



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

ESCUELA SUPERIOR TEPEJI DEL RÍO

LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS

**DETERMINACIÓN DE AZUL DE METILENO PRESENTE EN AGUAS
RESIDUALES ASISTIDA POR MONITOREO CAÓTICO EN LA PRESA
REQUENA DE TEPEJI DEL RÍO DE OCAMPO**

Para obtener el grado de
Licenciada en Ingeniería Industrial

PRESENTA

Norma Jacqueline Almanza Villegas

Director (a)
Dra. Lizeth Martínez Ayala

Codirector (a)
Dr. Hilario Martines Arano

Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo. México., abril 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Escuela Superior de Tepeji del Río
Campus Tepeji del Río

Oficio Núm. ESTe- 131-2025

ASUNTO: Autorización de impresión de tesis

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH
P R E S E N T E

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo 1, Artículo 34 y Artículo 40 del Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo le comunico que el jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Ingeniería Industrial **Norma Jacqueline Almanza Villegas** con número de cuenta 353653, quien presenta el proyecto terminal de tesis denominado **"Determinación de azul de metileno presente en aguas residuales asistida por monitoreo caótico en la presa Requena de Tepeji del Río de Ocampo"**, que después de revisar el trabajo de reunión de sinodales, ha decidido autorizar su impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad los miembros del jurado:

PRESIDENTE: Dra. Lizeth Martínez Ayala

SECRETARIO: Dr. Hilario Martines Arano

PRIMER VOCAL: Dr. Jhovani Enrique Bornacelli Camargo

SEGUNDO VOCAL: Dr. Heberto Gómez Pozos

SUPLENTE: Dra. María R. Jiménez Vivanco

Sin otro particular por el momento, le reitero la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente

"Amor, Orden y Progreso"

Tepeji del Río de Ocampo, Hgo. a 27 de febrero de 2025

Mtro. Guadalupe Israel Flores Ariza
Director de la Escuela Superior Tepeji del Río



Avenida del Maestro No. 41, Colonia Noxtongo
Segunda Sección, Tepeji del Río de Ocampo,
Hidalgo, México; C.P. 42855
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 5850
estr@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

Dedicatorias

Le dedico esta tesis a mis padres que siempre han estado presentes en mi vida, por sus consejos, por su apoyo y confianza.

A mis hermanas Michelle y Nury, quienes han sido una parte fundamental de mi vida personal y académica, por sus palabras de aliento, gracias por su apoyo incondicional. Y a mi pequeña hermana Wendy siempre sacándome una sonrisa.

Agradecimientos

Esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de algunas instituciones y personas a las que quiero mostrar mi más profundo agradecimiento.

Agradezco a todos los académicos de la UAEH Escuela Superior Tepeji, por todo el conocimiento que adquirí gracias a ellos estos cuatro años y medio de carrera. Al laboratorio de Nanotecnología-ESTe por ser un espacio donde pude realizar prácticas para la realización de esta tesis.

A la Dra. Cristina Zorrilla Cangas, Dr. Raúl Herrera Becerra y Dra. María R. Jiménez Vivanco del Instituto de Física UNAM por el apoyo en la caracterización del espectrofotómetro UV-Visible; Dr. Francisco Morales Morales del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por su apoyo en la caracterización MEB y EDS.

Al comité sinodal Dr. Jhovani Enrique Bornacelli Camargo, Dr. Heberto Gómez Pozos, Dra. María R. Jiménez Vivanco, Dra. Lizeth Martínez Ayala y al Dr. Hilario Martines Arano.

A mi directora de tesis la Dra. Lizeth Martínez Ayala no puedo expresar mi gratitud por toda la paciencia, orientación, apoyo, enseñanza y tiempo que tomó al explicarme y responder todas mis dudas, gracias por todo lo que me brindó para la realización de esta tesis y a la contribución de mi crecimiento académico.

A mi Co-director el Dr. Hilario Martines Arano por compartir su conocimiento, su experiencia, tiempo y esfuerzo, su apoyo ha sido invaluable durante todo el proceso de investigación de tesis, su contribución fue fundamental para lograr este importante logro en mi vida académica.

A la Escuela Superior de Tepeji del Río de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, al laboratorio de fotónica de ESIME IPN Zacatenco, Instituto de Física UNAM y Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías (CNMN) del Instituto Politécnico Nacional IPN, por su apoyo.

Índice

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	6
Abstract.....	8
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Definición del problema.....	11
1.2 Justificación.....	12
1.3 Objetivos.....	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
Capítulo 2. Marco Teórico	
2.1 Aguas residuales.....	16
2.2 Tipos de aguas residuales.....	17
2.3 Contaminación de aguas residuales.....	18
2.3.1 Problemática ambiental en la presa Requena.....	19
2.3.2 Contaminación por azul de metileno.....	24
2.4 Indicadores de la calidad en aguas residuales.....	25
2.5 Técnicas para determinar la calidad en aguas residuales.....	26
2.5.1 Atractores caóticos.....	28
2.5.2 Teoría del caos.....	29
2.5.3 Tipos de atractores caóticos.....	30
2.5.4 Atractor caótico Rössler.....	31
Capítulo 3. Metodología Experimental	
3.1 Investigación.....	34

3.2 Obtención de materiales.....	34
3.3 Limpieza de recipientes.....	34
3.4 Localización de toma de muestra.....	36
3.5 Toma de muestra de agua residual.....	37
3.6 Almacenamiento de agua residual.....	39
3.7 Llenado de hoja de registro.....	39
3.8 Transporte de agua.....	41
3.9 Preservación de la muestra.....	42
3.10 Análisis de la muestra.....	42
3.10.1 Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-Vis).....	43
3.10.2 Atractor caótico Rössel.....	43
3.11. Monitoreo del atractor caótico	44
3.12 Análisis de datos.....	48
3.13 Temperatura inducida por láser pulsado mediante cálculo fraccionario.....	50
3.14. Medición por espectroscopía Raman de agua residual.....	52
Capítulo 4. Resultados.....	55
Capítulo 5. Discusiones.....	65
Capítulo 6. Conclusiones.....	69
Referencias	71
Apéndice 1. Normatividad Mexicana para la determinación de la calidad del agua.....	81
Anexos.....	85

Índice de figuras

Figura 1. Representación de flujo de las aguas negras desde el Río Tula hasta la Ciudad de México.....	20
Figura 2. Mapa de las presas en Tepeji del Río de Ocampo.	21
Figura 3. Mapa conceptual “Indicadores de la calidad de agua”	25
Figura 4. Representación gráfica de flujo de las etapas de investigación, obtención de muestras de estudio y análisis de aguas residuales de la presa La Requena.....	33
Figura 5. Proceso de limpieza del recipiente muestreador.....	36
Figura 6. Representación del recipiente siendo enjuagado.....	37
Figura 7. Llenado de recipiente muestreador.....	38
Figura 8. Medición de la temperatura con un termómetro digital.....	38
Figura 9. Cierre del recipiente muestreador.....	39
Figura 10. Representación de conservación de muestras.....	42
Figura 11. Partes de un espectrofotómetro.....	43
Figura 12. Experimento de cómo llega la señal en el atractor caótico.....	44
Figura 13. Representación visual de la determinación de azul de metileno asistida por un atractor caótico.....	45
Figura 14. Ilustración esquemática de la configuración experimental.....	49

Figura 15 Ilustración esquemática del experimento para monitorear diferentes concentraciones de azul de metileno en la muestra estudiada utilizando un atractor de Rössler en estado estacionario como señal de entrada.....	51
Figura. 16. Datos experimentales que describen los espectros de absorbanza UV-vis mostrados en MB suspendido en agua.....	55
Figura 17 Formas caóticas experimentales para diferentes concentraciones de azul de metileno suspendidas en agua bidestilada.....	57
Figura 18 Resultados experimentales del monitoreo del atractor caótico de Rössler azul de metileno en aguas residuales de la presa de Requena.....	58
Figura 19. Espectro Raman con azul de metileno suspendido en el agua.....	60

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de registro de datos en base a la norma NMX-AA-014-1980.....	40
Tabla 2. Tabla de registro de datos de los recipientes.....	41
Tabla 3. Principales normas mexicanas normas actuales que establecen los indicadores contaminantes de las aguas residuales.....	81

Resumen

A nivel mundial hay un incremento de consumo de la industria textil, esto se debe a la sobrepoblación, y a la compra excesiva de productos ofrecidos por dicha industria. Esta industria, también usa una gran cantidad de químicos peligrosos en los teñidos; por años, las empresas textiles han utilizado los cuerpos de agua para verter sus desechos sin tratamiento previo, dejando como consecuencia una gran contaminación de ríos y lagos.

Tepeji del Río de Ocampo es una zona que se caracteriza por el desarrollo y establecimiento de empresas textiles, quienes en su gran mayoría desechan productos químicos al ambiente. El desecho descontrolado ha ocasionado gran preocupación por parte de los pobladores de la región debido a las graves consecuencias que puede provocar a la salud humana, la flora, y a la vida animal. Algunos de los desechos que más sobresalen de la industria textil son los colorantes, como el azul de metileno.

El cloruro tetrametilitionina mejor conocido como azul de metileno es compuesto químico utilizado para teñir prendas en la industria textil. En investigaciones se ha demostrado que al estar en contacto con el azul de metileno suspendido en el agua puede afectar al hígado, los riñones y el sistema nervioso central en los animales. En cuanto al ser humano la exposición del azul de metileno puede provocar picazón, alergias, irritación en la piel y problemas respiratorios. Además, al estar suspendido en el agua afecta a la vida acuática, y el crecimiento de las plantas.

Se han utilizado diversas técnicas físicas, químicas y microbiológicas para detectar contaminantes en el agua. Dichas técnicas requieren de un análisis minucioso y en su mayoría prolongados lo que limita su aplicabilidad para el monitoreo en tiempo real. La teoría del caos y la tecnología láser hoy en día ha tenido un gran avance, debido a sus estructuras en el espacio de las fases puede llegar a tener diferentes resultados a lo largo del tiempo. Los atractores caóticos son útiles para detectar cambios en un sistema esto se debe a su sensibilidad ayudando a medir la concentración de los contaminantes en el agua, siendo más eficaces, ya que otros

métodos son más complejos al momento de analizarlo en laboratorio. La sensibilidad de los atractores se ha utilizado para monitorear los cambios de la calidad del agua.

El atractor caótico de Rössler es un sistema que busca su movimiento caótico con apoyo de ecuaciones diferenciales. Este método permite una detección, un control sensible y preciso de los contaminantes en el agua, haciendo una evaluación más rápida. El uso del cálculo fraccional es útil para la detección del azul de metileno, esto se debe a sus características de modelar sistemas complejos, fundamental para comprender los efectos de la muestra.

Esta tesis reporta la detección del azul de metileno en el agua residual de la presa Requena, ubicada en Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo. Las concentraciones de azul de metileno en aguas residuales se detectaron mediante cálculo fraccional, el atractor caótico de Rössler y sistemas láser. La espectroscopía Raman confirmó la detección de azul de metileno en el agua residual de la presa Requena.

Los resultados contribuyen a futuras investigaciones buscando el desarrollo de soluciones de monitoreo innovadoras más eficaces para detectar otros tipos de contaminantes, para proteger la salud, el cuidado de la vida acuática y el monitoreo de la calidad de agua.

Abstract

Globally there is an increase in consumption in the textile industry, this is due to overpopulation, and the excessive purchase of products offered by this industry. This industry also uses a large amount of dangerous chemicals in dyes; for years, textile companies have used bodies of water to dump their waste without prior treatment, resulting in a large contamination of rivers and lakes.

Tepeji del Río de Ocampo is an area characterized by the development and establishment of textile companies, most of which dump chemicals into the environment. Uncontrolled waste has caused great concern among the region's residents due to the serious consequences it can cause to human health, flora, and animal life. Some of the most notable waste from the textile industry are dyes, such as methylene blue.

Tetramethylthionine chloride, better known as methylene blue, is a chemical compound used to dye clothing in the textile industry. Research has shown that contact with methylene blue suspended in water can affect the liver, kidneys and central nervous system in animals. In humans, exposure to methylene blue can cause itching, allergies, skin irritation and respiratory problems. In addition, when suspended in water, it affects aquatic life and plant growth.

Various physical, chemical and microbiological techniques have been used to detect contaminants in water. These techniques require a thorough and mostly prolonged analysis, which limits their applicability for real-time monitoring. Chaos theory and laser technology have made great strides today, due to their structures in phase space that can have different results over time. Chaotic attractors are useful for detecting changes in a system, this is due to their sensitivity, helping to measure the concentration of contaminants in water, being more effective, since other methods are more complex when analyzing it in the laboratory. The sensitivity of attractors has been used to monitor changes in water quality.

The Rössler chaotic attractor is a system that seeks its chaotic motion with the support of differential equations to define, The sensitivity makes it useful for detecting changes in a system such as analyzing the detection of contaminants. This method allows for sensitive and precise detection, control of contaminants in water, making a faster evaluation. The use of fractional calculus is useful for the detection of methylene blue, this is due to its characteristics of modeling complex systems, essential to understand the effects of the sample.

This thesis reports the detection of methylene blue in wastewater from the Requena Dam, located in Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo. Methylene blue concentrations in wastewater were detected using fractional calculus, the Rössler chaotic attractor, and laser systems. Raman spectroscopy confirmed the detection of methylene blue in the wastewater from the Requena Dam.

The results contribute to future research seeking the development of more effective innovative monitoring solutions to detect other types of contaminants, to protect health, care for aquatic life, and monitor water quality.

Capítulo 1.

Introducción

1.1 Definición del problema.

En México hoy en día existe una crisis con el agua y la civilización busca la manera de obtener este elemento vital ya sea de los ríos, presas, etc. Con el paso de los años, el agua se ha ido contaminando, una de las razones principales es el aumento en la apertura de industrias. Esto ha afectado en las actividades económicas como la pesca, ganadería y en especial la agricultura. En México el 76% del agua es ocupada en la agricultura. (J. Laurrabaquio, 2006)

Una de las actividades económicas que más destacan de Hidalgo es la industria manufacturera y la textil, existen ciudades como Tulancingo y Tepeji del Río que se encargan de la fabricación de hilo, telas, etc. Algunas industrias desechan sus residuos en ríos, presas, y lo hacen por la cercanía; entre estas está la presa Requena, ubicada en Tepeji del Río de Ocampo a 60 km de la Ciudad de México, y cerca del Río Tula. (J. Laurrabaquio, 2006). La presa la Requena con el tiempo se ha contaminado demasiado de manera que ya no genera la misma producción de peces que años atrás.

La industria textil genera variedad de residuos, ya sean orgánicos, inorgánicos, y residuos tóxicos; éstos son muy difíciles de diferenciar porque a simple vista el ser humano no los alcanza a notar, entre algunos de los residuos tóxicos detonan los colorantes como el azul de metileno. El azul de metileno es comúnmente utilizado para teñir prendas de algodón y cuero. Se conoce que la mayor cantidad de azul de metileno que se encuentra en el agua es por la industria textilera. Lo antes mencionado ha generado preocupación en los habitantes de la región debido que al estar en contacto con el ser humano causa enfermedades crónicas como el cáncer, problemas pulmonares y afecta el riñón, etc. (F. Garzón, 2017).

Por el miedo e incertidumbre en el incremento de dichas afectaciones a la salud, es necesario el monitoreo y control del azul de metileno en el agua. Existen métodos convencionales

que permiten realizar el análisis de aguas residuales, sin embargo, son métodos más elaborados y complejos.

