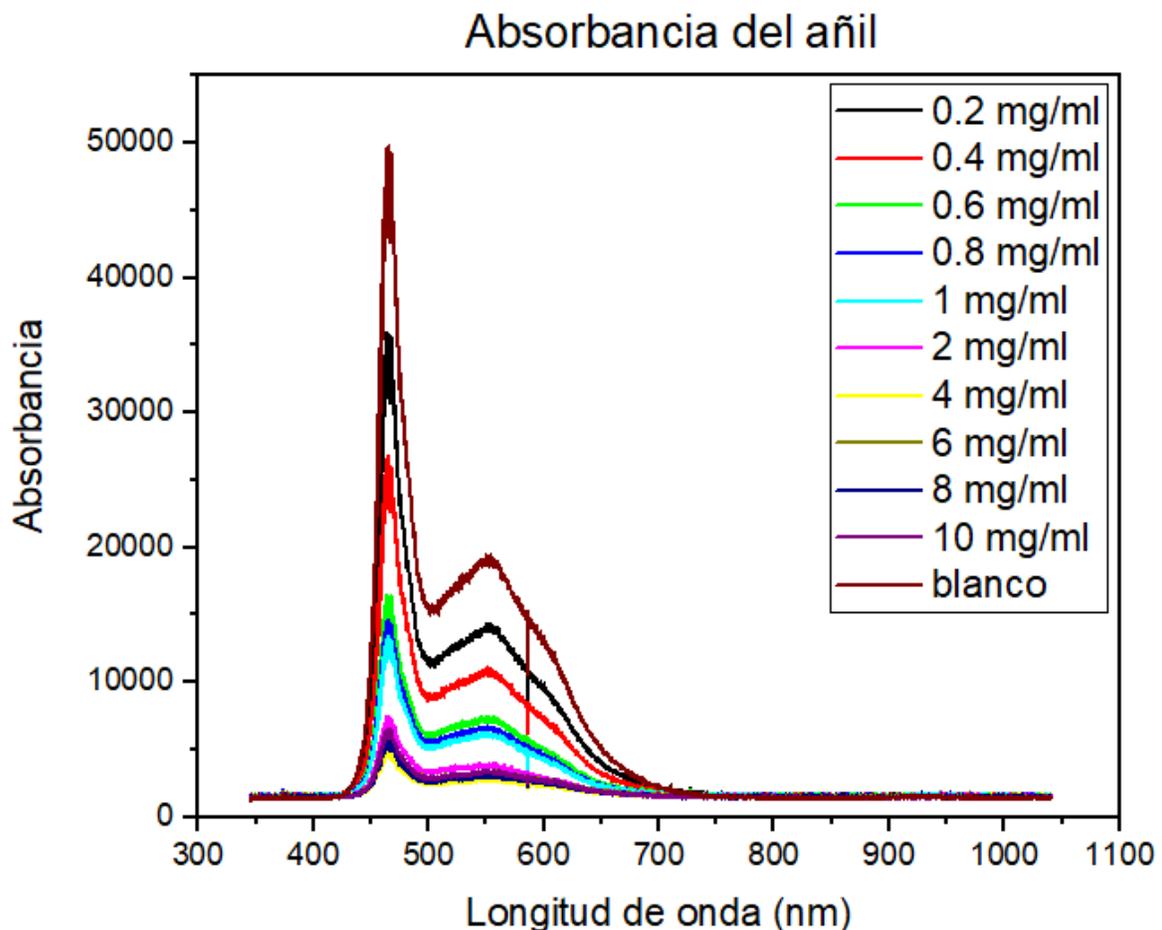
		
1 mg/ml	0.8 mg/ml	0.6 mg/ml
		
0.4 mg/ml	0.2 mg/ml	

Fig. 29. Collage de las concentraciones del añil.

La siguiente gráfica corresponde a las lecturas de absorbancia del añil; se observa que los espectros de dicho colorante comienzan a incrementar a los 440 nm. En este caso, la transmisión se evidencia a partir de la longitud de onda de 430 nm, mientras que la absorción ronda alrededor de los 650 m.

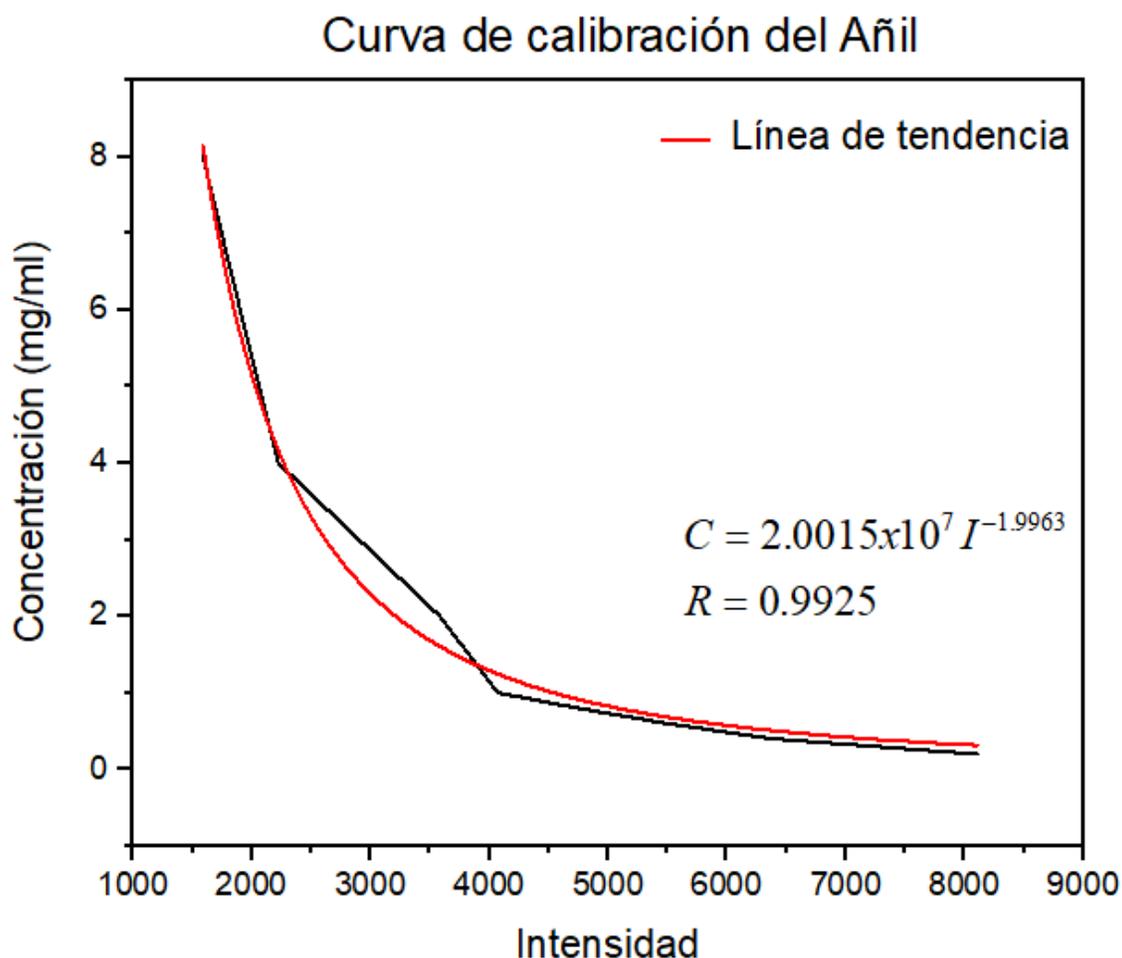
Se muestran los espectros de absorción, con un tiempo de integración de 15 segundos obtenidos a través del dispositivo de lectura de Ocean Spectra Suites. Los espectros de las primeras 3 concentraciones mayores de añil (10 mg/ml, 8 mg/ml, 6 mg/ml) atenúan demasiado la luz incidente, por tanto, estas se encuentran más cercanas a la intensidad 0, no obstante, a partir del espectro de la concentración 4 mg/ml se comienza a ver un ligero incremento en la intensidad, siendo el espectro de 0.2 mg/ml más cercano al blanco.



Gráfica 5. Longitudes de onda de las diferentes concentraciones de añil.