A través de los años se han creado diferentes sistemas, para monitorear células, su caracterización, clasificación e interacción; uno de estos sistemas son los atractores caóticos. Ejemplos de atractores caóticos: Sprott, Chen, sistema caótico sin equilibrio, sistema caótico de orden fraccionario, Rössler entre otros.

El primer sistema caótico sin equilibrio fue el Sprott (conocido como el sistema A de Sprott), de ahí se desglosaron más sistemas caóticos. Sprott también utiliza una serie de ecuaciones diferenciales para hallar soluciones caóticas, enfocándose en tres dimensiones. En base a esto se eligió el atractor caótico Rössler porque definen un sistema dinámico del tiempo-continuo mostrando dinámicas caóticas asociadas con las propiedades fractales del atractor contando tres variables en función del tiempo, x , y y z , siendo más simples modelos para el caos continuo que otros tipos de atractores. (Aranda, 2021)

El objetivo de esta tesis es la identificación de azul de metileno suspendido en agua residual perteneciente a la presa la Requena, usando un atractor caótico, inspirado en el modelo de Rössler.

1.2 Justificación

En los últimos años ha habido un incremento de contaminación y un gran desabasto en el agua, esto se debe a que las industrias toman toneladas de agua al día, y al momento de desechar sus residuos los arrojan al mar, ríos, lagos, etc. (Aranda, 2021) La industria textil es considerada como la segunda más contaminante del planeta, esto se debe a la sobrepoblación. Entre los países más importantes en la industria es México el impacto económico y la fuente de

trabajo que genera, provocando que sus ríos y mares estén muy contaminados ya sea por desechos sólidos o químicos. (Aranda, 2021)

En Tepeji de Río de Ocampo cada día se fabrican miles de prendas para vestir, toallas, e hilos, afectando de manera significativa el agua, al día todas las empresas toman toneladas de agua para sus instalaciones (actividades, limpieza, maquinas, etc.), algunos sus desechos desembocan a los ríos o presas. La presa la Requena es donde más cantidad de agua es almacenada en la zona, por ende, también en donde más llegan los desechos. Algunos de estos desechos son tóxicos, como los colorantes que son utilizados para teñir las prendas, uno de los más importantes es el azul de metileno, el cual genera consecuencias negativas a la salud del ser humano. Existen técnicas y métodos para la detección del azul de metileno, pero sus resultados no son exactos y su análisis requiere más tiempo, como ejemplo la espectrofotometría Hach, Fotocatálisis, etc. (Leal Puentes, L. S, 2021).

Los métodos actuales como el uso de atractores caóticos presentan soluciones más innovadoras para la detección de contaminantes en el agua. Esto se debe a la sensibilidad, pequeños cambios en el estado inicial llevan a resultados diferentes a lo largo del tiempo.

El uso de atractores caóticos facilita su detección ya que sus resultados son más específicos, hallando las cantidades de azul de metileno en el agua, aportando una mejor investigación. Los atractores caóticos funcionan con sistemas láser, el objetivo del sistema láser es que excita la muestra para conocer su comportamiento, la longitud de onda láser al tocar el agua residual provocando cambios en las propiedades ópticas y dispersión.

El problema global de la contaminación del agua con azul de metileno subraya la importancia de desarrollar métodos de detección avanzados. Proponiendo el desarrollo de los sensores y atractores caóticos. Siendo de gran importancia esta investigación para el sector salud y la contaminación ambiental.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo General*

Determinar la existencia de azul de metileno suspendido en agua residual de la presa Requena ubicada en Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo mediante el monitoreo de un atractor caótico Rössler empleando diferentes pulsos de energía láser y concentraciones variables de azul de metileno como referencia.

1.1.2 *Objetivos Particulares*

- Investigar la problemática de la región y los métodos para la toma de muestras de aguas residuales.
- Determinar la metodología para el recaudo de muestras de aguas residuales en base a la normativa mexicana.
- Tomar muestras simples de aguas residuales en la presa de estudio para su análisis.
- Caracterización del azul de metileno disuelto en aguas residuales de la presa Requena mediante el uso de un atractor caótico Rössler, espectrofotómetro UV-Visible y espectroscopía Raman.
- Integrar los resultados obtenidos de las caracterizaciones para su análisis.
- Identificar y analizar los resultados obtenidos de las caracterizaciones en aguas residuales.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Aguas Residuales

El agua es un elemento vital muy importante en el mundo ya que gracias a ella se realiza la mayoría de las actividades, y lo podemos comprobar porque el planeta está constituido por un 75% de agua, pero solo un 2.5 % es para consumo humano y el otro porcentaje se encuentra en los ríos, mares, lagos, presas, etc. (Mejía, et al, 2024)

En el caso particular, una presa es una obra en la que su objetivo principal es almacenar agua para que después sea utilizada para consumo humano. El agua que llega a la Presa puede ser de un río, y una de sus funciones es que cuando haya un problema de escasez en la región se aprovecha el agua de ahí. (Mejía, et al, 2024)

La industria, produce muchos desechos que llegan a las presas, lagos, ríos etc. La acumulación de una o más sustancias ajenas al agua pueden generar muchas consecuencias ya sea en las plantas, animales o personas.

Hoy en día a nivel mundial la demanda de agua dulce va aumentando, esto se debe al aumento de población y a que las industrias cada vez utilizan más agua, también a que debido al cambio climático hay una elevación de temperatura, provocando escasez de agua en países desarrollados, para esto se ha optado por buscarle un segundo uso al agua residual. (Toledo, 2002).

México es un país con sobrepoblación y esto ha llevado a que los agricultores lleguen a utilizar aguas residuales, esta es una de las alternativas para aprovechar lo mejor posible el agua, ya que esta contiene muchos nutrientes para los cultivos y también beneficia economía. (Toledo, 2002).

2.2 Tipos de aguas residuales

Aquellas aguas que han sido afectadas por las acciones del ser humano se les conoce como aguas residuales. Ante esto se mencionan algunos de los tipos más comunes de agua residual. (Pérez, et al., 2022)

Agua residual doméstica: Este tipo de agua proviene de las casas, instalaciones públicas o privadas, están conformadas por residuos fecales, artículos de limpieza como detergentes, etc. Los contaminantes principales que lo conforman son los desechos orgánicos (botellas, cartón, etc.), nitrógeno, fósforo, entre otros. (Rivera, M. A. O., 2021)

Agua residual pecuaria: El agua residual pecuaria es la que se origina de la actividad ganadera, procede de animales, hoy en día en algunas localidades el uso de estiércol es común como abono de forma que los compuestos de aguas residuales de los establos pasan a ser contaminantes para las cuencas.

Agua residual agrícola: Este tipo de agua residual se da por los productos utilizados en la agricultura, también por el agua de lluvia y el agua de riego, el agua residual llega hasta el ciclo hidrológico llevando con ella una serie de contaminantes. El uso de pesticidas permite que la producción agrícola incremente, pero tiene como consecuencia que el agua se vea afectada.

Agua residual industrial: Proviene de la vida industrial, dentro de la mayoría de las empresas se utilizan grandes litros de agua para que después se transforme en agua residual, vierten un gran número de materiales o químicos. El agua residual industrial no lleva un buen control ya que sus desechos son por el alcantarillado municipal esto puede tener consecuencias muy graves, en cuanto a los productos químicos se pueden llegar a encontrar metales pesados muy tóxicos que afectan la salud del ser humano. Las empresas textiles con un gran número de

colorantes, como el azul de metileno que ocasiona en su mayoría molestias digestivas. Más adelante se explican más a detalle. (Pérez, et al. 2022).

Aguas de escorrentía urbana: Este tipo de agua residual proviene de precipitaciones sobre la cuenca urbana generadas por la lluvia o nieve, provocando inundaciones, erosión y contaminación de acuíferos.

2.3 Contaminación de Aguas Residuales

La industria, produce muchos desechos que llegan a las presas, lagos, ríos etc. Una acumulación de una o más sustancias ajenas al agua pueden generar muchas consecuencias ya sea en las plantas, animales o personas, a esta contaminación del agua se le conoce como agua residual.

La gran mayoría de las empresas utilizan poliéster este tipo de material es fabricado con petróleo ocasionando que al ser producido libere químicos como bromuro de sodio, cobalto, dióxido de titanio, etc. esto es nocivo para la salud y medio ambiente. Cuando se estampa una playera existen algunos químicos que llegan al agua, como son la urea, amoníaco, colorantes orgánicos, también las prendas al ser lavadas ya sean de nylon o poliéster suelta microfibras que llegan al mar. La industria textil es una de las que más ocupa agua ya que se usa entre 100-150 litros de agua para teñir 1 kg de materia textil. El uso de colorantes en la industria textil ha afectado de manera significativa la calidad del agua, uno de esos colorantes es el azul de metileno. (Aranda, 2021)

Al estar en contacto el azul de metileno con el agua y esta al ser consumida puede causar efectos como náuseas, dolor abdominal, vómitos, malestar en los ojos, etc. Es utilizado para teñir el algodón, cuero, etc. (G. Urbina, 2019)

El azul de metileno es un compuesto químico, que es utilizado para teñir prendas en la industria textil, fue creado terminando el siglo XIX. Este colorante afecta a los ecosistemas acuífero ya sea su vida animal y flora, aunque su cantidad sea mínima. Se ha demostrado que los animales pueden presentar malformaciones y problemas con la fertilidad. (Guerra, 2023)

Se conoce que la mayor cantidad de azul de metileno presente en cuerpos de agua es por la industria textilera. Algunas de las técnicas utilizadas para separar el azul de metileno en el agua son: filtración, osmosis inversa, precipitación química, etc. (Aranda, 2021)

2.3.1 Problemática ambiental en la Presa Requena

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) el Estado de Hidalgo cuenta con 19 Ríos y otros cuerpos de agua como las presas o lagunas. Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)-, Tula es una ciudad con un poco más de cien mil habitantes la cual es atravesada por uno de los ríos más sucios del país, todo esto se debe a que tiene alta concentración de refinerías y fábricas. (Industrias México, 2021) Este río es uno de los que desemboca hacia la presa Endhó que también es conocida como “la fosa séptica a cielo abierto más grande del mundo”. (A. Samir, 2013)

Entre los años 1947 y 1953 la presa Endhó fue construida en el Estado de Hidalgo en el Valle del Mezquital, en los límites de los municipios de Tepetitlán y Tula de Allende. Se encuentran 12 presas que forman parte de ella, algunas son: Taxhimay, El Molino Vicente Aguirre, La Concepción, Danxhó, Sierra de Guadalupe, Huapango, Madín, Ñadó, Javier Rojo Gómez, y Requena. (A. Samir, 2013)

A esta presa, llegan todas las aguas negras de la Ciudad de México (CDMX), y tiene una alta concentración de residuos, como son residuos químicos y materiales o metales pesados. La presa la Requena desde el año 2016 por parte de la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) se ha declarado en estado de emergencia de salud y por otro

lado en el año 2019 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en cuestión con el medio ambiente.

En la Figura 1 se muestra el trayecto del Río Tula hasta llegar a la ciudad de México. (Calva., 2019)

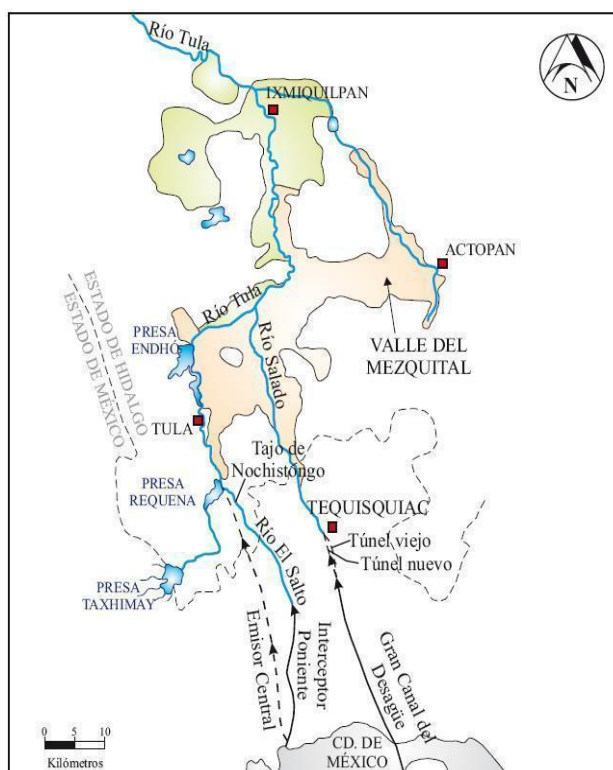


Figura 1. Representación de flujo de aguas negras desde el Río Tula hasta la Ciudad de México.

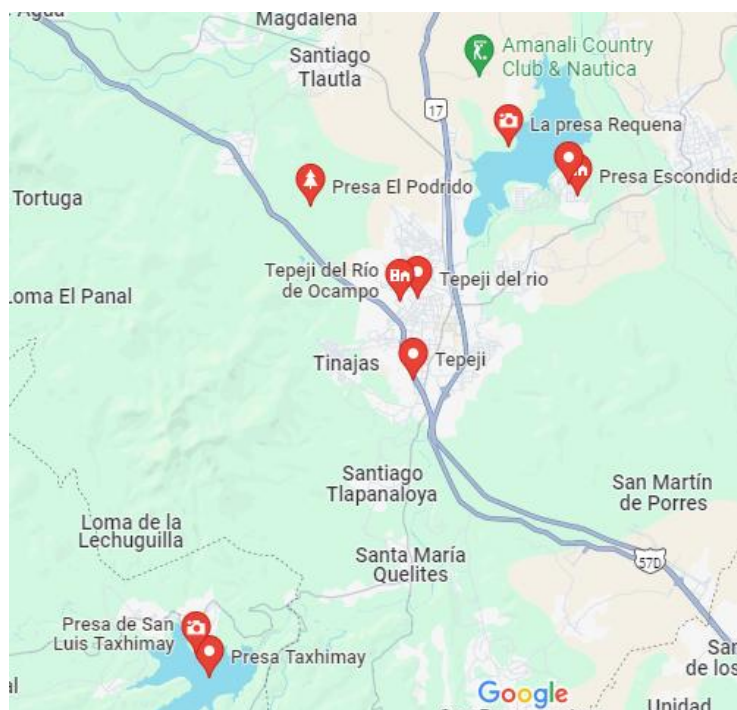
En la presa Endhó desembocan ríos y aguas de presas como: Presa la Requena, esta se encuentra en el Estado de Hidalgo, ciudad de Tepeji del Río de Ocampo, en la cuenca del Río Tula; esta presa capta las aguas residuales del municipio. (Calva., 2019)

Tepeji del Río es una ciudad que se encuentra a 80 km al norte de la Ciudad de México, este lugar cuenta con algunas presas: presa la Requena, presa Escondida, presa el Podrido, presa de San Luis Taxhimay (ver Figura 2) pero una de las más importantes es la presa la

Requena, donde habitaban toneladas de peces y hoy en día se ha ido disminuyendo su población, ya que el aumento de la temperatura está provocando sequía.

Figura 2.

Mapa de las presas en Tepeji del Río de Ocampo. Google. (s.f.).



Seleccioné la presa “La Requena” porque es un cuerpo de agua de gran relevancia en Tepeji de Río de Ocampo, es un lugar donde habitan aves como pájaros, pelícanos, garzas. En estos últimos años ha habido descargas de aguas residuales, y esto afecta a los trabajadores ya que el nivel de pesca a través de los años no ha sido el mismo. También cabe destacar que es un lugar turístico ya que es el cuerpo de agua más grande del municipio y es hacia donde las familias suelen ir en temporada de calor o en vacaciones, y también el municipio realiza algunas actividades por el gran espacio que tiene y tiene una grandiosa vista. (Neta, 2021)

Actualmente, la presa Requena provee peces a algunos habitantes para su consumo; sin embargo, la contaminación del agua es una problemática ya que ha ido disminuyendo su actividad pesquera.

En la literatura se carece de información suficiente que valide la contaminación evidente de la presa Requena, con lo cual es de gran importancia determinar los factores que provocan su contaminación, por ejemplo: la industria de peletería, industria textil, industria metalúrgica, industria petroquímica, etc.

a) Contaminación del agua originada por la industria de peletería

La industria de peletería o curtiduría se dedica a la fabricación de zapatos, tapicería, vestimenta a base de pieles, para llegar a todo esto se necesitan químicos como lo son el sulfuro sódico y sosa cáustica, estos químicos desembocan a las tuberías o los desagües. Algunos de estos ácidos, disolventes u otros productos químicos son irritantes para la piel y las vías respiratorias. El cromo al ser utilizado es muy difícil que sea biodegradable, este puede causar cáncer. El cloruro de sodio, ácido sulfúrico provoca la muerte de la vida acuática, aparte de que se utilizan litros de agua para su fabricación. (GMX, 2019)

b) Contaminación del agua originada por la industria metalúrgica

Tepeji del Río es una zona industrializada y esto provoca mucha contaminación, ya sea del aire, suelo y principalmente del agua, ya que está ocasionando que a los ríos o presas lleguen desechos orgánicos e inorgánicos; algunos otros como los metales pesados como Cadmio (Cd), Arsénico (Ar), Plomo (Pb), Cromo (Cr), provocan enfermedades crónicas; cáncer, problemas del corazón, riñones etc. Estos elementos pueden ser muy peligrosos en grandes cantidades, ya que

no se degradan fácilmente por métodos convencionales, lo que les permite persistir en el ambiente durante miles de años. (Cortéz, J, 2022).

Un alto nivel de metales pesados en el agua o superficies puede generar al ser humano algunas enfermedades e incluso la muerte. (Cortéz, J, 2022).

c) *Contaminación del agua originada por la industria petroquímica*

La extracción de petróleo es un proceso complejo que implica varias operaciones basadas en tecnologías avanzadas, esta evolución genera contaminación del agua, suelo y aire.

Para la extracción de crudos se utilizan químicos como hidróxido de calcio, sosa caustica, sulfato de bario, cuando estos químicos llegan al agua, se recomienda que no sea ocupada para el riego por su alto contenido de acidez. (D. López-Hernández, 2020)

La gran acumulación de metales pesados en agua o suelo, generan muchas consecuencias, para las plantas evita su crecimiento y para el ser humano provoca enfermedades crónicas (cáncer, problemas hepáticos, problemas con los riñones) o malestares (dolor de cabeza, alteración en la presión arterial, mareos, vómito, dolor abdominal), algunos son altamente tóxicos (cáncer de piel, pulmón, vejiga, deformidad en la columna hiperqueratosis y cambios de pigmentación e incluso pérdida de la vida. (N. P. Castro-González, 2019)

d) *Contaminación del agua originada por la industria textil*

La gran mayoría de las empresas utilizan poliéster el cual es fabricado con petróleo y su producción ocasiona que liberen químicos como bromuro de sodio, cobalto, dióxido de titanio, etc, los cuales son nocivos para el medio ambiente y la salud. Las prendas al ser lavadas ya sean de nylon o poliéster liberan microfibras que llegan al mar siendo los tóxicos más comunes los fenoles. La industria textil ocupa 100-150 litros de agua para teñir 1 kg de materia textil. (A.

García, 2021) El uso de colorantes en la industria textil ha afectado de manera significativa, los cuerpos de agua, y uno de esos colorantes es el azul de metileno.

2.3.2 Contaminación por azul de metileno

El cloruro tetrametiltionina mejor conocido como azul de metileno es un compuesto químico, utilizado para teñir prendas, y fue creado terminando el siglo XIX. Es utilizado para teñir el algodón, cuero, etc. El azul de metileno afecta a los ecosistemas acuífero ya sea su vida animal y flora, aunque su cantidad disuelta sea mínima.

La industria textilera, descarga una cantidad alta de aguas residuales en cuerpos de agua. Un resultado de la contaminación del agua con el azul de metileno es que perjudica el proceso de fotosíntesis ocasiona que los rayos del sol no lleguen al fondo del agua y por ende hace que el suelo no tenga suficientes nutrientes y la flora no tenga un buen crecimiento. (Guerra, 2023) (T.Carmen, 2022)

El consumo de agua contaminada con el azul de metileno puede causar efectos negativos a la salud como náuseas, dolor abdominal, vómitos, malestar en los ojos, etc. (Guerra, 2023) Algunas de las alternativas para la contaminación por el azul de metileno es utilizar técnicas para separarlo como: filtración, ósmosis inversa, precipitación química, etc. (E., & de Farmacia, 2018)

La problemática que del azul de metileno presente en las aguas de Tepeji del Río Hidalgo se debe en gran parte a que es una zona industrializada destacando la industria textil. Los desechos de las fábricas se llegan a verter en las presas o ríos, afectando la calidad del agua. Dentro del estado de Hidalgo entre los municipios de Tepeji del Río y Tula de Allende se encuentra la presa la Requena, recibe agua residual de la presa Endhó, esta agua residual incluye materia orgánica, pesticidas, metales pesados y azul de metileno provocados por la industria textil (J. Laurrabaquio, 2006). Provoca daños a la salud, como problemas respiratorios,

en el hígado, alergias, y a consecuencias más graves se puede originar cáncer. (E., & de Farmacia, 2018)

Hace algunos años se realizó un análisis en las aguas de los ríos Tepeji donde se encontraron sustancias activas al azul de metileno lo cual provocando que no haya un óptimo desarrollo de especies animales y vegetales. Los niveles de contaminación registrados en Tepeji del Río se deben a las descargas de aguas residuales municipales y no municipales. (CONAGUA, 2018)

2.4 Indicadores de la calidad en aguas residuales

Se le conoce como calidad de agua a aquel carácter que debe tener el agua para que se encuentre en una condición equilibrada y que cumpla con ciertos objetivos ecológicos. Para verificar la calidad del agua existen los indicadores de aguas residuales, estos pueden ser químicos, físicos y microbiológicos, los cuales son importantes ya que en base a ellos se evalúa sus propiedades y condiciones. (A. F. Cirelli y A. V Volpedo). En la figura 3 se muestra la forma esquemática de los principales factores que determinan la calidad del agua.

Figura 3

Mapa conceptual “Indicadores de la calidad de agua” (elaboración propia)



2.5 Técnicas para determinar la calidad en aguas residuales

a) Técnicas para determinar los indicadores químicos

Turbidez

La turbidez se refiere a la ausencia de transparencia o claridad del agua y esto se debe a los microorganismos que habitan en ella. Si existe una alta concentración de residuos sólidos la turbidez aumenta. Algunos de esto también se deben a la naturaleza como los hongos, óxidos minerales) ya que estos se originan del suelo, así también como las algas, bacterias, y parásitos. Se mide con turbidímetros, estos tienen una fuente de luz, una lente y un detector a 90°. ((turbidez, s.f.)

Conductividad

La conductividad eléctrica permite saber cómo la corriente eléctrica fluye a través del agua. Si el agua tiene un alto nivel de pureza quiere decir que su conductividad es mayor. Esto depende de factores como los iones, su concentración total y la temperatura. Se mide con un conductímetro. (NMX-AA-093-SCFI-2000)

Temperatura

Cuando la temperatura es alta esto indica que hay un contaminante, esto puede ser debido a descargas de aguas calientes por las industrias Se encuentran diversos dispositivos para medirla como el termómetro o un pH metro. (NMX-AA-007-SCFI-2000)

pH

Es un parámetro que mide las propiedades corrosivas del agua. Cuando el nivel del pH sobrepasa o es menor al normal ya indica que se sitúa alguna sustancia o material tóxico. Pero para este indicador interviene la temperatura u algún material orgánico. Para saber el nivel de acidez de una sustancia se utiliza un pH metro. (NMX-AA-008-SCFI-2016)

Este indicador tiene una escala de 0 a 14, en donde el 7 equivale a un agua con pH neutro. Del número 0 al 7 señala que el agua es ácida y por último del número 7 al 14 que el agua es alcalina.

b) Técnicas para determinar los indicadores microbiológicos

Bacterias coliformes:

Se pueden encontrar en la vida humana o animal, ya sea en la piel o intestino. Estas bacterias se utilizan porque al estar presentes muestran que hay organismos que generan enfermedades, se encuentran a menudo de los desechos de las alcantarillas. (Pullés., 2014)

Clasificación:

Los coliformes totales: Se pueden localizar en los desechos ya sea de humano o animal, suelo, o en las aguas residuales.

Las coliformes fecales: Específicamente se encuentran en el intestino.

c) Técnicas para determinar los indicadores físicos

Color

Lo que el color indica es la presencia de ciertas sustancias en el agua, como el magnesio o hierro.

Existe un dispositivo para medir el color que es el espectrómetro. Técnica usada para determinar este parámetro Espectrofotometría. (Díaz, 2010)

Olor

El olor es un parámetro característico en el que las personas pueden percibir de inmediato cuando el agua no está en buen estado, al tener un olor o sabor desagradable al agua, la hacen inapropiado para beber, cocinar, etc. El sabor y el olor también son utilizados como parámetro para analizar el progreso del tratamiento de aguas como ejemplo la cloración y para determinar su efectividad de estos tratamientos. Esto con base en la norma NMX-AA-083-1982.

Dureza

Se refiere al alto contenido de minerales en el agua, ya sea sales, magnesio, calcio, etc. Los acuíferos contienen estos minerales, por eso cuando el agua pasa se llevan algunos de estos.

Existen tres tipos de durezas:

Dureza total: Es el agua disuelta en sales de calcio y magnesio

Dureza carbonatada o temporal: Se genera por los carbonatos de calcio y magnesio e hidrogeno carbonatos.

Dureza no carbonatada o permanente: Esta se debe por las sales de cloruro, sulfato y nitrito de calcio y magnesio.

Como previamente se mencionó y de acuerdo a la NMX-AA-072-SCFI-2001 la dureza del agua se puede medir por medio de titulación.

2.5.1 Atractores caóticos

Hoy en día se han buscado diversas maneras de analizar el agua residual, en estas se encuentran los atractores caóticos. Los atractores caóticos cuentan con algunas ventajas en cuanto al tiempo de análisis, al momento de analizar los resultados son específicos y son fáciles

de obtener. (Beker, V. A., 2003). Los atractores caóticos son altamente sensibles a las condiciones iniciales; pequeños cambios en el estado inicial pueden conducir a diferentes resultados a lo largo del tiempo. Pudiendo ser el método más confiable y el que en la presente tesis se utilizó.

Se le conoce como atractor a la fuerza que ocasiona que un sistema se vaya alejando del estado en el que se encontraba inicialmente, tendiendo a evolucionar y a originar que el sistema en su nuevo estado tenga un comportamiento caótico (sistema dinámico). Entonces, un atractor caótico se refiere a un punto o área en el cual un sistema se mueve de forma impredecible o aleatoria.

La sensibilidad hace que los atractores caóticos sean útiles para detectar cambios en un sistema como la variación en la concentración de contaminantes suspendidos en el agua (M. Rodríguez, S. Servin, 2014) Cada parte de un atractor es de mucha ayuda para su detección, los sistemas láser excitan muestras biológicas y miden su comportamiento, se han utilizado durante mucho tiempo. La irradiación láser de agua residual puede mejorar la detección de componentes suspendidos en el agua (N. Nedyalkov, 2017)

2.5.2 Teoría del caos

Gracias a Lorenz se estimularon investigaciones sobre el campo matemático: la teoría del caos. La evolución de los sistemas dinámicos que manifiestan un comportamiento caótico lo estudia la teoría del caos. Se conoce como sistema dinámico a aquellos que con el tiempo van evolucionando. (Beker, V. A. 2003)

Los sistemas son predecibles, pero de pronto empiezan a cambiar y desordenarse, no se sabe por qué después logran retornar a una nueva estabilidad, provocando que haya investigaciones del porqué paso esto, el porqué del orden llega al caos, y viceversa.

La teoría del caos dice que los resultados de algún comportamiento o evento dependen de las variables, no es con exactitud, todos van dependiendo a su naturaleza. A esto se le llama fenómeno “caótico”, es algo muy complejo. Se denomina caos porque existe una variación con el tiempo. (Torres, 2004)

Múltiples investigaciones han llevado a que se utilicen los sistemas dinámicos, un sistema se refiere a la colección de todos sus estados concebibles. Y se refiere a un sistema dinámico a lo que cambia con el tiempo. Se han desarrollado estudios relacionados con el caos y los sistemas dinámicos han enfrentado grandes desafíos en avanzadas aplicaciones con el fin de que lleguen a diferentes campos de la ciencia. (Ramírez, 2018)

2.5.3 Tipos de atractores caóticos

Los atractores caóticos pueden representar algunas ventajas para describir fenómenos no lineales. Algunas investigaciones con los sistemas caóticos se dedican al diseño y construcción de diferentes estructuras topológicas para atractores caóticos. (H. Martínez, 2019)

Durante estos años se han desarrollado diversos tipos de atractores caóticos para diferentes campos de la ciencia, basados en la teoría de Lorentz, el atractor Chen fue diseñado como un sistema autónomo suave en 3D. Estos son algunos ejemplos de estos sistemas atractores caóticos que se han desarrollado: Chua, Sprott, Chen, Lü, sistema hipercaótico, Rossler, etc.

Estos tipos de atractores caóticos múltiples, permiten la generación simultánea de varios atractores caóticos independientes a partir de diferentes valores iniciales en un sistema, y tienen como ventaja significativa el describir fenómenos no lineales. Ya mencionado antes, algunos se basan en la teoría de Lorentz y se siguen proponiendo más, que se puedan mover de diferente manera y con diferentes puntos de equilibrio. (Silva-Juárez, 2020)

2.5.4 Atractor caótico Rössler

El atractor caótico Rössler a partir de sistemas dinámicos gobernados por ecuaciones diferenciales con los ejes x y y y z que definen un sistema dinámico del tiempo-continuo muestras dinámicas caóticas asociadas con las propiedades fractales del atractor, explora fenómenos dependientes de la frecuencia. (Aranda, 2021). Siendo así que otros atractores no pueden obtener estos resultados, ya que algunos son más complejos. El método permite una detección y un control sensible y preciso de los contaminantes en las aguas residuales. A diferencia de otros métodos el atractor caótico Rössler permite una investigación más profunda, proporcionando un enfoque integral que relaciona la teoría del caos, la tecnología y sistemas láser, el cálculo fraccional tiene como objetivo mejorar las técnicas de detección de azul de metileno en aguas residuales y proporciona una solución sensible e innovadora para el cuidado del agua.

Existen otras características para demostrar la presencia del azul de metileno como lo es su color, ya que diluido en alcohol y en agua da como resultado un color muy intenso, pero también existen otras que no identifican el azul de metileno como es el olor, ya que es inodoro.

En el presente trabajo se identifica el azul de metileno mediante el uso del atractor Rössler ya que tiene como característica que diferentes puntos de equilibrio y múltiples desplazamientos se pueden mostrar con diferentes parámetros.

Capítulo 3.