En la gráfica 6, en el eje horizontal se indican los promedios obtenidos de los datos de la intensidad para la absorbancia (620 nm - 630 nm) y en el eje vertical se encuentran las diferentes concentraciones que se prepararon del añil. Si bien, a partir de la concentración 1 mg/ml, la línea de tendencia se halla más cercano a esos datos, siendo este factor un punto clave que se tomó en cuenta para elegir la concentración adecuada del añil en el tratamiento de desinfección. Por otro lado, se obtuvo una ecuación potencial con un ajuste del 99.25%

$$C = 2.0015 \times 10^7 I^{-1.9963}$$

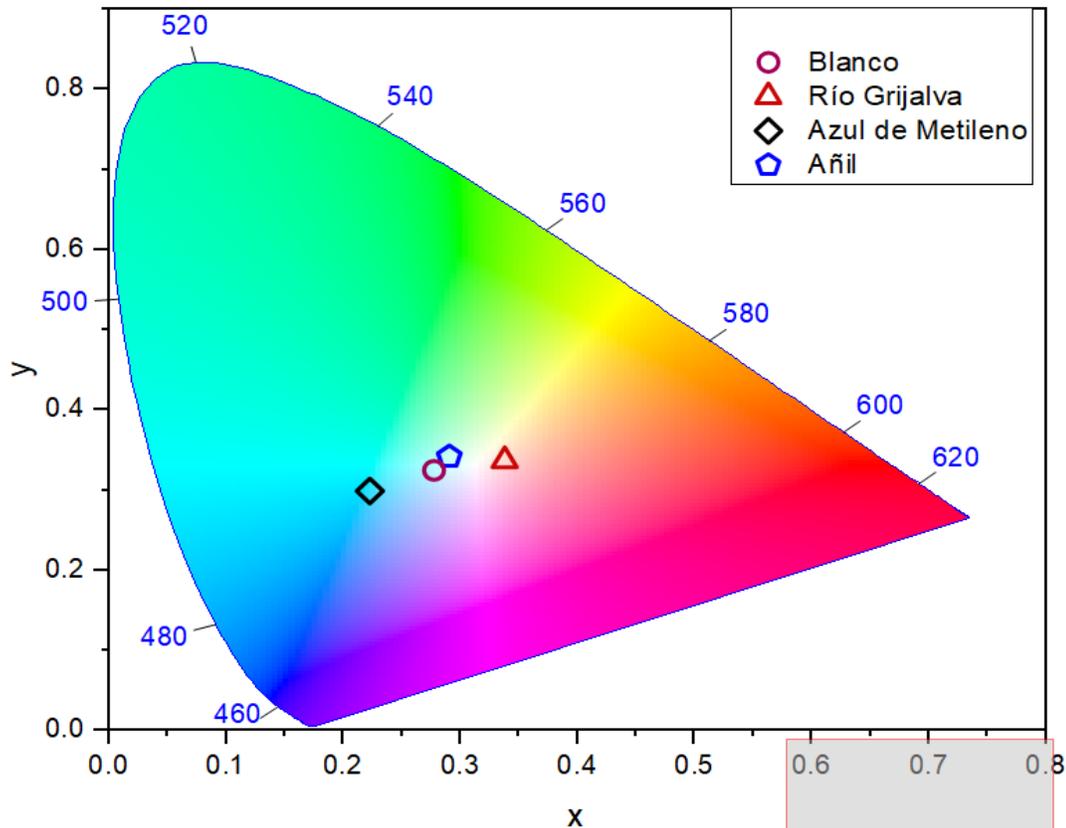


Gráfica 6. Curva de calibración de absorbancia (625 nm) del añil.

Por otra parte, en el siguiente diagrama de cromaticidad se representa los espectros de la percepción del color de los dos agentes sensibilizadores, el blanco y muestra del agua del Río Grijalva. La concentración de 0.03979 de AM resulta tener como coordenadas $x = 0.22$ y $y = 0.29$ presentando una tonalidad azul; el blanco presenta para el eje $x = 0.27$ y para el eje $y = 0.35$; la concentración 0.8 mg/ml del

añil las coordenadas son $x = 0.29$ y $y = 0.34$, mientras que la muestra de agua del Río Grijalva $x = 0.33$ y $y = 0.33$ con una tonalidad próxima al color naranja.

CIE 1931



Gráfica 7. . Diagrama de cromaticidad del AM, Añil, Blanco y muestra de agua del Río Grijalva (RG)

5.1.3. Análisis microbiológico

La primera desinfección de aguas se llevó a cabo el día 05 de octubre (Fig. 41, anexo 6). Se irradió por 75 minutos (10:35 a.m - 12:00 p.m.), considerando la radiación solar promedio en ese lapso de 533.75 W/m^2 (datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional, SMN). Se utilizó la concentración de 248.46 mg/ml de AM aplicado para desinfección de 12 litros de agua; se tuvo un caudal de $2.66 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

En la tabla 10, se indica el influente de la muestra con valor de $24200 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$. Dada las condiciones se redujo la concentración de Coliformes totales a $1680 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$, con una eficiencia de remoción del 93.05%. Dichos análisis fueron desarrollados por el método sustrato cromogénico.

Tabla 10. Resultado del análisis microbiológico agua antes y después del tratamiento con AM.

Parámetro analizado	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Coliformes totales	24200 UFC/100 ml	1680 UFC/100 ml

En el segundo tratamiento se ocupó el añil como fotosensibilizador se realizó el 11 de diciembre de 2020 (Fig. 42, anexo 6). Se utilizó la concentración de 0.2 mg/ml. Tras irradiarse por 65 minutos (12:30 p.m. - 13:45 p.m.) registrando la radiación solar de 741.18 W/m². Durante ese tiempo se aplicó el tratamiento para 8.5 litros de agua, teniendo $2.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal. Los resultados del influente tuvieron un valor de 24000 NMP/ml de organismos de Coliformes totales. Después del tratamiento, se logró reducir hasta 3500 NMP/100 ml, obteniendo una eficiencia de remoción del 85.41%. Esta vez el laboratorio encargado se basó en la metodología de la NOM-112-SSA1-1994 determinación de bacterias Coliformes. Técnica NMP.

Tabla 11. Resultado del análisis microbiológico agua antes y después del tratamiento con añil.

Parámetro analizado	Influente	Efluente
Coliformes totales	24000 NMP/100 ml	3500 NMP/100 ml

Los resultados del influente y efluente del tratamiento se comparan con lo que establece la NOM-127-SSA1-1994 el cual el límite permisible debe ajustarse ausencia o no detectable referente a organismos Coliformes totales. Cabe mencionar que en ambos tratamientos se presenciaron sólidos, después de 20 minutos se sedimentaron en el bidón 1 y a su vez también en los primeros 3 contenedores (Fig. 43, anexo 6).

La inversión total para el sistema de desinfección utilizando la técnica de la fotosensibilización fue de \$4015.48 pesos mexicanos (Tabla 15, ver anexo 5). Se englobaron costos de los materiales para el tren de tratamiento, así como algunos insumos médicos y de laboratorio que se tuvieron que comprar para realizar el tratamiento, asimismo se abarcaron los costos del análisis de las muestras de agua en el laboratorio ECOSUR, sede San Cristóbal de las Casas y el laboratorio IQUISSA, ubicado en Tuxtla Gutiérrez.

CAPÍTULO VI

6.1. Discusión de resultados

La desinfección de aguas utilizando la técnica de fotosensibilización como tratamiento físico químico, basándose en el uso de dos agentes sensibilizadores como es el añil y el azul de metileno, de manera que el límite permisible (ausencia o no detectable) establecido en la NOM-127-SSA1-1994 sirvió como referencia para conocer la calidad bacteriológica del agua referente a los organismos Coliformes totales. De manera general, los resultados de las muestras de agua sobrepasan el límite establecido por la normatividad vigente, sin embargo, después de aplicar la desinfección usando la técnica de fotosensibilización se redujo la concentración de organismos Coliformes totales en las muestras de agua.

De acuerdo con la Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (2007), en las zonas rurales de México se implementan los métodos de desinfección como la radiación solar, concentrador solar y hervir el agua, mientras que los autores Jiménez *et al.* (2006) indican que el aprovechar la irradiación solar y material fotosensibilizador es apto para construir un sistema capaz de proporcionar agua potable a las pequeñas comunidades rurales.

En particular, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas predomina el clima Aw (cálido subhúmedo) según la clasificación de clima de Köppen, no obstante, de acuerdo con el SMN, la temperatura media del mes de octubre es de 25.4°C y para el mes de diciembre corresponde a 23.3°C. La temperatura ambiente que se registró durante el primer tratamiento fue de 23°C, mientras que en el segundo tratamiento, la temperatura ambiente fue de 25°C, de manera que los meses de noviembre a enero existe tendencia a bajas temperaturas y se asocia con la alta nubosidad y disminución de la radiación solar en dichas temporadas (Morillon, Saldaña, Castañeda, & Miranda, 2002).

De acuerdo a la cantidad de organismos Coliformes totales, las muestras colectadas resultaron estar alrededor de 24200 UFC/100 ml y 24000 NMP/100 ml en temporada de lluvias. Mientras que Toledo (2017), registró valores superiores a 1000 UFC/100 ml de organismos Coliformes totales en el tramo del Puente Belisario Domínguez, de igual forma dichos valores corresponden a la temporada de lluvias.

Por otro lado, la CONAGUA (2021) establece 8 parámetros como indicadores de calidad del agua superficiales (DBO₅, DQO, SST, CF, *E. coli*, Enterecocos, OD y toxicidad), datos de la CONAGUA a través del SINA (2019) indican la calidad del agua del Río Grijalva, específicamente en los tramos “PTAR Chiapa de Corzo”

(16°42'42.95"N, 93°1'38.86"O) y "Río Grijalva 22" (16°41'9.21"N, 93°0'36.98"O), clasifican a los tramos respectivos en semáforo rojo y verde. Cabe mencionar, que los tramos anteriores se señalan puesto que el área en donde se colectó la muestra se encuentra en medio de ambos tramos.

El agua de la planta de bombeo sin previo tratamiento resulta estar por encima de los límites de la normatividad correspondiente a los organismos Coliformes totales, en los meses de octubre y diciembre, de acuerdo al SINA (2018) a nivel estatal el municipio de Chiapa de Corzo presenta el 27.94% de la eficiencia de cloración. Desde el año 2000, según los autores Sánchez, Vargas & Méndez (2000), determinaron la necesidad para asegurar el abastecimiento y calidad bacteriológica para consumo humano en el estado, actualmente la calidad del agua se refleja en el 66.62% de eficiencia de cloración a nivel estatal, posicionándose en el último lugar de las 31 entidades federativas (SINA, 2018).

Con respecto a los fotosensibilizadores, los autores Sabbahi *et al.* (2010) especifican que el azul de metileno absorbe fuertemente en el rango de luz visible, con una longitud máxima de 662 nm, por lo tanto, lo anterior queda evidenciado en la gráfica 3, en donde los espectros de las concentraciones del azul de metileno se encuentran cercanos al espectro del blanco.

Por el contrario, los espectros de las concentraciones más altas (10 mg/ml – 6 mg/ml) de añil se atenúan, puesto que el color de las muestras tenían tonalidad azul marino. Además, en las muestras hubo presencia de residuos en forma de gránulos pequeños del colorante impidiendo el paso de la luz incidente. Por lo anterior, Castañeda (2019) menciona que el índigo está compuesto por indigotina, que a su vez es sólida e insoluble en agua, resaltando que dicho colorante es susceptible a la luz como factor de deterioro.

Después de aplicar el tratamiento en las muestras de agua, la primera desinfección se logró reducir 93.05% de organismos Coliformes totales, mientras que en la segunda desinfección se redujo el 85.41% de organismos Coliformes totales.

Para el primer tratamiento, la concentración 248.46 mg/ml de AM en el tratamiento aplicado fue elevado por lo que provocó una limitación de generación de oxígeno singlete, de modo que se reflejó en la poca inactivación de organismos Coliformes totales durante el proceso de la desinfección del tren de tratamiento.

Se sabe que en los procesos fotoquímicos de las micelas dentro de los datos interesantes es la eficiencia de generación de O₂, el azul de metileno presenta un alto rendimiento cuántico de O₂ Junqueira *et al.* (2002). Sin embargo, sí la concentración del fotosensibilizador es muy alta sobre la sustancia, sucede que el oxígeno singlete fotogenerado sea desactivado, lo que disminuye el rendimiento

cuántico de producción de oxígeno singulete, o bien, tras la inmovilización el tiempo de vida del estado excitado del fotosensibilizador sea más corto (García, 2005).

Otra cuestión importante a considerar es la influencia de la turbiedad del agua, ya que los niveles altos en turbiedad hacen requerir mayor tiempo de exposición de radiación UV-A y temperatura para remover microorganismos (Solarte *et al.*, 1997), en este sentido en temporada de lluvias se incrementan los valores de turbiedad (Ospina *et al.*, 2016), aunque según el SMN la temporada de lluvias corresponde de junio a septiembre, aunque en los meses de octubre y diciembre se presentan lluvias moderadas.

En el segundo tratamiento, utilizando el añil, se tuvo una eficiencia del 85.41% si bien, a la planta del Xiquilite se le atribuye características bactericidas y fungicidas (Leite *et al.*, 2006) y también presenta actividad antitumoral (Cardoso *et al.*, 2007). También los textiles teñidos con índigo tienen actividad bactericida (Ariizumi, 2004 citado por Sandoval *et al.*, 2006).

Ahora bien, en un estudio por Rossel *et al.*, (2020), el cual consistió en la desinfección de Coliformes totales y termotolerantes mediante radiación ultravioleta, tuvieron como influente la cantidad de 200 UFC/100 ml con 4 segundos como tiempo de exposición a los rayos UV, reduciendo a 0 UFC/ml. Otra investigación hecha por los autores Sabbahi *et al.* (2010), afirman reducir el 99% de Coliformes totales. Dichos autores utilizaron la concentración de 50 μ M de azul de metileno tras irradiar 2 horas y como influente tenían un valor inicial 1.1×10^4 de Coliformes totales.

Un estudio similar es el de Gutiérrez *et al.* (2006), evaluó el tiempo de inactivación de Coliformes totales y fecales en función a concentración 0.5011 mg/ml de Dióxido de Titanio (TiO₂) con exposición a radiación solar de 120 minutos, para los Coliformes totales, la muestra tenía un valor de 3500 NMP/100 ml, alcanzando una inactivación del 100%. Respecto a los Coliformes termotolerantes, la radiación es mucho más importante que la temperatura, puesto que estas bacterias resisten incrementos de la temperatura hasta casi 50°C sin causar mortalidades apreciables (Solarte *et al.*, 1997).

La importancia de la curva de calibración junto con el primer modelo matemático lineal (99.52%) y segundo modelo matemático potencial (99.25%), para el azul de metileno y el añil, respectivamente. En ambas curvas de calibración se relaciona directamente las concentraciones de las muestras y cuyo nivel de absorbancia.

La tonalidad del azul de metileno se ubicó en la región azul verdoso dentro del diagrama de cromaticidad, el río Grijalva presentó tonalidad naranja, en contraparte, el añil y el blanco, encontrándose en la región del color blanco. Desde luego, el color en cuerpos de agua natural podría reflejar la presencia de moléculas orgánicas

complejas derivadas de materias vegetales tales como hojas, ramas, etcétera (Martínez & Osorio, 2018).

El costo del proyecto apenas supera los \$ 4,000.00 pesos mexicanos, se incluyeron los costos del análisis de las muestras en los laboratorios los cuales representan la tercera parte de la inversión. Otros tratamientos solares, según Pérez (2008), el costo del equipo de un calentador solar oscila alrededor de los \$250 - \$500 USD, calentador solar cuesta entre \$100 - \$200 USD y el destilador solar aproximadamente \$75 - \$250 USD, todos dependen y varían de acuerdo al tamaño del equipo, no obstante no incluyen los gastos por análisis de las muestras de agua; mientras que, los costos del equipo de desinfección UV ronda entre \$1,000 hasta o más \$400,000 USD, dependiendo del caudal. Otros autores señalan que por 1 mg/l de hipoclorito de sodio cuesta alrededor de \$82 USD (Macedi & Noguti, 1998 citado por Jaramillo, 2010).

Por último, la desinfección constituye la etapa final de todo tratamiento del agua. Su práctica es aceptada en todo el mundo, y aunque la cloración es el método dominante, algunos países como Francia, Alemania y Canadá prefieren la desinfección con ozono. Además, también son empleadas otras opciones como la luz ultravioleta (UV), el yodo y la radiación gamma (CONAGUA, 2017). La técnica de fotosensibilización supone la generación, mediante absorción de luz, del estado excitado de un colorante, de manera que es capaz de ceder o transferir su exceso de energía a otra molécula presente en el medio circundante, obteniéndose un estado excitado de la misma (García, 2005).