Metodología

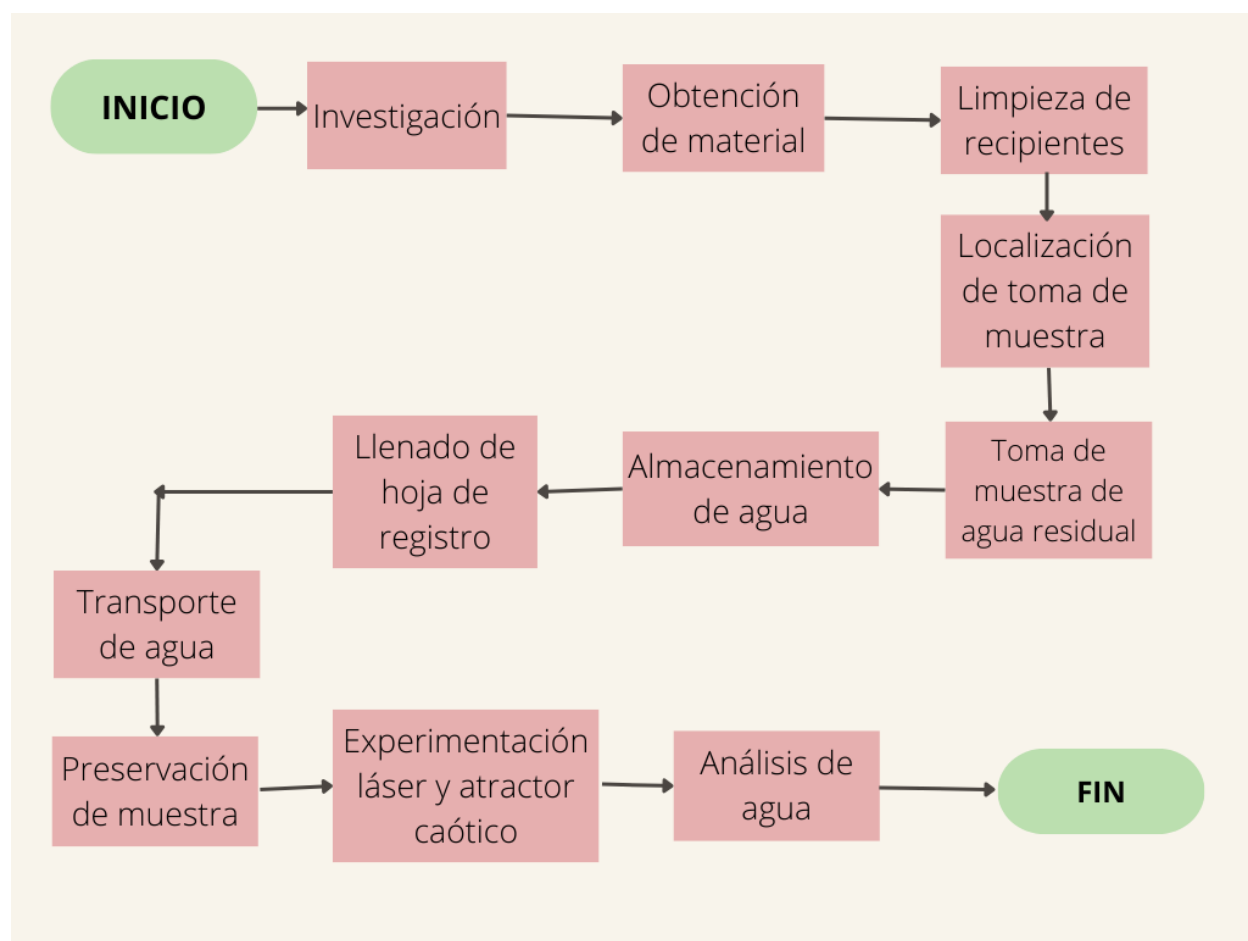
Experimental

Para establecer la metodología de este trabajo, inicialmente se realizó una investigación sobre la presa La Requena y se estudió sobre las condiciones que presenta el agua. Se analizó su ubicación y se estableció una red de muestreo.

En la figura 4 se observa un diagrama de flujo de las actividades realizadas para llevar a cabo el análisis y saber si hay presencia de azul de metileno en la presa La Requena (elaboración propia).

Figura 4.

Representación gráfica de flujo de las etapas de investigación, obtención de muestras de estudio y análisis de aguas residuales de la presa La Requena.



3.1 Investigación

Esta investigación permitirá determinar el azul de metileno disuelto en aguas residuales mediante un atractor caótico Rössler empleando diferentes pulsos de energía láser y concentraciones de agua residual y azul de metileno, analizando los efectos que pueden ocasionar a la salud en altas concentraciones.

3.2 Obtención de materiales

Los principales materiales a obtener fueron los recipientes de polietileno, para la limpieza de los recipientes se ocupó agua destilada y ácido clorhídrico, los cuales se obtuvieron del laboratorio de la Escuela Superior Tepeji, también fue necesario el uso de un termómetro digital.

3.3 Limpieza de recipientes

De acuerdo a la NMX-AA-003-1980, existen dos tipos de muestra de agua residual:

- Muestra simple: Es la muestra que se toma al momento, y una sola vez.
- Muestra compuesta: Es la unión de muestras simples.

Se optó por tomar la muestra simple, porque fue una muestra individual y su extracción fue en corto periodo de tiempo, en un lugar específico.

A lo largo de la investigación se determinó el tipo de recipientes aptos para la obtención de muestras de agua residual de acuerdo a la NMX-AA-003-1980. Acorde a dicha norma, el tipo de recipientes utilizados fueron de polietileno. El siguiente paso fue su limpieza, considerando la norma NMX-AA-051-SCFI-2001. La limpieza consistió en lo siguiente:

Los recipientes de polietileno se lavaron con disolución de detergente no iónico (libre de metales), se enjuagaron con abundante agua y posteriormente, se remojaron en ácido clorhídrico (concentración 1M) durante 30 minutos y se volvieron a enjuagar con agua destilada (libre de metales), para finalmente, dejarlos secar aproximadamente (Figura 6) (CONAGUA, 2018)

A continuación, se muestra el cálculo para obtener la cantidad en mililitros de la disolución:

1M de ácido clorhídrico utilizada en la limpieza.

Datos:

H= 1.007 g

Cl= 35.453 g

Peso molecular de HCl: 36.46 g/mol

V= 250 ml de agua destilada = 0.25 L

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{litros de solución}} \quad (1)$$

$$\text{Peso molecular} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{mol}} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}} \quad (3)$$

Despejando la ecuación 1:

$$\text{Mol} = M (\text{litros de solución}) \quad (4)$$

Despejando ecuación 2:

$$\text{masa (g)} = Pm(M)(\text{Litros dis}) \quad (5)$$

$$36.46 \text{ g/mol (1 M) (250 ml)}$$

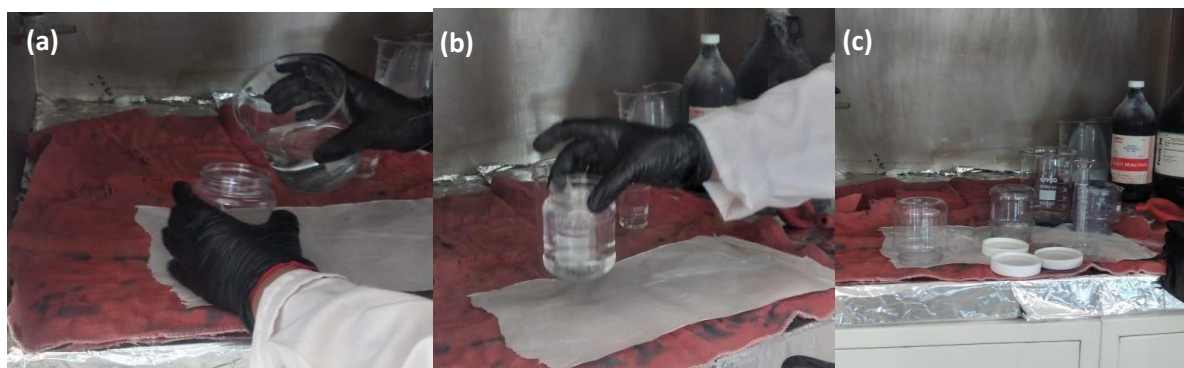
$$1 = \frac{m}{36.46(0.25)} \quad (6)$$

$$1 = \frac{m}{9.115} \quad (7)$$

$$\frac{m}{V} = 1.1174 \text{ g/cm}^3 \quad (8)$$

$$V = \frac{9.115 \text{ g}}{1.174 \text{ g/ml}} = 7.79 \text{ ml HCl} \quad (9)$$

Figura 5. *Proceso de limpieza del recipiente muestreador siguiendo la NMX-AA-051-SCFI-2001*



Nota. Representación del proceso de limpieza del recipiente muestreador. (a) El recipiente que contiene ácido clorhídrico está siendo agregado al recipiente muestreador; (b) Se deja reposar por 30 minutos (c) Se retira el agua con ácido y se dejan reposar para secarse

3.4 Localización de toma de muestra

Con base en la NMX-AA-014-1980 se estableció una red de muestreo, analizando que para obtener una muestra representativa tenía que ser en el afluente, tomando en cuenta que se divide en la parte superior, media e inferior dentro del cuerpo receptor donde se aprecie una mezcla uniforme y se optó que era mejor en la parte media, con una profundidad de 20 cm por debajo del nivel del agua. La profundidad se obtuvo con ayuda de un flexómetro.

3.5 Toma de muestra de agua residual

El día de la toma de muestra se optó que fuera en la mañana porque a partir del momento de que se haya recolectado la muestra solo existen tres días para que se preserve, esto con base en la NMX-AA-014-1980.

La mañana del martes 12 de marzo a las 7:00 am se localizó el punto exacto de donde tomar la muestra, como primer paso el recipiente muestreador se enjuagó repetidas ocasiones con el agua de la presa antes de realizar el muestreo. En este estudio se enjuagó tres veces con el agua.

Figura 6.

Representación del recipiente siendo enjuagado



Nota: Como siguiente paso se tomó directamente el agua con el recipiente muestreador, respetándose la profundidad de 20 cm. La medición de la profundidad de la toma de muestra fue realizada con ayuda de un flexómetro.

Figura 7.

Llenado de recipiente muestreador.



Para obtener la temperatura de la muestra al momento verter el agua al recipiente se midió con un termómetro digital marca ©Aleissi, entre un rango de -50°C a $+300^{\circ}\text{C}$, en 10 segundos ya se tenía la medición.

Figura 8.

Medición de la temperatura con un termómetro digital.



3.6 Almacenamiento de agua residual

Al momento de llenar el recipiente con el agua se llenó hasta su máxima capacidad, es decir, sin dejar espacio y evitando dejar aire atrapado, como se muestra en la figura 9.

Figura 9.

Cierre del recipiente muestreador.



3.7 Llenado de hoja de registro

Durante la recolección de la muestra de aguas residuales se realizó el registro de acuerdo a la NMX-AA-003-1980 para la recolección de muestras de agua residuales deben contener la siguiente información:

En el apartado de identificación de descarga se colocó que se realizó en una presa, las tres muestras se tomaron en un periodo de 7:00 am - 7:05 am.

Tabla 1.

Tabla de registro de datos con base en la norma NMX-AA-014-1980

Hoja de registro	
Muestra número:	1
Identificación de la descarga	Muestreo en presa
Fecha y hora de muestreo	12/marzo/24
Punto de muestreo	19°57'44"N 99°18'36"O
Temperatura de la muestra	19.3 °C
Profundidad de muestreo	20 cm
Norma Jacqueline Almanza Villegas Nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo	

Así mismo se realizó etiquetas para los recipientes muestreadores con la misma información para identificar cada muestra.

Tabla 2.

Tabla de registro de datos de los recipientes

Hoja de registro	
Identificación de la descarga	Muestreo en presa
Muestra número:	
Fecha y hora de muestreo	12/marzo/24
Punto de muestreo	19°57'44"N 99°18'36"O
Temperatura de la muestra	19.3°C
Profundidad de muestro	20 cm
Norma Jacqueline Almanza Villegas Nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo	

3.8 Transporte de agua

Al término del llenado de la hoja de registro las muestras se preservaron en una hielera a 4°C. En base a la NMX-AA-012-SCFI-2001 se evitó que la muestra se agite o entre en contacto con el aire.

Figura 10.

Representación de conservación de muestras.



3.9 Preservación de la muestra

El intervalo de tiempo entre la extracción de la muestra y su análisis tiene que ser el menor tiempo posible y que no exceda de tres días con base a la NMX-AA-003-1980

Se recomienda que la toma de muestras no sea un día en el que haya llovido tiene que ser tomada un día antes y se debe anticipar un horario de recepción de muestras, ya que según la NMX-AA-003-1980 recomienda que su análisis no pase de los tres días.

3.10 Análisis de la muestra

Se prepararon las muestras de agua residual mezclando el agua residual de la Presa la Requena con agua destilada en una concentración de 0.4 ppm a 57.0 ppm, se realizó con diferentes concentraciones para que el atractor determinara como es su nivel de contaminación.

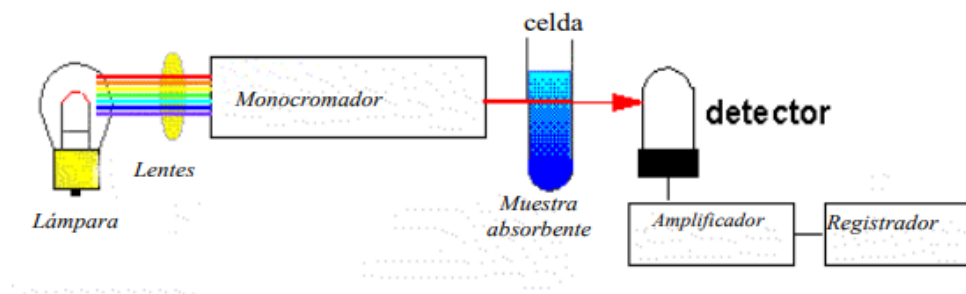
3.10.1 Espectrofotometría UV-Visible

La espectroscopía UV-Vis es un método de medición basado en la absorción de radiación UV, este método es utilizado para identificar algunos grupos funcionales de moléculas. Este método permite conocer el nivel de un compuesto en un líquido. Consiste en que las moléculas absorben radiación electromagnética en el visible o ultravioleta. La cantidad de radiación absorbida depende, entre otras cosas, de la concentración de los elementos absorbedores. Utilizado para la identificación de grupos funcionales presentes en una molécula. (C. Cuéllar, 2018).

El dispositivo detecta la luz transmitida a través de una solución que es puesta en una celda. Este dispositivo es llamado Espectrofotómetro, en la figura 6 se puede observar los componentes de un espectrofotómetro. (C. Cuéllar, 2018)

Figura 11.