6.2. Conclusiones

La calidad del agua del Río Grijalva sobrepasa el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994. Además, se reafirma la relación entre la deficiente aplicación de sistemas de desinfección del agua y la calidad de la misma, pese a que el estado se encuentra con una baja eficiencia de cloración a nivel nacional, a lo cual se convierte en una problemática latente.

El tren de tratamiento basado en estructuras de cpcv y en contenedores,

Actualmente, la terapia fotodinámica se utiliza principalmente en el campo de la medicina, sin embargo, dicha técnica puede aplicarse e integrarse a los sistemas de desinfección de aguas.

El tratamiento aplicado con fotosensibilizadores azul de metileno a una longitud de onda predominante de 620 nm-630 nm fue efectivo para la desinfección de agua, alcanzando una reducción de 93.05%, aunque la calidad bacteriológica (Coliformes Totales) no se encuentra dentro del parámetro establecido por la NOM-127-SSA1-1994 (ausencia o no detectable).

Se le atribuye a la baja eficiencia del sistema porque se comprobó que la dosis (248.46 mg/ml) del fotosensibilizador utilizada para el primer tratamiento fue alta, en comparación de dosis que otros autores ya han utilizado, por lo tanto, al tener una concentración elevada del agente sensibilizador la producción de oxígeno singulete disminuyó, afectando directamente al rendimiento cuántico del mismo.

Utilizar un colorante natural como el añil, resultó ser efectivo como agente sensibilizador. Si bien, aunque no hay antecedente de dicho colorante utilizado para el tratamiento de aguas, presentó 85.04% de remoción de organismos de Coliformes totales, siendo este colorante comprometedor para futuras investigaciones puesto que al provenir de la planta del Xiquilete y por procesos tradicionales, dichos procesos de producción dañan menos al ambiente en contraste de un colorante como el azul de metileno, garantizando el futuro científico.

De manera general, se contempló la relación entre sólidos presentes en el agua, la disminución de la eficiencia de la desinfección, la radiación solar en temporada de frío y la temperatura ambiente, intervinieron para reducir la efectividad de la desinfección, puesto que en comparación de otros estudios se realizaron en temporadas de verano, siendo las condiciones meteorológicas más altas que en el presente estudio obtuvieron resultados más elevados.

Los modelos matemáticos junto con la curva de calibración servirán para las siguientes investigaciones, al momento que requieran utilizar concentraciones ya

sea del añil o del azul de metileno, solo es cuestión de emplear las ecuaciones (lineal y potencial) para que obtengan los resultados que requieren.

La representación gráfica de los colores en el diagrama de cromaticidad, en el caso de la muestra de agua del Río Grijalva probablemente se encontró en la región del color naranja porque existe una relación con la turbiedad y los sólidos que habían en el agua. No obstante, se considera intrigante la ubicación del añil en el diagrama de cromaticidad ya que se esperaba que su ubicación en la región del color azul púrpura o púrpura azulado.

Al considerarse de un líquido tan significativo como el agua en relación con la calidad, es necesario y urgente garantizar la potabilización tanto como la distribución y almacenamiento del agua en la entidad federativa, ya que hay una relación proporcional entre la contaminación por microorganismos y las enfermedades gastrointestinales en la población. También, es importante la sensibilización y concientización del uso racional, así como las consecuencias negativas del uso del agua.

Al tren de tratamiento se consideró factible en términos de costos en comparación con los sistemas convencionales como la cloración. Además, a diferencia de algunos tratamientos de solares los valores sobrepasan y otros costos son similares, aunque en los tratamientos solares no se incluye los precios de análisis de muestras de aguas.

Aunque la cloración sea el método más común utilizado como sistema de desinfección, es importante tener en cuenta otros sistemas cuyos costos sean menores y asegurando la efectividad del tratamiento, además de ajustarse a las condiciones y recursos del estado, particularmente en comunidades rurales que son lugares en donde no se asegura la calidad del agua.

6.3. Recomendaciones

Al no contar con la disposición completa del laboratorio, significó y en consecuencia provocó muchas limitantes y a su vez la generación de las alternativas para cada situación, como se mencionó anteriormente, se tuvo que sustituir en la medida posible los insumos de laboratorio por insumos médicos y se logró continuar con el desarrollo del sistema de desinfección.

Al tener un tren de tratamiento con conexiones de tubos de cpvc resulta ser liviano, a su vez este puede ser desplazado fácilmente por ráfagas de vientos.

Se sugiere que haya higiene adecuada al momento de realizar la desinfección del agua, con materiales previamente esterilizados (bidones y contenedores), con la finalidad de no alterar el agua tratada.

Con respecto al colorante añil, lo ideal es tritularlo con un mortero para tener partículas finas y haya una mezcla homogénea con el agua, ya que en este trabajo los pequeños gránulos representaron una limitante, puesto que al principio el añil no se mezcló uniformemente con el agua.

Es necesario no dejar que una fuente de luz que no se requiera influya en las mediciones de los espectros, ya que el sensor o la fibra óptica suelen ser sensibles captando la luz.

También se sugiere estudiar con concentraciones más bajas ya sea del colorante de azul de metileno y añil, respectivamente, con menor tiempo de exposición y aplicar el tratamiento en periodo de estiaje, puesto que la radiación solar aumenta y resulta interesante la comparación entre el comportamiento de temporadas de lluvias y estiaje mismo para tener una idea más amplia del funcionamiento de la técnica de la fotosensibilización.

La técnica de fotosensibilización es una etapa de desinfección, por lo que se sugiere aplicar las etapas primarias y secundarias del tratamiento de agua para obtener mejores resultados, ya que en el presente estudio se aplicó directamente como sistema de desinfección del agua.

Para tener un conocimiento general de la calidad del agua, es necesario caracterizar diferentes parámetros fisicoquímicos (turbiedad, pH, sólidos totales, DBO, DQO, etc.) y demás microbiológicos (*E. coli*, *virus*, etc.) entre otros parámetros.

Referencias

- Alcantara, P. (2002). Espectroscopia Molecular. *Universidade Federal Do Pará*, 1–5.
- Allison, R., & Moghissi, K. (2013). Photodynamic therapy (PDT): PDT mechanisms. *Clinical Endoscopy*, 46(1), 24–29. <https://doi.org/10.5946/ce.2013.46.1.24>
- Allison, R. R., Mota, H. C., & Sibata, C. H. (2004). Clinical PD/PDT in North America: An historical review. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 1(4), 263–277. [https://doi.org/10.1016/S1572-1000\(04\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S1572-1000(04)00084-5)
- Anaya, K. (2012). *Actividad FOTOCATALÍTICA DE UNA HETEROESTRUCTURA DE TiO₂/SnO₂:F/SUSTRATO EN UNA SOLUCIÓN DE AZUL DE METILENO*. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Andrés, M. S., Sancho, N., & De la Roja, M. (2010). Alquimia : Pigmentos y colorantes históricos. *Real Sociedad Española de Química*, 106(1), 58–65.
- Arenas, I., & López, J. L. (2004). *Espectrofotometría de absorción*.
- Arreguín, F., Alcocer, V., Marengo, H., Cervantes, C., Albornoz, P., & Salinas, M. (2010). Los retos del agua. In B. Jiménez, M. Torregrosa, & L. Aboites (Eds.), *E agua en México: Cauces y encauces* (Academia M, pp. 51–77).
- Bataller, M., Fernández, L., Véliz, E., & Álvarez, C. (2007). Impacto económico y calidad microbiológica de aguas tratadas con ozono. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 38(1), 231–236.
- Cardoso, J. R., De Souza, I. A., Do Nascimento, S. C., & Pereira, S. (2007). Indigofera suffruticosa: An alternative anticancer therapy. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 4(3), 355–359. <https://doi.org/10.1093/ecam/nel102>
- Carmona, J., Torre, D., & Javier, H. (2017). Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico por consumo de agua en San Cristóbal de Las Casas ,.

Tecnología y Ciencia Del Agua, VIII(1), 133–153.

Casierra, H., Cassalins J., Vargas, X., & Caselles, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y Ciencia Del Agua*, VII(4), 97–111.