Partes de un espectrofotómetro (Basado en Spectrometric Analysis 2000)



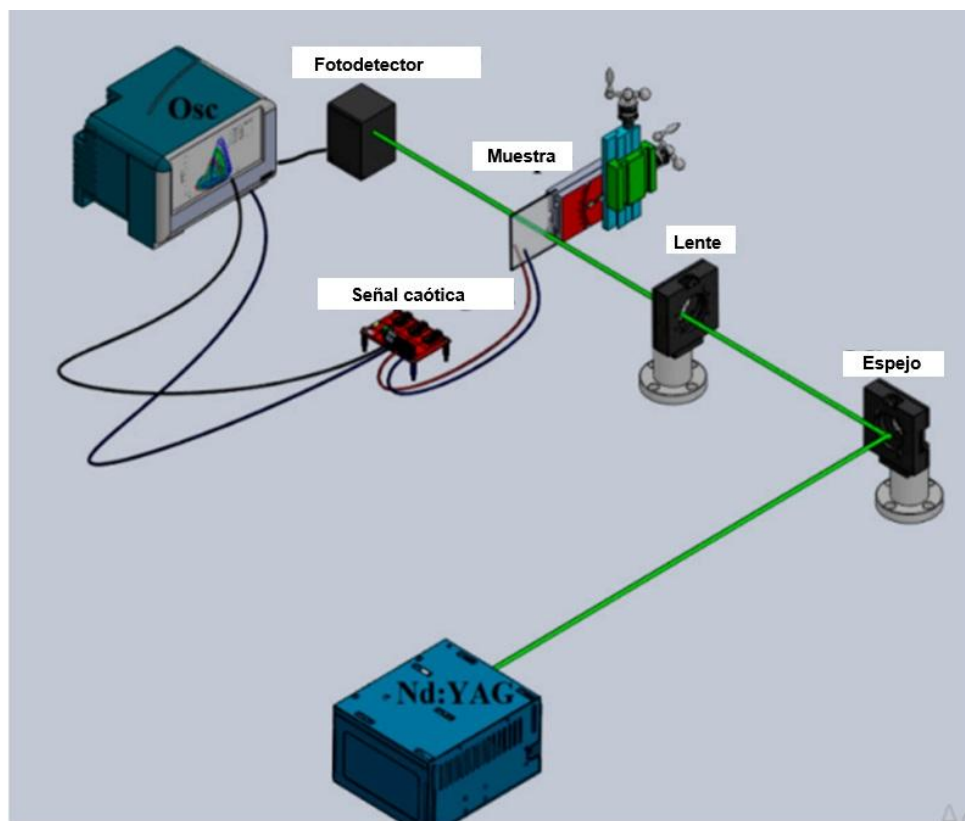
3.10.2 Atractor caótico Rössler

Es un método de gran sensibilidad, basado en un dispositivo electrónico, este método es un sistema que estudia señales con apoyo de excitaciones ópticas. Para poder poner en marcha su electrónica se necesitan ecuaciones diferenciales Rössler que muestran su comportamiento

caótico. Analizando el comportamiento de estos sistemas con el fin de examinar las variaciones en el atractor.

Figura 12.

Experimento de cómo llega la señal en el atractor caótico. (H. Martines-Arano et al, 2019)

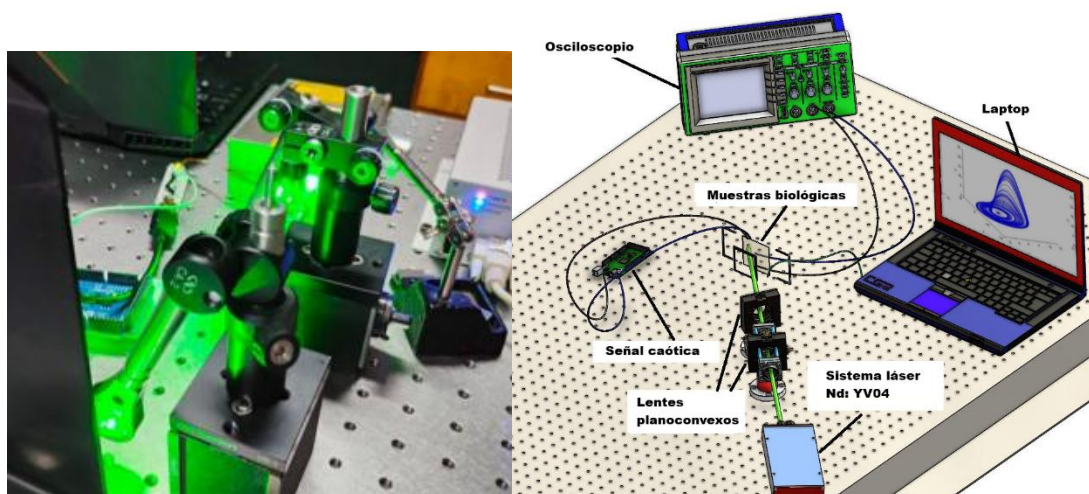


3.11 El monitoreo del atractor caótico

El análisis de la muestra se realizó por medio del atractor caótico Rössler, las muestras fueron expuestas a diferentes intensidades que oscilaban entre $2 \mu\text{J}$ y $5,1 \mu\text{J}$. Ese número de intensidades se seleccionó para observar cómo las variaciones en la entrada de energía afectan la dinámica del atractor en respuesta a las muestras de agua.

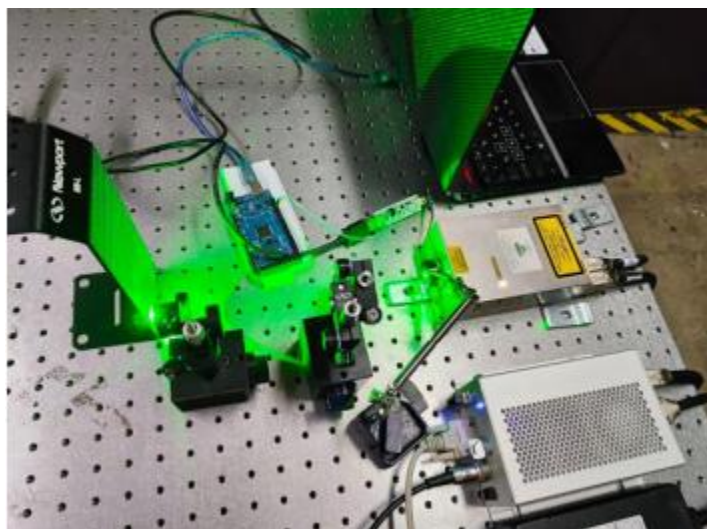
Figura. 13

Representación visual de la determinación de azul de metileno asistida por un atractor caótico.



(a)

(b)



(c)

Nota. (a) Configuración experimental de azul de metileno en agua residual. (b) Ilustración esquemática de la configuración experimental para monitorear azul de metileno suspendido en agua. (c) Configuración experimental para la determinación de la concentración de azul de metileno sin agua bidestilada

La Figura 13a es una representación visual de la determinación de azul de metileno asistida por el atractor caótico de Rössler. Se muestra el esquema óptico experimental utilizado para obtener la concentración de azul de metileno en varias muestras de agua, incluyendo agua bidestilada, agua residual tratada de la presa La Requena y agua con diferentes concentraciones de azul de metileno. El equipo incluye varios componentes: Osciloscopio: Tektronix TDS014B. Computadora portátil: Omen by HP 15" con CPU Intel® Core® i7-9750H a 2.60 GHz, con Windows 10. Lentes planoconvexas: Dos lentes con longitudes focales de 10 cm y 12 cm, respectivamente. La Figura 13a muestra el diseño del equipo experimental para la detección de azul de metileno en agua residual. Se utilizó un sistema láser pulsado Nd:YVO4 (Spectra-Physics Explorer® One™ XP) que opera a una longitud de onda de 532 nm con polarización lineal. Se utilizó una energía de pulso láser que varió entre 2 μ J y 5 μ J para excitar diferentes sondas de agua.

El rayo láser se enfocó en un tamaño de punto de aproximadamente 1 mm de diámetro, con el la cintura mínima del haz sobre la muestra es de 0,28 mm. El haz se enfocó utilizando dos lentes planoconvexas con diferentes longitudes focales para aumentar la intensidad y reducir el calor del área. El rango focal de la lente de enfoque ajustable era de aproximadamente +40 a +900 mm. La Figura 13b proporciona una ilustración esquemática de la configuración experimental para monitorear azul de metileno suspendido en agua. Este esquema destaca el uso del sistema atractor caótico para observar los cambios en las muestras de agua a medida que son irradiadas por el láser. La figura 13c muestra la configuración experimental para determinar la concentración de azul de metileno en agua bidestilada. Esta configuración contiene los mismos elementos que se detallan, con ajustes específicos hechos para adaptarse a las distintas concentraciones de azul de metileno, que varían desde 0.4 ppm a 57.0 ppm.

Para determinar las diferentes concentraciones de azul de metileno en cada caso se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{ppm} = \frac{V_{MB}}{V_{TS}} \quad (10)$$

Donde $\text{ppm} \frac{v}{v}$ es la concentración final expresada en partes por millón, V_{MB} es el volumen de azul de metileno en mL y V_{TS} es el volumen total de azul de metileno agregado en cada caso expresado en L.

El diámetro del haz del láser se redujo al mínimo debido a la difracción, lo que provocó comportamiento convergente y divergente. Esta minimización es crítica para concentrar el láser. Hasta al punto más pequeño posible, mejorando la sensibilidad de detección al aumentar la intensidad y reduciendo el área calentada en la muestra.

El monitoreo de la concentración de azul de metileno se realizó mediante la aplicación del sistema caótico de Rössler. El sistema electrónico caótico de Rössler se modela utilizando un conjunto de tres sistemas no lineales acoplados en ecuaciones diferenciales. A continuación, se muestran las ecuaciones:

$$\frac{dx}{dt} = -(y + z) \quad (11)$$

$$\frac{dy}{dt} = (x + ay) \quad (12)$$

$$\frac{dz}{dt} = b + z(x - c) \quad (13)$$

Donde x, y, z son las variables de estado, mientras que a, b, c son parámetros del sistema que determina el comportamiento del sistema. Los parámetros que fueron utilizados para observar el comportamiento caótico fueron $a = 0.2$, $b = 0.2$ y $c = 5.7$, estos parámetros se utilizan comúnmente para el atractor de Rössler estos fueron empleados por primera vez por Rössler. El atractor caótico es programado en una placa Arduino para crear perturbaciones electrónicamente caóticas.

Luego, conectamos el circuito al osciloscopio para observar el atractor caótico. El osciloscopio mostraba las proyecciones $x - y$, $x - z$ o $y - z$ del atractor, mostrando el característico comportamiento caótico del sistema de Rössler.

3.12 Análisis de datos

Por medio del atractor caótico Rössler se analizaron los niveles de azul de metileno en el agua residual, para observar los cambios en el agua en diferentes concentraciones de azul de metileno. Iniciando se prepararon soluciones de azul de metileno con concentraciones 0.4 ppm y 57.0 ppm diluyendo azul de metileno con agua bidestilada con ayuda de una micropipeta. Para una mejor precisión de las concentraciones finales se utilizó el agua bidestilada debido a su pureza. El empleo de la micropipeta ayudó a que la medición de las soluciones de azul de metileno fuese precisa y tuviera reproductividad durante el proceso de dilución.

La medición con el atractor caótico se realizó directamente con dos electrodos que van dentro del vial, dentro del vial está la muestra de agua residual, y su salida es hacia el osciloscopio.

Cuando hay irradiación láser en la muestra hay un cambio de temperatura, esto por un haz de luz a con mayor intensidad de láser aumenta la temperatura, esto se genera por la interacción de sus partículas. Cuando la temperatura aumenta hace que la muestra cambie sus condiciones iniciales y si las condiciones cambian el atractor va a modificar su forma. Para obtener variaciones en el atractor es por medio de la intensidad del láser y por las concentraciones de azul de metileno.

En la figura 14 se muestra la representación visual del proceso de preparación entre las concentraciones de azul de metileno y la forma del atractor caótico Rössler.

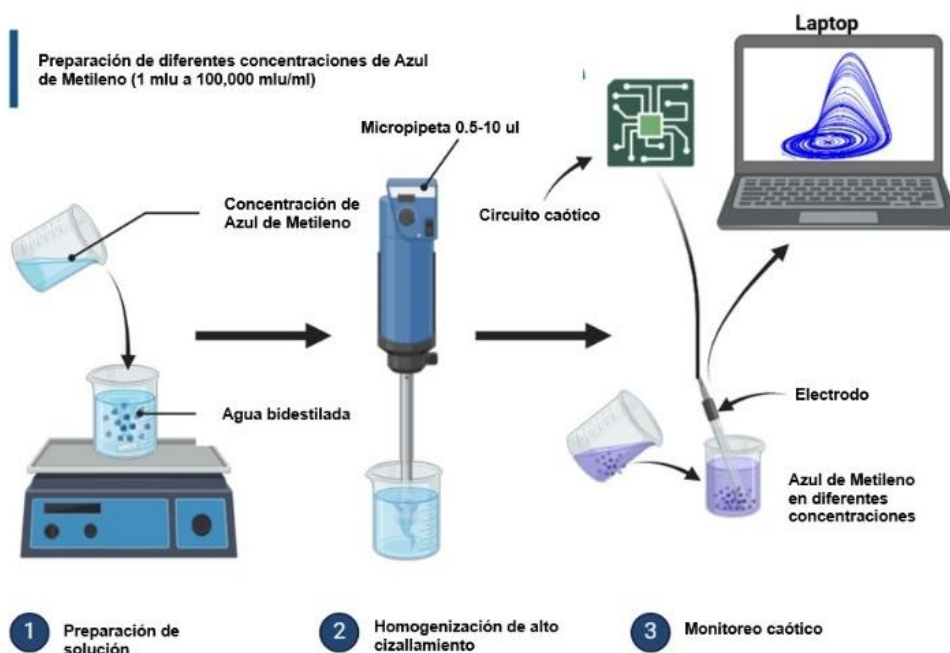
Se presenta diferentes viales etiquetados con las diversas concentraciones de azul de metileno (0.4 ppm, 4.0 ppm, 12.0 ppm, 24.0 ppm, 39.0 ppm y 57.0 ppm). También se observa como con ayuda de la micropipeta las soluciones de azul de metileno son de mediciones exactas y reguladas.

Cada vial está vinculado a una forma diferentes del atractor caótico y muestra una concentración diferente de azul de metileno. Por ejemplo, la forma del atractor varía entre 0.4 ppm y 57.0 ppm de solución de concentración de azul de metileno. La figura 14 representa la relación que existe entre la dinámica caótica del atractor y las diferentes concentraciones del azul de metileno.

En la figura 14 la configuración experimental representa una conexión entre el uso de la micropipeta y el agua bidestilada entre la preparación de la concentración de azul de metileno, así también las formas del atractor caótico de Rössler para distintas concentraciones de azul de metileno.

Figura 14.

Ilustración esquemática de la configuración experimental. (H. Martines-Arango et al, 2024)



3.13 Temperatura inducida por láser pulsado mediante cálculo fraccionario

Para calcular la temperatura inducida se utilizó una fuente láser Spectra-Physics Explorer Nd:YVO4, es un láser de estado sólido bombeado por diodo que opera en el rango de 532 nm (verde), este fue el usado en la experimentación. El pulso típico de este láser está en el rango de: Duración del pulso con aproximadamente < 15 ns (nanosegundos), con una energía de pulso constante de $7,3 \mu\text{J}$. Para obtener la temperatura de la muestra se realizó mediante cálculo fraccionario, que proporciona una representación más exacta del proceso de difusión de calor.

La solución numérica de la ecuación del calor fraccional se resolvió numéricamente aplicando la definición de Caputo. Se aproximó de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^\alpha T(x,t)}{\partial t^\alpha} \approx \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{T(t_{j+1}) - T(t_j)}{(t_n - t_j)^\alpha} \quad (14)$$

Donde $T(x, t)$ representa la temperatura en la posición x y el tiempo t , mientras que α ($0 < \alpha < 1$) es el orden de la derivada fraccional de tiempo. Γ es la función Gamma.

La forma discretizada de la ecuación del calor fraccional se solucionó de forma iterativa con base en métodos de diferencias finitas. En cada paso de tiempo, la distribución de temperatura se actualizó en función de las contribuciones de la fuente de calor y el término de difusión.

La Figura 15 se presenta la configuración experimental diseñada para monitorear las concentraciones de azul de metileno en muestras de agua utilizando un atractor de Rössler en estado estacionario. Se observa una micropipeta en el lado izquierdo de la imagen; se utiliza una micropipeta para medir y transferir con precisión diferentes concentraciones de azul de metileno

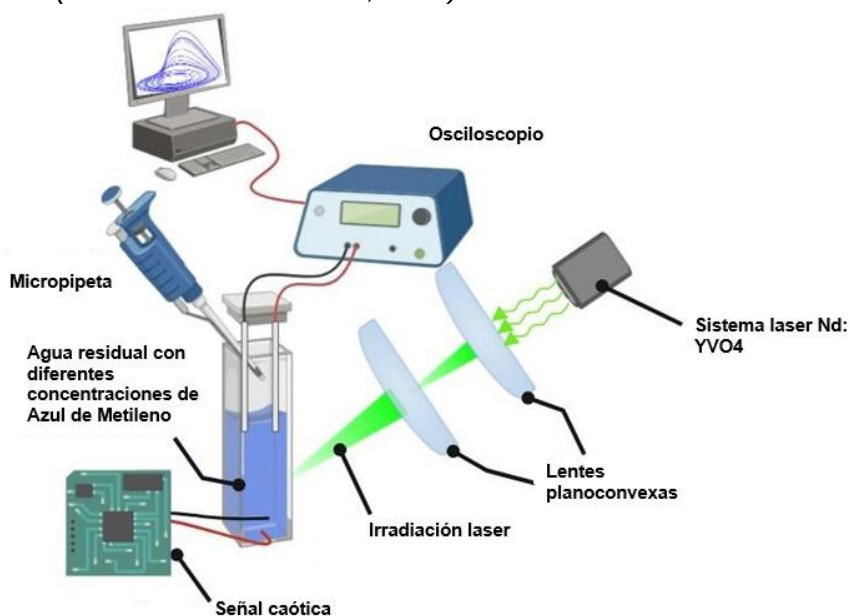
a las muestras de agua. La micropipeta se representa con varios viales que contienen soluciones de azul de metileno en diferentes concentraciones.

Una laptop (Omen by HP 15" Intel® Core™ i7 9750H CPU 2.60 GHz, Windows 10) está conectado al sistema experimental. La computadora se utiliza para controlar los parámetros del láser, registrar datos de los sensores y procesar las señales generadas por el atractor de Rössler. A Nd:YVO4 (SpectraPhysics Explorer® One™ XP).

El láser dispara luz monocromática a 532 nm. El rayo láser se enfoca sobre la muestra utilizando una lente plano-convexa de Newport con una distancia focal de 20 cm. En el centro de la figura 4 aparece una muestra de agua, un recipiente integra la muestra de agua mezclada con diferentes concentraciones de azul de metileno. El rayo láser se muestra enfocado sobre esta muestra, señalando el punto de irradiación. Se conecta un osciloscopio (Tektronix TDS014B) a la muestra de agua para monitorear la señal caótica generada por el atractor de Rössler. El osciloscopio muestra los caóticos patrones de atractores resultantes, que cambian según la concentración de azul de metileno en el agua.

Figura 15

Ilustración esquemática del experimento para monitorear diferentes concentraciones de azul de metileno en la muestra estudiada utilizando un atractor de Rössler en estado estacionario como señal de entrada. (H. Martines-Arano et al, 2024)



Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es un método de análisis espectroscópico utilizado para examinar cuantitativamente casi cualquier tipo de material, ya sea de origen orgánico o inorgánico. Entre sus principales beneficios se encuentran la ausencia de necesidad de preparar la muestra antes del análisis y la naturaleza no destructiva del proceso. (Cano, V. G., & Márquez, J. O, 2014). La espectroscopía Raman tradicional evalúa directamente la intensidad de la radiación dispersada por los modos vibracionales de las moléculas en función de la frecuencia (o del número de onda). Esta evaluación proporciona datos importantes sobre la composición química del material analizado. Entre las herramientas más básicas para examinar los espectros de los objetos se encuentran los espectrómetros dispersivos. Estos dispositivos miden el espectro de una fuente al descomponer la radiación entrante en sus distintos componentes espectrales. (Orozco, B. S., 2018).

3.14 Medición por espectroscopía Raman de agua residual

Para obtener los espectros Raman de diversas muestras, se prepararon y analizaron tres tipos diferentes. La primera muestra consistió en agua bidestilada a la que se añadió una concentración 12.0 ppm de azul de metileno. La segunda muestra consistió en agua residual a la que se añadió una concentración de 12.0 ppm de azul de metileno. La tercera muestra fue agua residual sin tratar, sin la adición de azul de metileno. Para cada una de las tres muestras, se colocó una sola gota sobre un portaobjetos de microscopio, y se dejó reposar hasta que el líquido se evaporó por completo, dejando un sedimento. Después este sedimento se sometió a análisis de espectroscopía Raman. Las mediciones Raman se realizaron utilizando un microscopio Raman Xplora Plus con una longitud de onda de 532 nm, esta configuración ayudó

a que el análisis de los residuos sedimentarios de cada muestra fuera detallado, facilitando la comparación de los espectros Raman entre los diferentes tipos de muestras. La espectroscopía Raman mide espectros de modos de vibración o agitación molecular.

Los espectros de absorbancia UV-vis de azul de metileno disuelto en agua bidestilada se midieron usando un espectrómetro UV-vis (espectrómetro de fibra óptica © Ocean Optics USB2000) agregando una concentración de azul de metileno 12.0 ppm a una solución de agua bidestilada.

Capítulo 4.

Resultados

En investigaciones previas se encontró la problemática del azul de metileno en Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo, por su excesiva fabricación de telas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la experimentación, señalan de qué manera se encontró el azul de metileno en el agua residual de la presa “La Requena”, por medio del atractor caótico Rössler, utilizando diferentes concentraciones de azul de metileno como referencia a diversos pulsos de energía, y cómo los resultados fueron interpretados en gráficas.

En la figura 16 se observan espectros de absorbancia UV-vis de azul de metileno, que se disolvió en agua bidestilada a una concentración de 12.0 ppm. Los resultados señalan que el pico se encuentra principalmente en el rango espectral de 663-664 nm. La longitud de onda en la que el azul de metileno muestra su absorbancia más alta es en este rango donde se observa que interactúa intensamente con la luz en esta área. Las transiciones electrónicas moleculares únicas del compuesto se muestran en este comportamiento de absorción.

Figura. 16.

Datos experimentales que describen los espectros de absorbancia UV-vis mostrados en azul de metileno suspendido en agua.

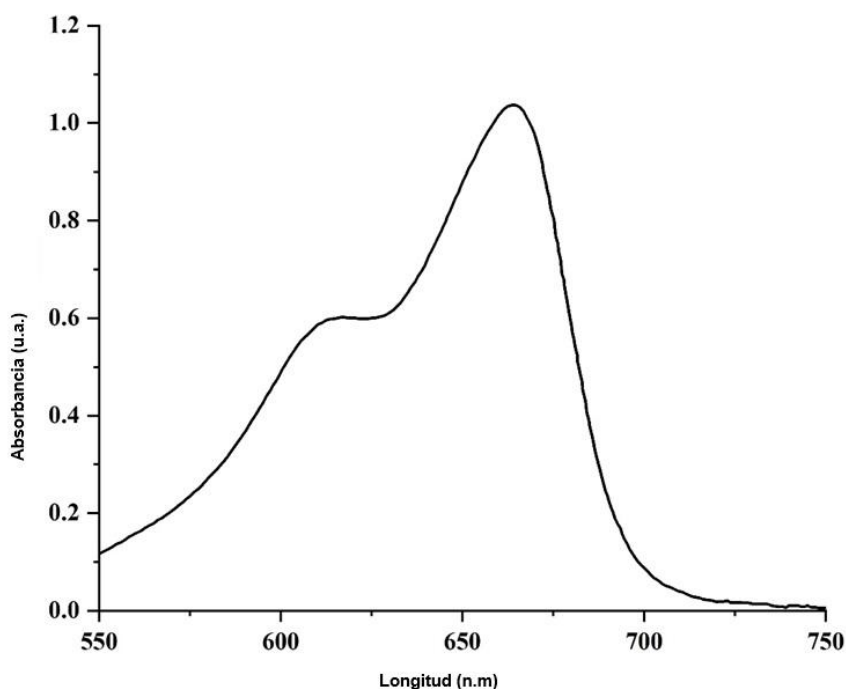
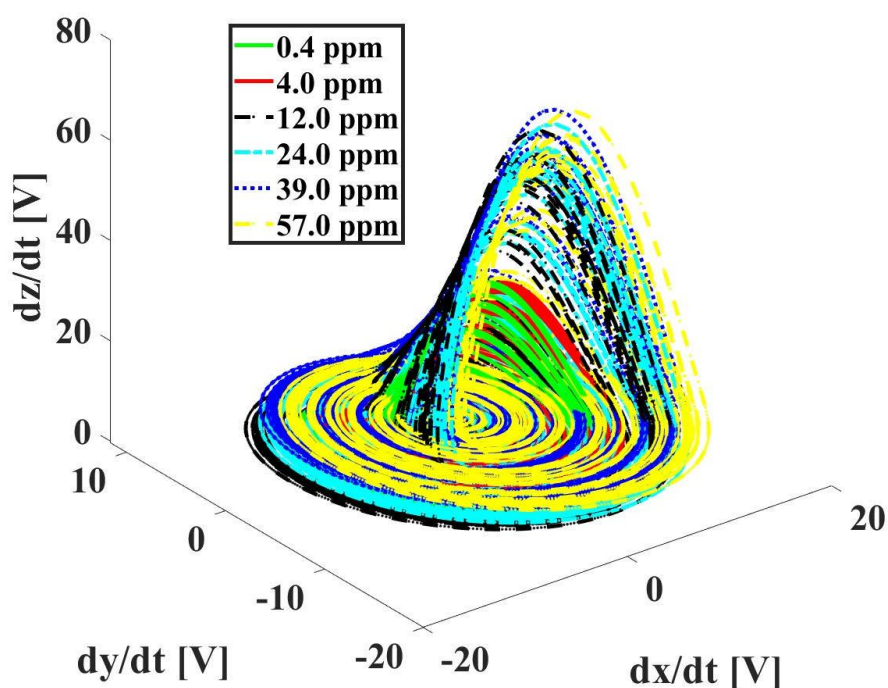


Figura 17 muestra la configuración experimental y los resultados del monitoreo de diferentes concentraciones de azul de metileno utilizando el atractor caótico de Rössler bajo exposición a láser con una energía de pulso constante de $7,3 \mu\text{J}$. Se emplean señales de voltaje del atractor caótico de Rössler a las muestras y sus respuestas se monitorean y registran. La Figura 17 indica las diferentes formas del atractor caótico de Rössler correspondientes a las distintas concentraciones de azul de metileno disueltas en agua bidestilada. Se observa que las formas del atractor cambian significativamente entre concentraciones más bajas (0.4 ppm) y concentraciones más altas (57.0 ppm), lo que indica una relación entre la concentración de azul de metileno y el comportamiento del atractor. Los resultados indican que concentraciones más altas de azul de metileno producen respuestas más intensas y complejas en el atractor caótico, mientras que concentraciones más bajas generan reacciones más débiles. Estas variaciones en las formas de los atractores sugieren la presencia de dinámicas no lineales dentro del sistema, lo que muestra la sensibilidad del atractor a los cambios en los niveles de azul de metileno. Las formas de los atractores evidencian la sensibilidad del sistema caótico a las variaciones en la concentración de azul de metileno, lo que sugiere el potencial para una cuantificación precisa de los niveles de azul de metileno basada en el comportamiento del atractor.

Figura 17

Formas caóticas experimentales para diferentes concentraciones de azul de metileno suspendidas en agua bidestilada.

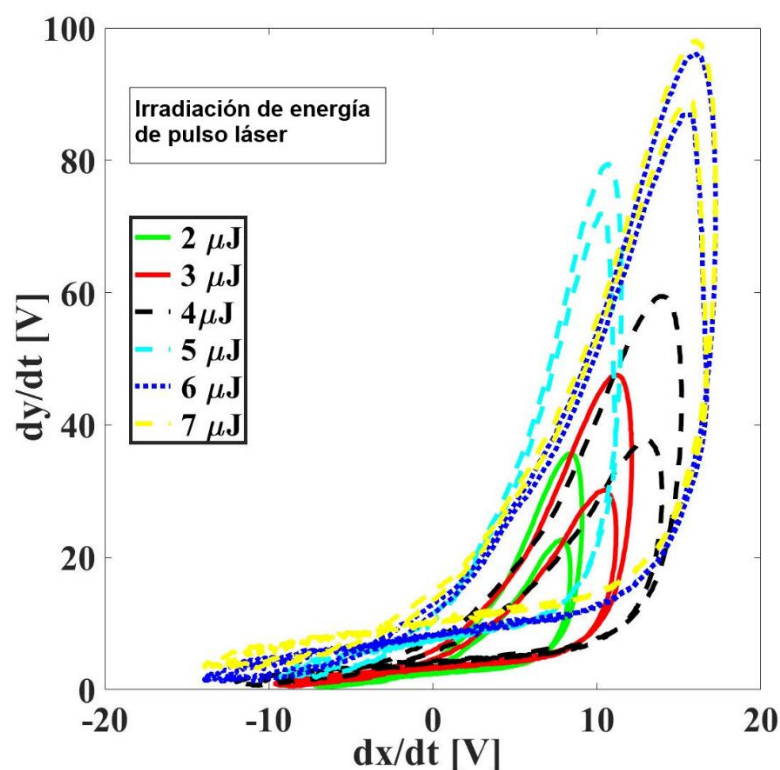


La Figura 18 muestra los resultados logrados variando la energía del pulso de $2 \mu\text{J}$ a $7 \mu\text{J}$. Los datos presentados se centran específicamente en los ejes x y y del atractor caótico de Rössler. El experimento se realizó con muestras de agua residual de la presa de Requena en Hidalgo. El rayo láser excitó las muestras de agua para inducir respuestas observables en el atractor caótico de Rössler. En la figura 18 se puede observar que hubo cambios notables en la estructura del atractor, lo que indica diferentes respuestas dinámicas a variados niveles de energía. Los resultados experimentales ilustran variaciones significativas en las formas de los atractores, lo que refleja la dinámica no lineal y la sensibilidad del sistema a las concentraciones de azul de metileno.

Las diferentes formas del atractor observadas a distintas energías de pulso ($2 \mu\text{J}$ a $7 \mu\text{J}$) proporcionan un medio visual y cuantitativo para valorar la presencia y concentración de azul de metileno en el agua. Esto enmarca su funcionalidad del atractor con el monitoreo ambiental y la detección de contaminantes.

Figura 18

Resultados experimentales del monitoreo del atractor caótico de Rössler azul de metileno en aguas residuales de la presa de Requena.



La Figura 18 muestra la distribución de temperatura dentro de la muestra durante la irradiación con láser a de 2 μJ a 7 μJ . La estimación de la temperatura se realiza utilizando $\alpha = 0.5$ como factor de integración de Caputo. Se observa que la temperatura máxima alcanzada en este escenario es de 150 $^{\circ}\text{C}$.