Castañeda, M. (2019). El índigo en la pintura de caballete novohispana: mecanismos de deterioro. *Intervención, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología*, 10(19), 25–35.
<https://doi.org/10.30763/intervencion.2019.19.206>

Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2019). *Healthy Water*. Water, Sanitation & Hygiene-Related Observances.
<https://www.cdc.gov/healthywater/observances/wwd-esp.html>

Centre for Affordable Water and sanitation technology CAWST. (2009). *Manual para el filtro de bioarena. Diseño, construcción, operación y mantenimiento*.
https://www.calvin.edu/academic/engineering/senior-design/SeniorDesign09-10/team02/web/Biosand_Manual_Spanish.pdf

Christian, G. (2009). *Química Analítica (Sexta)*. McGraw Hill.

Chulluncuy, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29, 153–170. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>

CONAGUA, & SEMARNAT; (2010). Manual De Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento. In Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ed.), *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas aireadas*.

CONAGUA. (2021). *Calidad del agua en México*.
<https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>

CONAGUA, & SEMARNAT. (2018). *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO*.

Contreras, A. del C. (2010). Biodiversidad perdida: el caso de los colorantes. *Biodiversidad y Desarrollo Humano En Yucatán*, 14, 368–372.

<http://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Sitios/Biodiversidad/pdfs/Cap7/16 Biodiversidad perdida.pdf>

CONAPO. (2015). *Situación demográfica de México. Base de datos*. México: Consejo Nacional de Población.

Cortés, F., Treviño, A., & Tomasini, A. (2017). *Dimensionamiento de lagunas de estabilización* (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (ed.); Primera). https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/dimensiones-lagunas/files/assets/common/downloads/publication.pdf

De Paula, L., Santos, R., Menezes, H., De Britto, J., Vieira, J., Gontijo, P., & De Oliveiraa, C. (2010). A comparative study of irradiation systems for photoinactivation of microorganisms. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 21(4), 694–700. <https://doi.org/10.1590/s0103-50532010000400016>

Díaz, N., Bárcera, J., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., Meléndez, F., & Túnez, I. (2009). *Espectrofotetría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*.

Dougherty, T. J. (1960). Photodynamic Therapy (PDT) Of Malignant Tumors. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 2(2), 83–116.

Faviel, E., Infante, D., & Molina, D. (2019). Percepción y calidad de agua en comunidades rurales del área natural protegida la encrucijada, Chiapas, México. *Int. Contam. Ambie.*, 35(2), 317–334. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.05>

Fekrazad, R., Zare, H., & Vand, S. M. S. (2016). Photodynamic therapy effect on cell growth inhibition induced by Radachlorin and toluidine blue O on Staphylococcus aureus and Escherichia coli: An in vitro study. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 15, 213–217. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2016.07.001>

Ferro, F., Ferró, P. F., & Ferró, A. L. (2019). Distribución temporal de las enfermedades diarreicas agudas, su relación con la temperatura y cloro residual del agua potable en la ciudad de Puno, Perú. *Revista de*

Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 21(1), 69–80.
<https://doi.org/10.18271/ria.2019.446>

García, D. (2005). Fotosensibilización y el sensibilizador: síntesis, propiedades y limitaciones. In *Solar Safe Water*.

García, D. (2010). GENERACIÓN FOTOSENSIBILIZADA DE OXÍGENO SINGLETE. *TECNIA*, 20(1), 5–11.

García, M. (2009). La contaminación del agua. In *Biología y Geología* (Issue December, pp. 12–14).

González, J. A., Bernal, P. G., Linares, D., & Crown, E. M. (2012). Desarrollo de Formulado para Teñido Orgánico con Añil. *Realidad y Reflexión*, 36(36), 41–67. <https://doi.org/10.5377/ryr.v36i0.3614>

Gutiérrez, C., Robles, L., Ortiz, F., & Martínez, L. (2006). DESINFECCIÓN FOTOCATALÍTICA DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO USANDO LUZ SOLAR Y DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) INMOVILIZADO. In *Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental*.

Halliday, D., Resnik, R., & Walker, J. (2009). *Fundamentos da física: óptica e física moderna* (Livros Técnicos e Científicos (ed.); Octava).

Hanan, A. M., & Mondragón, J. (2009). *Indigofera suffruticosa*. Ficha Informativa: CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/indigofera-suffruticosa/fichas/ficha.htm>

Harris, D., & Bertolucci, M. (2000). *Symmetry and Spectroscopy*. Dover Publications.

Harris, D. C. (2016). *Análisis químico cuantitativo* (Reverté (ed.); Sexta).

Hasegawa, G., Lopes, J., Soares, M., & Freitas, A. (2015). Photodynamic inactivation of *Escherichia coli* by methylene blue and malachite green under red LED light. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>

Hewitt, P. G. (2009). *Fundamentos de física conceptual* (Pearson Educación (ed.);

Primera).

Holler, J., & Crouch, S. R. (1982). *Fundamentos de química analítica* (Cengage Learning (ed.); Novena).

INESA. (2013). *Instituto Estatal de Agua del Estado de Chiapas. El agua en Chiapas*. <http://www.aguas.org.mx/sitio/publicaciones/el-agua-en-chiapas/el-agua-en-chiapas.pdf>

Jaramillo, C. (2010). *Desinfección del agua para uso humano*. Escuela Politécnica Nacional.

Jiménez. (2010). DESINFECCIÓN DE AGUAS MEDIANTE OXÍGENO SINGLETE WATER DISINFECTION BY SINGLET OXYGEN. *TECNIA*, 20(2), 15–21.

Jiménez, M. E., Manjón, F., García, D., & Orellana, G. (2006). Solar water disinfection by singlet oxygen photogenerated with polymer-supported Ru(II) sensitizers. *Solar Energy*, 80(10), 1382–1387. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.027>

Junqueira, H., Severino, D., Dias, L., Gugliotti, M., & Baptista, M. (2002). Modulation of methylene blue photochemical properties based on adsorption at aqueous micelle interfaces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 4(11), 2320–2328. <https://doi.org/10.1039/b109753a>

Larrea, J., Rojas, M., Romeu, B., Rojas, N., & Heydrich, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas : revisión de la literatura. *CENIC Ciencias Biológicas*, 44(3), 24–34.

Leal, M. (2005). Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. *Solar Safe Water*, 4, 63–72. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tecnolog?as+convencionales+de+tratamiento+de+agua+y+sus+limitaciones#0>

Leite, S. P., Cardoso, J. R. C., De Medeiros, P. L., Pereira, R. M. P., De Menezes Lima, V. L., Satiro, H., & De Oliveira Lima, E. (2006). Antimicrobial activity of *Indigofera suffruticosa*. *Evidence-Based Complementary and Alternative*

- Medicine*, 3(2), 261–265. <https://doi.org/10.1093/ecam/nel010>
- Madera Gómez, S. (2016). Complementariedad, identidad y contradicción en la lógica de Niels Bohr. *Sophía*, 2(21), 101–118. <https://doi.org/10.17163/soph.n21.2016.04>
- Maldonado, J., Casañas, R., Martínez, I., & San Martín, E. (2018). La espectroscopia UV-Vis en la evaluación de la viabilidad de células de cáncer de mama. *Latin-American Journal of Physics Education*, 12(2), 7.
- Manjón, F. (2011). *Tecnología solar para la desinfección de agua en áreas rurales mediante producción fotosensibilizada de O₂*. Universidad Complutense de Madrid.
- Marín, R. (2018). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: tratamiento y control de calidad de aguas* (Díaz de Santos (ed.); Segunda). <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788490522103.pdf>
- Martínez, M., & Osorio, A. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en el agua. *Facultad de Ciencias*, 7(1), 143–155. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v7n1.68086>
- Martínez, S. I. (2014). Azul maya un colorante natural. *La Ciencia y El Hombre*, 27(1), 40–42. <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol27num1/articulos/interacciones-beneficas.html>
- Mehdi, M., Hashemi, H., & Mohammadi, B. (2013). A review on wastewater disinfection. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 2(1), 22. <https://doi.org/10.4103/2277-9183.113209>
- Menéndez, C., & Díaz, M. (2009). *Lagunas, diseño, operación y control*.
- Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 19–29.