Las temperaturas más altas dan como resultado formas de atractores más significativas y complejas, lo que sugiere la presencia de una dinámica no lineal influenciada por la distribución del calor dentro de la muestra. Esta relación subraya la sensibilidad del atractor caótico de

Rössler a los cambios de temperatura, que pueden ser indicativos de las propiedades térmicas de las muestras y el impacto de la irradiación láser.

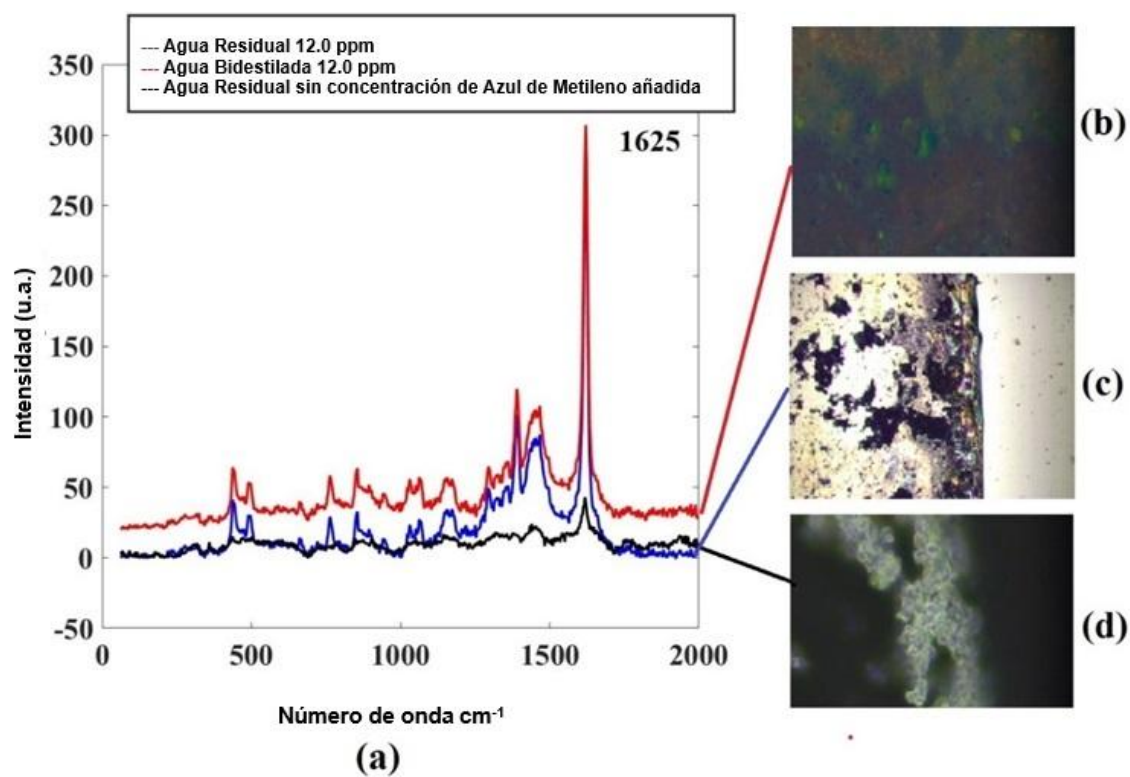
La Figura 19 muestra tres espectros Raman diferentes correspondientes a tres muestras distintas. Como característica los picos Raman azul de metileno ubicados entre 446 y 1620 cm^{-1} se pueden observar en agua residual y bidestilada contaminada con azul de metileno. La línea roja representa el espectro Raman del agua residual obtenida directamente de la Presa de Requena, sin concentración añadida de azul de metileno. Un pico prominente a 1620 cm^{-1} , indicando la presencia de azul de metileno en la muestra de agua residual. También se pueden observar otros picos débiles en 1452 cm^{-1} , 1175 cm^{-1} , 437 y 490 cm^{-1} también típicos de la señal Raman de azul de metileno, se observa la presencia de azul de metileno en el agua residual.

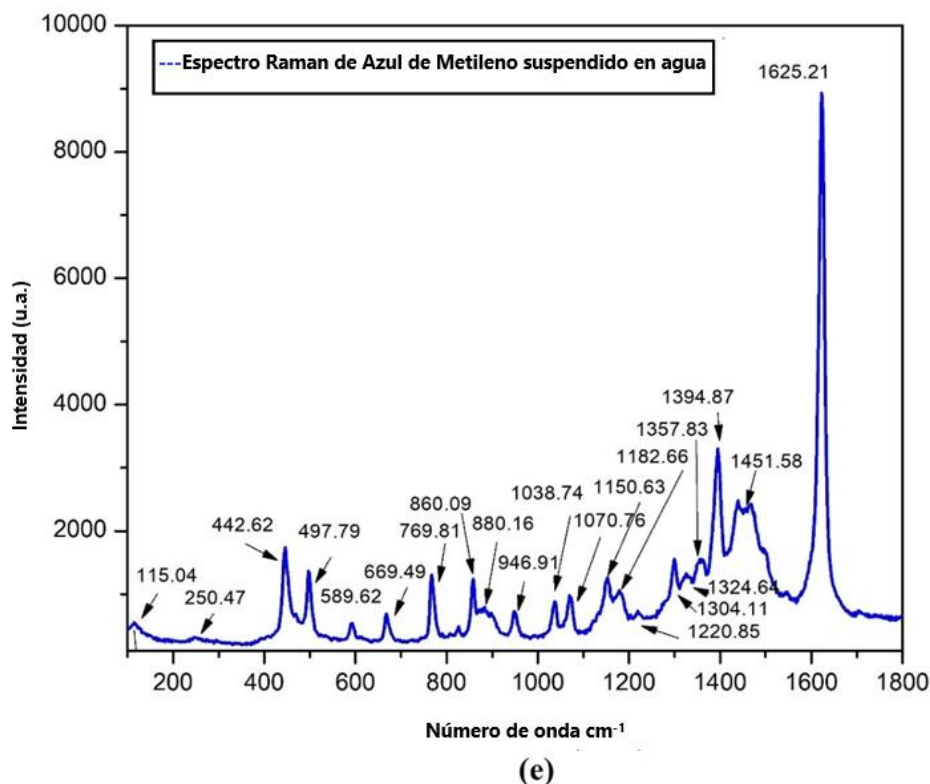
La línea azul representa el espectro Raman del agua bidestilada donde se añadió una concentración de 12.0 ppm de azul de metileno. Este espectro ilustra un comportamiento característico previamente reportado para el azul de metileno (F. D. Utami, 2018, N. Nedyalkov, 2017) con el pico principal ubicado a 1620 cm^{-1} , confirmando la presencia de azul de metileno. La línea negra representa el espectro Raman del agua residual con una concentración añadida de 12.0 ppm de azul de metileno. Este espectro también presenta el mismo pico a 1620 cm^{-1} , lo que indica la presencia de azul de metileno. La Figura 19b indica la micrografía del sedimento de la muestra de agua residual sin tratar, sin azul de metileno agregado. La Figura 19c es la micrografía del sedimento de la muestra con una concentración añadida de 12.0 ppm de azul de metileno y de agua bidestilada. La Figura 19d indica la micrografía del sedimento de la muestra de agua residual con una concentración agregada de 12.0 ppm de azul de metileno. En la figura 19e indica el espectro Raman con azul de metileno suspendido en el agua, los distintos picos corresponden a los modos vibracionales de la molécula de azul de metileno, lo que proporciona información sobre las moléculas de interacción dentro del medio acuoso. En base a las

publicaciones anteriores y los estudios anteriores, en la figura 19e se muestra que coincide y se confirma con dichos estudios. (C. Li, Y. Huang, et al, 2016)

Figura 19.

Espectro Raman con azul de metileno suspendido en el agua





Nota: Espectro Raman de diferentes concentraciones de azul de metileno en agua bidestilada, agua residual con 12.0 ppm y agua residual sin azul de metileno añadido. (a) Espectros Raman: la línea roja representa el agua residual sin tratar de la presa de Requena, mostrando un pico a 1620 cm^{-1} ; la línea azul representa el agua bidestilada 12.0 ppm azul de metileno, mostrando un pico característico a 1620 cm^{-1} ; la línea negra representa el agua residual con 12.0 ppm azul de metileno, mostrando también un pico a 1620 cm^{-1} . (b) Micrografía de sedimento de agua residual sin tratar. (c) Micrografía de sedimento de agua bidestilada con 12.0 ppm azul de metileno. (d) Micrografía de sedimento de agua residual con 12.0 ppm azul de metileno.

Anteriormente se investigó acerca de la detección del azul metileno disuelto en el agua ya que es de suma importancia en el tratamiento de aguas residuales y el monitoreo ambiental (L. Díaz-Torres, 2014)

Investigaciones preliminares han empleado métodos espectrofotométricos para cuantificar concentraciones de azul de metileno (L. Díaz-Torres, et al. 2016), Ejemplo, a lo largo de los años se han desarrollado sensores colorimétricos en base la interacción de azul de metileno con reactivos específicos para lograr detectar su presencia y concentración en muestras de agua (M. Hulupi, et al 2023)

En el área de aplicación de láseres para encontrar metales pesados o elementos suspendidos en el agua se han realizado investigaciones (J. Fito, et al, 2023). La espectroscopia de ruptura inducida por láser (LIBS) está apoyando en la cuantificación y determinación de plomo, mercurio y metales de cadmio en agua (J. Fito, et al, 2023). Por ejemplo, un estudio utilizó LIBS para el análisis de trazas de iones de plomo en aguas residuales y para obtener el monitoreo en tiempo real de contaminantes del agua mostró que las técnicas basadas en láser son viables (J. Fito, M. Abewaa, et al. 2023) (K. Sharma, 2021). También, para la detección de contaminantes en las aguas residuales ha ido evolucionando el cálculo fraccional en sensores además de las técnicas de medición (B. Keskin, et al., 2020)

La dinámica de sistemas complejos en comparación con los modelos tradicionales en órdenes enteros se utilizan los sistemas de orden fraccional lo describen más a fondo (S. Ma, et al, 2023) Por ejemplo, para mejorar la sensibilidad y la precisión en sensores destinados a la detección de contaminantes en el agua se han creado modelos de orden fraccional. Investigaciones preliminares dice que el papel del cálculo fraccional en el desarrollo de un sensor para la medición de la concentración de arsénico en el agua, demostró ser mucho más preciso en relación con los métodos convencionales (I. Dey, et al, 2022) (A. Lopes Ferrari, 2024)

Para que las predicciones sean más confiables de variación de la temperatura con el tiempo se utilizan los modelos de orden fraccional ya que son más efectivos para expresar la memoria y las características hereditarias de tales procesos térmicos (Y. Guo et al. 2022) La

aplicación de modelos de cálculo fraccional puede simular la dinámica de la transferencia de calor. La aplicación de técnicas basadas en láser y cálculo fraccional ha sido un área activa de investigación en la detección de azul de metileno y otros contaminantes en el agua. Estos enfoques pueden mejorar sustancialmente la sensibilidad, la precisión y la confiabilidad asociadas con su potencial para el monitoreo de la calidad del agua.

Capítulo 5.

Discusiones

La contaminación de las industrias textiles cada vez es más grande y esto se debe a su alta demanda, el azul de metileno es ocupado para teñir ropa y al llegar esta sustancia al agua causa graves problemas, se interrelacionan con medios terrestres, acuáticos y atmosféricos.

El azul de metileno causa efectos secundarios graves en la salud del ser humano, como lo son algunas enfermedades mencionadas anteriormente. Lo que se obtuvo fueron variaciones significativas en las formas de los atractores lo que indica una dinámica no lineal y la sensibilidad del sistema a las concentraciones de azul de metileno (A. Mahrach, et al. 2024)

El azul de metileno afecta las propiedades químicas y físicas al encontrarse con el agua; esto influye directamente con el comportamiento del atractor. Cuando hay una concentración alta de azul de metileno da como resultado formas más complejas y pronunciadas, esto se debe a que hay mayor conductividad eléctrica y reactividad de la solución. (H. Lin, et al, 2020) Por otro lado cuando las concentraciones de azul de metileno son bajas, dan lugar a configuraciones en el atractor más simples.

El uso del atractor caótico Rössler es de gran ayuda para identificar niveles de azul de metileno en aguas residuales. (X. Dong, et al. 2023) El agua residual que contiene diferentes concentraciones de azul metileno, se expuso a diferentes energías de pulso, lo que resultó que el atractor reflejara una interacción dependiente de la concentración entre las moléculas de azul de metileno y las señales eléctricas que fueron aplicadas. (M. K. Ahmed, et al. 2020). Las moléculas del azul de metileno en el agua provocan que se absorba la energía del láser, alterando las propiedades eléctricas y ópticas de la solución. (Y.-J. Huang, et al. 2024)

El mecanismo que provoca la distribución térmica y el efecto fototérmico en el contaminante dentro del agua se le conoce como la absorción de fotones (X. Cui, et al 2023) Al momento de que las moléculas de azul de metileno absorben la energía del láser aumenta la temperatura del agua, y esto provoca cambios en la propiedades eléctricas y ópticas de la

solución (M. S. Irshad, et al. 2021). Se debe a los cambios significativos en el desarrollo del atractor. (H. Martines, et al. 2019)

Las diversas formas de atractores caóticos asociadas a distintas energías de pulso mostraron la tendencia del sistema al reaccionar a la entrada de energía y también a las diversas concentraciones de azul de metileno. Al tener una fuerte interacción entre el láser y las moléculas de azul de metileno ocasiona que la forma de los atractores caóticos aumente con la creciente intensidad del pulso. Cuando se aumentó la energía de pulso se excitaron las moléculas de azul de metileno, lo que desarrollo un efecto térmico y fototérmico muy fuerte, esto puede ser un factor adicional para el aumento de la entropía del sistema y su relación con el incremento de la respuesta del atractor. Por ende, mejora la dinámica no lineal del sistema, y esto dando como resultado formas más complejas y pronunciadas para los atractores. Conforme a los resultados, la naturaleza cualitativa a mayor entrada de energía genera un mayor caos y esto se debe a que hay una mayor excitación e interacción dentro de una muestra.

Los resultados obtenidos sugieren una fuerte relación entre las diferentes concentraciones de agua con azul de metileno, observadas en el atractor dentro de un rango de 12.0 ppm y 57.0 ppm. Diversas concentraciones de azul de metileno provocan distintas formas del atractor caótico Rössler. Al obtener un comportamiento así en los resultados puede ser útil para una investigación para conseguir una estimación de azul de metileno en las muestras de agua residual y buscar alternativas para que su concentración disminuya en el agua, ya que provoca enfermedades en los seres humanos y no un buen desarrollo en la vida vegetal y marina.

Los espectros Raman muestran que en el agua residual de la presa la Requena hay una presencia de azul de metileno. Se visualiza que los picos 1620, 1469, 768, 437, 490 y 1175 cm^{-1} son una huella dactilar de agua residual cuando hay presencia de azul de metileno.

Como resultado con el agua bidestilada y el agua residual con azul de metileno se obtienen picos parecidos. Al detectarlo en el agua funciona como indicador de contaminación y se requiere que se dé un seguimiento para evaluar los efectos en la salud, así como los del medio ambiente.

Con ayuda de otros principios, otros atractores caóticos y sistemas láser se pueden desarrollar sensores más precisos o sensibles para la detección de contaminantes en el agua. Esta tesis será de gran ayuda ya que es una nueva forma de detectar contaminantes en el agua, y es rápida y efectiva, así apoyará futuras investigaciones de temas similares.

Capítulo 6.