- Morrison, R. T., & Boyd, R. N. (1998). *QUÍMICA ORGÁNICA* (Pearson (ed.); Quinta).
- National Cancer Institute (NIH). (2011). *Cancer treatment*. Photodynamic Therapy for Cancer. <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/cirugia/hoja-informativa-terapia-fotodinamica#191qu233-tipos-de-c225ncer-se-tratan-actualmente-con-la-terapia-fotodin225mica>
- Noriega, M., Quintero, C., Guajardo, J., Morales, J., Compeán, M., & Ruiz, F. (2012). Desinfección y purificación de agua mediante nanopartículas metálicas y membranas compósitas. *Tecnología y Ciencias Del Agua, III*, 87–100.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-127-SEMARNAT-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, 22 de noviembre de 2000.
- OMS. (2019). *Guías para la calidad del agua potable* (OMS (ed.); Tercera ed).
- Orellana, G. (2005). Desinfección mediante fotosensibilizadores: principios básicos. In *Solar Safe Water* (pp. 1–47).
- Orellana, G., Villén, L., & Emilia, M. (2011). Desinfección mediante fotosensibilizadores : principios básicos. *Solar Safe Water, 15*(sección 4), 243–258.
- Ospina, O., García, G., Gordillo, J., & Tovar, K. (2016). Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia). *Ingeniería Solidaria, 12*(19), 19–36. <https://doi.org/10.16925/in.v12i19.1191>
- Owen, T. (1996). Fundamentals of modern UV-visible spectroscopy. In *Hewlett-Packard Company*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pantoja, J. C., Proal, J. B., García, M., Cháirez, I., & Osorio, G. I. (2015). Eficiencias comparativas de inactivación de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotólisis (UV) y por fotocátalisis (UV/TiO₂/SiO₂). Caso: Depuradora de

- aguas de Salamanca, España. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 14(1), 119–135.
- Pavia, D., Lampman, G., Kriz, G., & Vyvyan, J. (2007). Introduction a spectroscopy. In *Quimica Nova* (Vol. 30, Issue 7). <https://doi.org/10.1590/s0100-40422007000700048>
- Peranovich, A. (2019). *Enfermedades transmitidas por el agua en Argentina y Brasil a principios del siglo XXI Waterborne diseases in Argentina and Brazil at the beginning of the 21st century*. 297–309. <https://doi.org/10.1590/S0104-12902019180378>
- Pérez, H. (2008). *Acciones desinfectantes en la potabilización del agua en pequeñas comunidades (Trabajo de grado)*.
- Raty, J., Peiponen, K.-E., & Asakura, T. (2004). UV-visible reflection spectroscopy of liquids. *Choice Reviews Online*, 42(02), 42-1006-42–1006. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.42-1006>
- Ríos, S., Agudelo, R., & Gutiérrez, L. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Fac. Nac. Salud Pública*, 35(2), 236–247. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08>
- Robert, M. (2014). Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba. *CENIC Ciencias Biológicas*, 45(1), 25–36.
- Rossel, L., Ferro, F., Ferro, A. L., & Zapana, R. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(1), 68–77. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.537>
- Rubio, A., Chica, E., & Gustavo, P. (2014). Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Sabbahi, S., Alouini, Z., Ben, L., & Jemli, M. (2010). Inactivation of faecal bacteria in wastewater by methylene blue and visible light. *Desalination and Water*

Treatment, 20, 209–219. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1171>

Sánchez-Pérez, H. J., Vargas-Morales, M. G., & Méndez-Sánchez, J. D. (2000). Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas. *Salud Pública de México*, 42(5), 397–406. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342000000500005>

Sandoval, F., Gschaedler, A., Vilarem, G., & Méndez, C. (2006). Efecto del tiempo de cosecha sobre la producción de colorantes en *Indigofera suffruticosa* Mill. *Agrociencia*, 40(5), 585–591.

Servicio Meteorológico Nacional. (n.d.). *Climatología*. Normales Climatológicas Por Estado. Retrieved April 28, 2021, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chis>

Serway, R., & Vuille, C. (2012). *Fundamentos de Física* (Cengage Learning (ed.); Novena).

SINA. (2018). Obtenido de Calidad del agua: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>

SINA. (2018). *Agua y Salud*. Obtenido de Eficiencia de cloración por municipio: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=aguaSalud>

SINA; COFEPRIS. (2018). *Agua y salud*. Obtenido de Mortalidad por enfermedades diarreicas (2014-2018): <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=aguaSalud&ver=reporte&o=1&n=nacional>

Sing, O. L. (1997). *Colorantes naturales* (Pontificia Universidad Católica del Perú (ed.); Primera). https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LjmH_3qjaEIC&oi=fnd&pg=IA7&dq=colorantes&ots=mLtvfpp5ry&sig=Vfnu5uz9srTGml2nqQ2p_WdfcG0#v=onepage&q&f=false

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

proceso. *ColombiaMédica*, 28(3), 109–112.

Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento, C. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. [ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros/pdf_2007/Desinfecci%F3n para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento.pdf](ftp://ftp.conagua.gob.mx/Mapas/libros/pdf_2007/Desinfecci%F3n_para_Sistemas_de_Agua_Potable_y_Saneamiento.pdf)

Toledo, M. (2017). *Estudio preliminar de la calidad del agua en pozos localizados entre la C.H. Belisario Domínguez y la C.H. Manuel Moreno Torres (Tesis de licenciatura)*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

Trujillo, L., García, N., Orantes, O., & Cuesy, M. (2014). Salud-Enfermedad-Atención en Chiapas , México. *Una Visión Académica*, 3(4), 108–140.

Vanegas, C. M., & Fonseca, C. M. (2019). *La reflexión y la dispersión de la luz en el museo de ciencias* (Issue April).

Villén, L., Manjón, F., García-Fresnadillo, D., & Orellana, G. (2006). Solar water disinfection by photocatalytic singlet oxygen production in heterogeneous medium. *Applied Catalysis B: Environmental*, 69(1–2), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.05.015>

Anexos

Anexo 1. Eficiencia de cloración por municipio

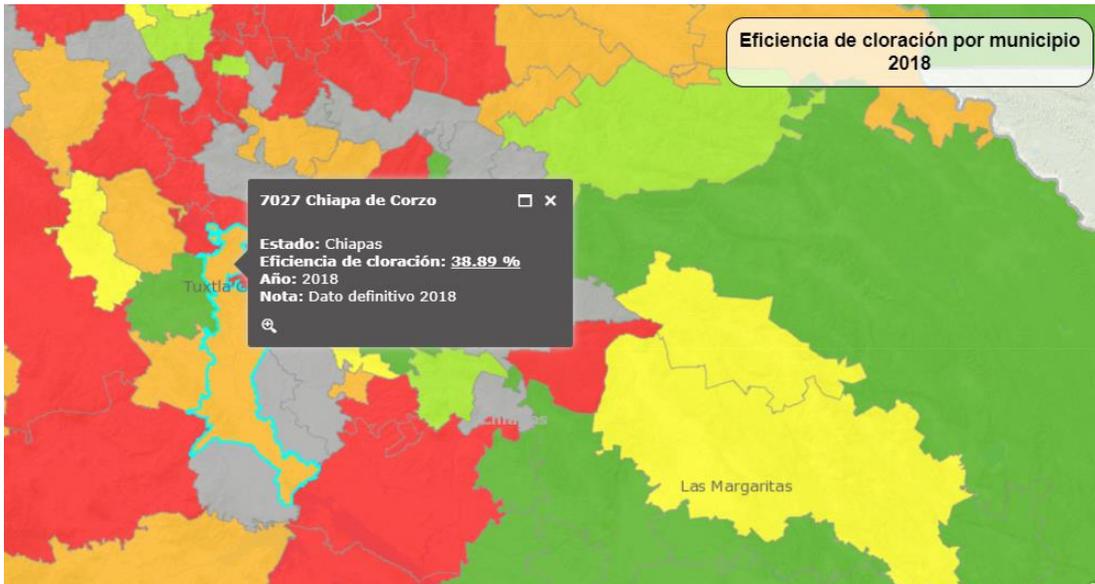


Fig. 30. Eficiencia de cloración en el municipio de Chiapa de Corzo en el 2018. Fuente: COFEPRIS, SINA (2018).

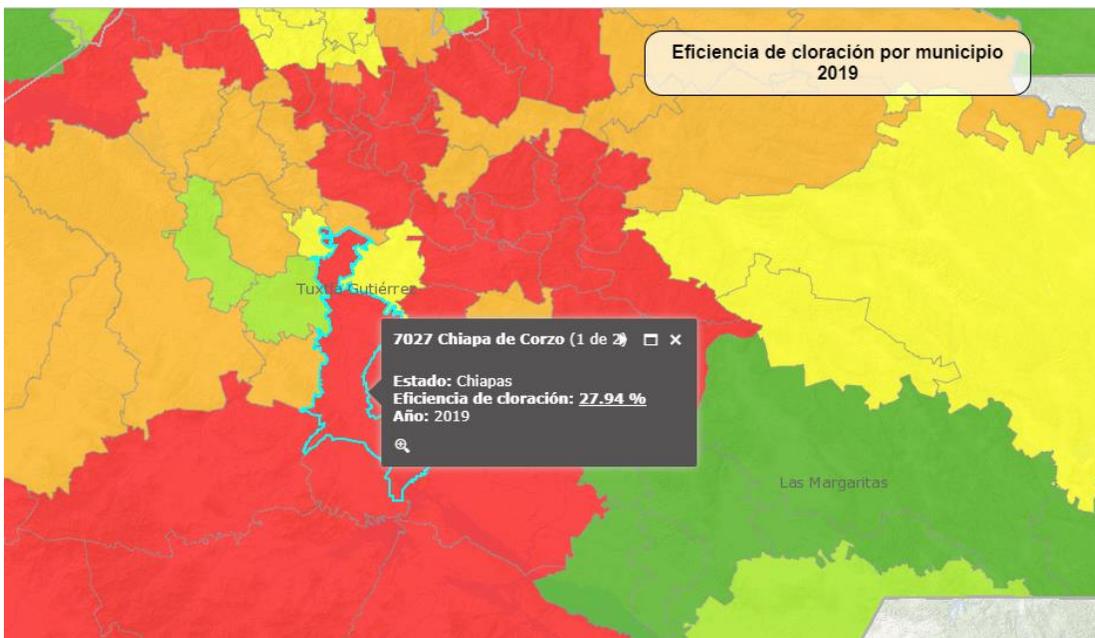


Fig. 31. Eficiencia de cloración en el municipio de Chiapa de Corzo en el 2019. Fuente: COFEPRIS, SINA (2019).

Anexo 2. Mortalidad por enfermedades diarreicas.

Entidad Federativa	Tasa de mortalidad por cada 100 mil menores de 5 años 2004	Tasa de mortalidad por cada 100 mil menores de 5 años 2018
Aguascalientes	6.92	2.37
Baja California	13.69	1.96
Baja California Sur	5.46	1.38
Campeche	11.39	3.53
Coahuila de Zaragoza	9.41	2.24
Colima	8.49	3.11
Chiapas	64.56	23.92

Fig. 32. Mortalidad por enfermedades diarreicas (2004-2018) Fuente: Secretaría de Salud (2018) Sistema Nacional de Información de Agua (SINA).

Anexo 3. Diferencias entre los tratamientos convencionales para el agua.

Tabla 12. Tecnologías convencionales de potabilización de agua y sus limitaciones.

Tratamiento convencionales	Ventajas	Desventajas
Filtros de arena	Destruyen algas, bacterias y materia orgánica. Bajo costo	No remueven turbiedad elevada y requieren grandes superficies, pues operan a velocidades pequeñas.
Filtros de carbón activado	Remueve mal olor, sabor. Costo bajo de inversión, costo medio de mantenimiento.	Mantenimiento a menudo para evitar obstrucciones de tuberías. No remueven bacterias Genera residuos.
Cloro	Remueve patógenos microbianos. Costo bajo de inversión.	El hipoclorito de sodio y de calcio, son corrosivos. Olor muy fuerte Generación de subproductos halogenados
Ozono	Dosis menores que el cloro	No produce subproductos halogenados. Se requiere de voltajes elevados. El mantenimiento y operación son muy caros.
Luz Ultravioleta	No genera residuos tóxicos o subproductos. Destruye virus y bacterias. Costo medio de inversión y operación.	Su incapacidad para inactivar protozoarios. Ineficiencia para tratar aguas turbias con Sólidos suspendidos.
Ósmosis inversa	Remueve virus, bacterias, parásitos y materia orgánica e inorgánica	Costo muy elevado de inversión.

Fuente: Leal, 2005.

Tabla 13. Comparación de los diferentes métodos de desinfección.

Toxicidad a microorganismos	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Solubilidad	Ligera	Alta	Alta	Alta	No aplica
Estabilidad	Estable	Ligeramente estable	Relativamente estable	Inestable	Debe generarse al usarse
Toxicidad a formas de vida superiores	Alta	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico
Homogeneidad	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	No aplica
Interacción con materia extraña	Oxida materia orgánica	Oxidante activo	Oxidante activo	Oxida materia orgánica	Moderada
Toxicidad a temperatura ambiente	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Corrosión	Alto	Corrosivo	Corrosivo	Alto	No aplica
Costo	Bajo	Bajo a moderado	Bajo a moderado	Bajo a moderado	Moderado a alto

Fuente: Metcalf y Eddy, 1991 citado por CONAGUA, 2007

Anexo 4. Fotografías de evidencia



Fig. 33. Evaluación de las variables (temperatura, volumen, tiempo) del tren de tratamiento.

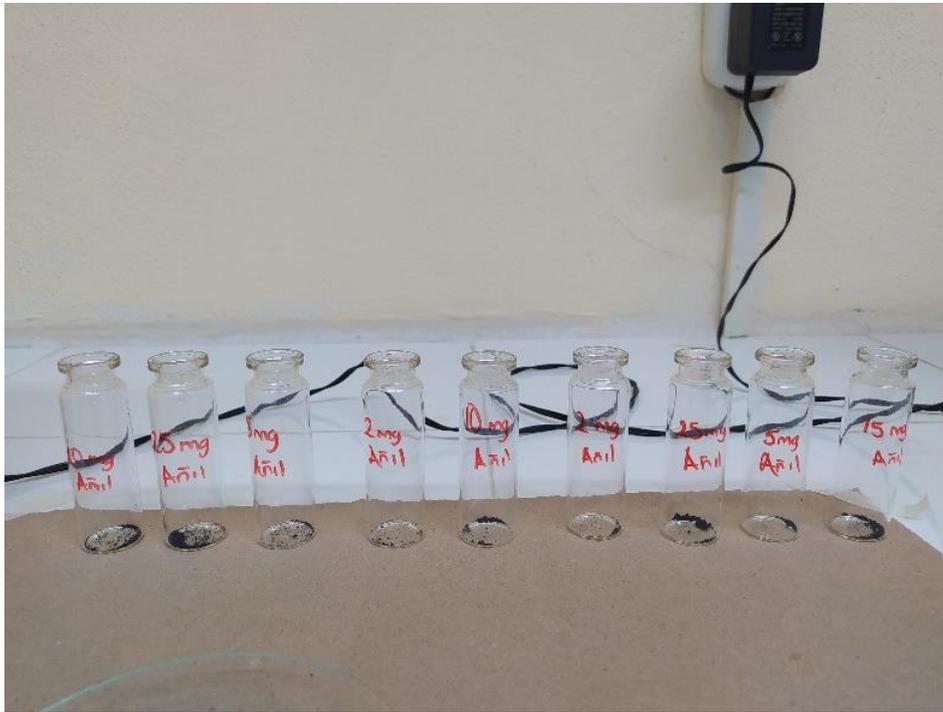


Fig. 34. Diferentes masas de añil respectivamente pesadas.

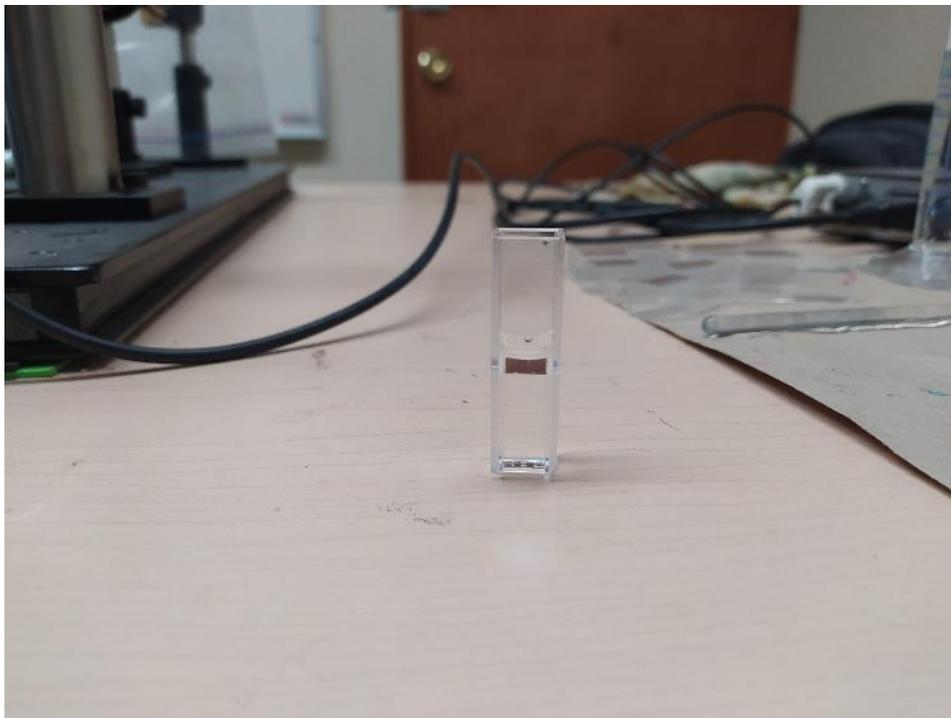


Fig. 35. Cubeta de plástico con agua destilada utilizada como blanco.

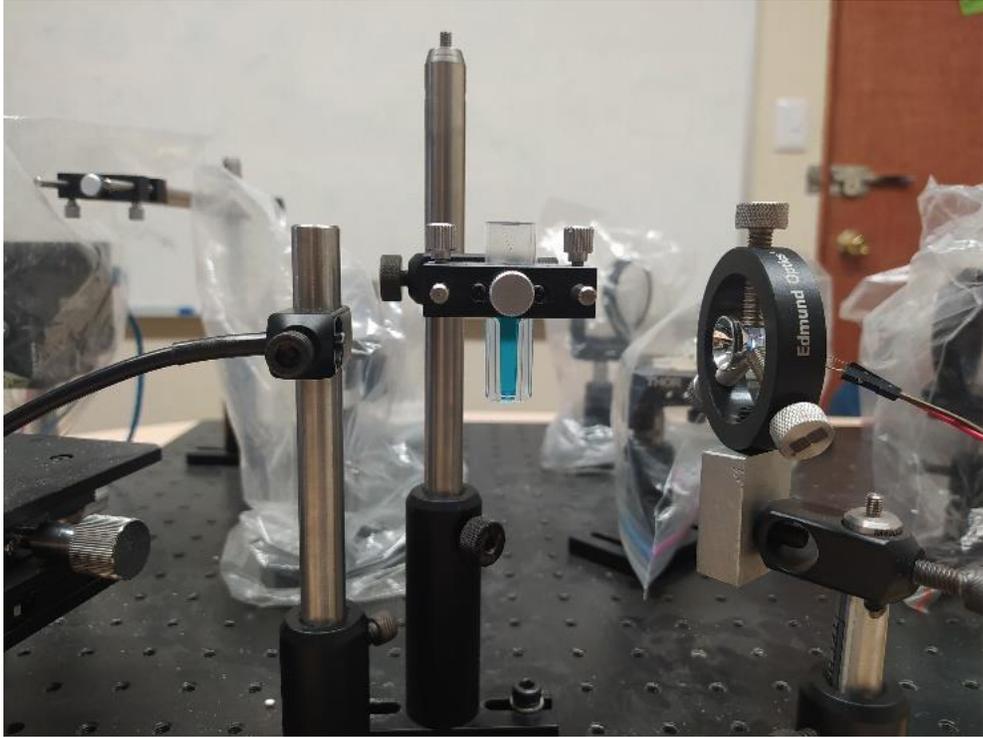


Fig. 36. Medición de absorbancia de la solución de AM con una concentración de 10 mg/ml.

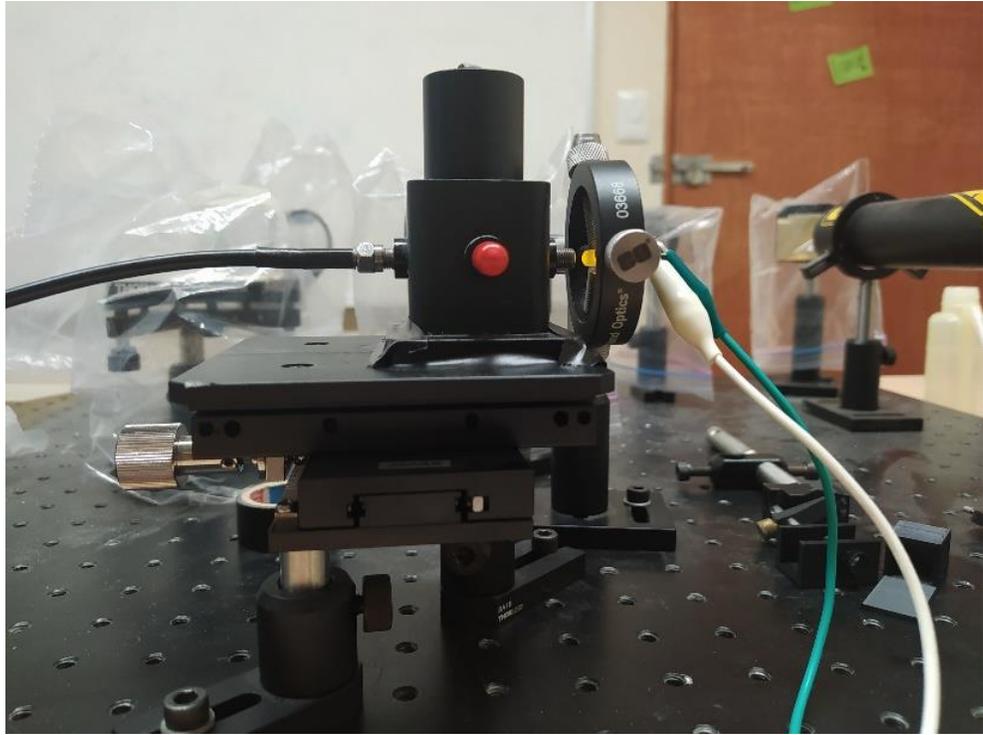


Fig. 37. Medición de espectro de absorbancia de añil.



Fig. 38. Colecta y toma de temperatura del agua de la Planta de Bombeo Culati, Chiapa de Corzo.



Fig. 39. Colecta de la muestra de agua para posterior análisis microbiológico en la Planta de Bombeo Culati, Chiapa de Corzo.



Fig. 40. Muestra colectada de la salida del tren de tratamiento.

Tabla 14. . Etiqueta para las muestras de agua colectadas.

Número de muestra	
Fecha	
Hora	
Temperatura de la muestra	
Procedencia	
Responsable	
Tipo de agua	

Anexo 5. Tabla de costo de materiales e insumos para el sistema de desinfección.

Tabla 15. Costo de inversión para el sistema de desinfección utilizando la técnica de fotosensibilización.

Insumo	Capacidad	Unidad de medida	Cantidad	Precio unitario (\$ MXN)	Total (\$)
<i>Materiales para el tren de tratamiento</i>					
Tubos de cpvc 1/2"	1	metro	10	25	250
Codos 90°	1/2	Pulgada	48	5	240
Codos 45°	1/2	Pulgada	8	5	40
Tee	1/2	Pulgada	14	20	280
Tuerca unión	1/2	Pulgada	4	53	212
Válvulas de globo	1/2	Pulgada	4	52	208
Cinta teflón			1	9	9
Cemento para cpvc	50	Gramos	1	31	31
Silicón	1	Gramos	2	38.91	77.82
Contenedores	3.5	litros	4	15	60
Bidón industrial	20	litros	2	72	144
Bidón	10	litros	2	72	144
<i>Colorantes</i>					
Azul de metileno	500	ml	1	67	67
Añil	100	gramos		200	200
<i>Equipo y otros insumos</i>					
Agua destilada	6	litros	6	5	30
Equipo de venoclisis			4	22.95	91.8
Bolsa para enema	1	litro	3	48.62	145.86
Jeringa	1	ml	4	3.65	14.6
	10	ml	4	4.65	18.6

	20	ml	4	5.95	23.8
Guante cirujano estériles		Pares	6	5	30
Bolsas estériles	500	ml	4	10	40
Vaso de precipitado	150	ml	1	48	48
Piceta	250	ml	1	70	70
Frascos de vidrio	250	ml	4	60	240
<i>Análisis de muestra</i>					
Tratamiento 1			2	518	1036
Tratamiento 2			2	232	464
Total (MXN)					4215.48

Anexo 6. Evidencia fotográfica de la aplicación del tratamiento



Fig. 41. Primer tratamiento utilizando como agente sensibilizador el azul de metileno.



Fig. 42. Segundo tratamiento utilizando como agente sensibilizador el añil.



Fig. 43. Sólidos sedimentados en el bidón 1, después del tratamiento