Conclusiones

La problemática de Tepeji del Río de Ocampo es la gran cantidad de desechos químicos que llegan al agua, investigando más a fondo se optó por el análisis del agua de la presa la Requena ya que es una zona donde la población suele realizar actividades. Para su análisis se tomó la muestra simple de agua en base a la normativa mexicana.

Con apoyo y uso de atractores caóticos, calculo fraccional y sistemas laser se analizó el uso del atractor caótico Rössler para la detección de azul de metileno en agua residual de la presa Requena. Utilizando este método se obtuvo el comportamiento no lineal de las diversas concentraciones de azul de metileno en el agua. Los resultados obtenidos mostraron las formas distintivas y dependientes de los niveles de azul de metileno. Integrando el cálculo fraccional con la irradiación laser fue de apoyo para la detección de azul de metileno. El método pudo distinguir entre las diferentes concentraciones de Azul de Metileno. Con ayuda del láser pulsado Nd:YVO4 a una longitud de onda de 532 nm, se observó lo que influía en las respuesta térmicas y el efecto fototérmico en las soluciones de azul de metileno eran las diferentes energías de pulso, que oscilaban entre 2 μJ a 7 μJ . El cálculo fraccional resultó eficaz para modelar la distribución de la temperatura dentro de la muestra de azul de metileno bajo la irradiación láser. Con base a lo obtenido en el espectro Raman se concluyó que existe azul de metileno en el agua de la presa la Requena, mostrando un pico significativo de 1620 cm^{-1} . Al realizar la medición con agua destilada y azul de metileno diluido se observaron picos similares al agua residual de la presa La Requena, confirmando la detección del azul de metileno. Posteriormente, al realizar la medición con el atractor caótico Rössler fue más confiable e innovador porque normalmente se ocupan otros métodos que al momento de realizar la experimentación son más complejos.

Como resultado a otras características que se obtienen del atractor caótico de Rössler y sistemas láser se menciona que a mayor irradiación láser su temperatura es más alta, lo que provoca calor dentro de la muestra, esta relación muestra la sensibilidad del atractor y el gran impacto que da a las propiedades térmicas de la muestra.

Respecto al Espectro Raman fue utilizado para validar los resultados del atractor caótico Rössler, ya que es una técnica no destructiva y la medición es rápida. Poniendo en pie a futuras generaciones con sus investigaciones, siendo también de apoyo al sector salud. Como ingeniero industrial es fundamental el conocimiento de técnicas y métodos que permiten la detección de indicadores de calidad del agua. El conocimiento y desarrollo de la tesis han permitido fortalecer las competencias en mi profesión. Se obtuvieron datos valiosos y de apoyo para la protección ambiental, buscando la manera de minimizar el uso del azul de metileno, además que va acompañado de una serie de normas e iniciativas que promueven prácticas sostenibles.

Referencias

- Lopes Ferrari, M. Carolina Sérgi Gomes, A. Caroline Raimundini Aranha, S. Marques Paschoal, G. de Souza Matias, and R. Oliveira Defendi, "Mathematical modeling by fractional calculus applied to separation processes," Sep. Purif. Technol., vol. 337, no. 126310, p. 126310, 2024.
- A. Maznev, J. Hartmann, and M. Reichling, "Thermal wave propagation in thin films on substrates," J. Appl. Phys., vol. 78, no. 9, pp. 5266–5269, 1995.
- A. Mahrach, D. Bestue, X.-L. Qi, C. Constantinidis, and A. Compte, "Cholinergic neuromodulation of prefrontal attractor dynamics controls performance in spatial working memory," J. Neurosci., p. e1225232024, 2024.
- Aranda, F. D. (Febrero de 2021). Obtenido <http://www.fc.uaslp.mx/pca/tesis/2021Doctorado/DelgadoArandaFinnes-Doctorado2021.pdf>
- A. F. Cirelli y A. V Volpedo, "Indicadores Físico-Químicos: ¿Qué, Cómo Y Cuánto Reflejan La Calidad Del Agua?".
- Beker, V. A. (2003). La teoría del caos: una explicación simple de un fenómeno complejo. Bol. Acad. Nac. Med. B. Aires, 91-104.
- Biól. Julio Cesar González Laurrabaquio, M. e. (2006). Estudio Biológico-Pesquero, Socioeconómico, Y Elaboración Del Plan De Manejo Del Embalse, De La Presa Requena, Municipio De Tepeji Del Río De Ocampo.

- B. Keskin, A. Üzer, and R. Apak, "Colorimetric sensing of ammonium perchlorate using methylene Blue-Modified gold nanoparticles," *Talanta*, vol. 206, no. 120240, p. 120240, 2020.
- Calva., A. J. (2019). Obtenido de <https://infogram.com/socializacion-comparto-mi-proyecto-1h7g6ky78gvg4oy>
- Cano, V. G., & Márquez, J. O. (2014). *Espectroscopía Raman: Fundamento y aplicaciones*.
- Castellanos Cuéllar, I. C. (2018). *Aplicaciones y generalidades de un espectrofotometro UV-VIS V-1800*. Colombia: EAN.
- C. Li, Y. Huang, K. Lai, B. A. Rasco, and Y. Fan, "Analysis of trace methylene blue in fish muscles using ultra-sensitive surface-enhanced Raman spectroscopy," *Food Control*, vol. 65, pp. 99–105, 2016.
- Cortéz, J. (2022). *Espectrofotometría Uv-Vis Para La Detección De Metales En Agua*. Volumen XIV Mayo 2022, 10.
- Cuetara, D. G. T., & García, C. T. (2021, July). *Consumismo de ropa y contaminación de la industria textil: una propuesta para revertirlo*. In *DIS* (No. 9, pp. 1-24).
- C. G. Urbina, Marzo 2019.
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/104539/UAEM-FaPUR-TEESIS-Carolina%20Gardu%C3%B1o%20Urbina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Díaz, N. A., Ruiz, J. A. B., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado, J. P., ... & Fiñana, I. T. (2010). *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Universidad de Córdoba, 1-8.

de Farmacia Hospitalaria, S. E., & de Farmacia, R. A. S. S. Azul de metileno.

D. López-Hernández, C. Hernández, F. Liendo, J. Urich, y O. Vallejo-Torres, "Effects of sewage fluids from oil drillings on the soils of savannas located near El Furrial, Monagas State, Venezuela", *Rev. Int. Contam. Ambie*, vol. 36, núm. 4, pp. 835–845, 2020, doi: 10.20937/RICA.53600.

FERNANDO STICK RAMOS GARZON, B. A. (2017). DECOLORACIÓN Y DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO PRESENTE EN AGUA. Obtenido de https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11182/TRABAJO%20DE%20GRADO_Fernando%20Ramos%20y%20Brayan%20Banco_CorreccionesJunio.pdf?sequence=1&isAllowed=y

F. D. Utami, D. Y. Rahman, E. Sustini, and M. Abdullah, "Immobilization of TiO₂ on transparent plastic and its application in photocatalytic wastewater treatment," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1171, p. 012030, 2019.

Frutos, A. G. (Junio de 2021). Obtenido de https://oa.upm.es/68410/1/TFM_Ana_Garcia_Frutos.pdf

GMX, s. (2019). La Industria de Curtiduría y su Impacto con el Cambio Climático. Obtenido de <https://www.gmx.com.mx/Code/templates/images/PDFs-descargables-sitio/Tercera%20GP%20La%20Industria%20de%20Curtidur%C3%ADa%20y%20su%20Impacto%20con%20el%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf>

Guerra Que, Z., García Alamilla, P., Urrieta Saltijeral, J. M., Torres Torres, J. G., & Oropeza Tosca, D. R. (2023). Remoción De Azul De Metileno En Aguas Residuales Industriales Usando Bioabsorbentes De Bajo Costo. *Revista Ipsumtec*,

6(5), 27–35. Recuperado a partir de
<https://revistas.milpaalta.tecnm.mx/index.php/IPSUMTEC/article/view/201>

- H. Lin, C. Wang, W. Yao, and Y. Tan, “Chaotic dynamics in a neural network with different types of external stimuli,” *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 90, no. 105390, p. 105390, 2020.
- H. E. Lee et al., “Skin-like oxide thin-film transistors for transparent displays,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 26, no. 34, pp. 6170–6178, 2016.
- H. Martines-Arano, B. E. García-Pérez, M. A. Vidales-Hurtado, M. Trejo-Valdez, L. H. Hernández-Gómez, and C. Torres-Torres, “Chaotic signatures exhibited by plasmonic effects in Au nanoparticles with cells,” *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 21, p. 4728, 2019
- H. Martines-Arano, A. Valdivia-Flores, J. Castillo-Cruz, B. E. García-Pérez, and C. Torres-Torres, “Spatially modulated ablation driven by chaotic attractors in human lung epithelial cancer cells,” *Biomed. Phys. Eng. Express*, vol. 10, no. 3, p. 035041, 2024.
- I. Ahmad, I. Ali, R. Jan, S. A. Idris, and M. Mousa, “Solutions of a three-dimensional multi-term fractional anomalous solute transport model for contamination in groundwater,” *PLoS One*, vol. 18, no. 12, p. e0294348, 2023.
- I. Dey, A. G. Sheik, and S. R. Ambati, “Fractional-order models identification and control within a supervisory control framework for efficient nutrients removal in biological wastewater treatment plants,” *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 30, no. 6, pp. 16642–16660, 2022.

Industrias México. (6 de Julio de 2021). Obtenido de https://industriasmexico.com.mx/tula-foco-de-contaminacion-para-el-valle-del-mezquitil/#google_vignette

I. Goncharova, D. Guichaoua, S. Taboukhat, A. Tarbi, T. Chtouki, and B. Sahraoui, "Laser-induced breakdown spectroscopy application for heavy metals detection in water: A review," *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.*, vol. 217, no. 106943, p. 106943, 2024.

INEGI. (2022). Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Obtenido de <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/agua.aspx?tema=me&e=13>

J. Fito, M. Abewaa, A. Mengistu, K. Angassa, A. D. Ambaye, and T. Nkambule, "Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from *Rumex abyssinicus* plant," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, 2023.

K. Sharma et al., "Methylene blue dye adsorption from wastewater using hydroxyapatite/gold nanocomposite: Kinetic and thermodynamics studies," *Nanomaterials (Basel)*, vol. 11, no. 6, p. 1403, 2021.

K. M. Ibrahim, R. K. Jamal, and F. H. Ali, "Chaotic behaviour of the Rossler model and its analysis by using bifurcations of limit cycles and chaotic attractors," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1003, p. 012099, 2018.

"La revista de química útil ISO 17025:2005 Determinación de Cloruro y Oxígeno disuelto Soleris: sistema de microbiología rápida", Consultado: el 15 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: www.col.ops-oms.org/DIAA/2002/INS_guia_vigilancia.htm

Leal Puentes, L. S. (2021). Fotocatálisis de nanopartículas de dióxido de titanio utilizando luz UV para la degradación de azul de metileno en agua.

- M. Del Pilar Rodríguez-Torres, L. Díaz-Torres, and S. Romero-Servin, "Heparin assisted photochemical synthesis of gold nanoparticles and their performance as SERS substrates," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 15, no. 10, pp. 19239–19252, 2014.
- Mejía, J., Catú, P., & Velez, S. (2024). Síntesis de copolímeros sensible al pH alcalino para la detección de metales pesados en cuerpos de agua.
- M. K. Ahmed, M. E. El-Naggar, A. Aldalbahi, M. H. El-Newehy, and A. A. Menazea, "Methylene blue degradation under visible light of metallic nanoparticles scattered into graphene oxide using laser ablation technique in aqueous solutions," *J. Mol. Liq.*, vol. 315, no. 113794, p. 113794, 2020
- M. Hulupi, K. Keryanti, K. A. Rahmawati, W. T. Dewi, and F. Abdilah, "Validation of Methylene Blue analysis method in wastewater samples by UV-Vis spectrophotometry," *Equilibrium*, vol. 7, no. 2, p. 101, 2023
- M. Oz, D. E. Lorke, M. Hasan, and G. A. Petroianu, "Cellular and molecular actions of Methylene Blue in the nervous system," *Med. Res. Rev.*, vol. 31, no. 1, pp. 93–117, 2011
- M. S. Irshad, N. Arshad, and X. Wang, "Nanoenabled photothermal materials for clean water production," *Global Chall.*, vol. 5, no. 1, 2021.
- N. Abril Díaz et al., "8. Espectrometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas".
- N. Nedyalkov et al., "Laser-induced nanoparticle fabrication on paper," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 123, no. 9, 2017.
- Neta, R. L. (Marzo de 5 de 2021). Consolidar Proyectos Para El Saneamiento De Cuerpos De Agua En Tepeji, Una Prioridad Para Salvador Jiménez. La Neta.

- N. P. Castro-González, F. Calderón-Sánchez, R. Moreno-Rojas, J. V. Tamariz-Flores, y E. Reyes-Cervantes, "Heavy metals pollution level in wastewater and soils in the alto balsas sub-basin in tlaxcala and puebla, Mexico", *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 35, núm. 2, pp. 335–348, 2019, doi: 10.20937/RICA.2019.35.02.06.
- O. Castro-e-Silva, L. A. C. D'Albuquerque, M. R. G. Silveira, P. Zorzi, J. B. Liu, and P. R. B. Évora, "Evaluation of the therapeutic effect of methylene blue on the liver of rats submitted to ischemia and reperfusion," *Acta Cir. Bras.*, vol. 33, no. 12, pp. 1043–1051, 2018.
- Orozco, B. S. (2018). *Fundamentos de la Espectroscopía Raman Heterodina*. Centro de Investigaciones en óptica, AC.
- Pérez, Y. A., Cortés, D. A. G., & Haza, U. J. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), 2279-2279.
- Pullés., M. R. (2014). *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181230079005.pdf>
- P. O. Oladoye, T. O. Ajiboye, E. O. Omotola, and O. J. Oyewola, "Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater," *Results Eng.*, vol. 16, no. 100678, p. 100678, 2022.
- Ramírez, R. D. (2018). CICESE. Obtenido de https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2075/1/Implementaci%C3%B3n%20de%20osciladores%20ca%C3%B3ticos%20en%20sistemas%20embebidos%20y%20aplicaciones_Rodrigo%20Mendez.pdf

- Rivera, M. A. O., Barahona, W. E. C., Costales, J. H. N., Lalvay, X. A. L., & Guachichullca, E. J. R. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 6(3), 228-245.
- S. Heemskerk, F. M. P. van Haren, N. A. Foudraine, W. H. M. Peters, J. G. van der Hoeven, and P. Pickkers, "Short-term beneficial effects of methylene blue on kidney damage in septic shock patients," *Intensive Care Med.*, vol. 34, no. 2, pp. 350–354, 2008
- S. A. Kidd, P. A. L. Lancaster, J. C. Anderson, A. Boogert, C. C. Fisher, and D. M. Wass, "Fetal death after exposure to methylene blue dye during mid-trimester amniocentesis in twin pregnancy," *Prenat. Diagn.*, vol. 16, no. 1, pp. 39–47, 1996.
- S. Li, Y. Cui, M. Wen, and G. Ji, "Toxic effects of methylene blue on the growth, reproduction and physiology of *Daphnia magna*," *Toxics*, vol. 11, no. 7, p. 594, 2023.
- S. Ma, F. Cao, X. Wen, F. Xu, H. Tian, and D. Dong, "Detection of heavy metal ions using laser-induced breakdown spectroscopy combined with filter paper modified with PtAg bimetallic nanoparticles," *J. Hazard. Mater.*, vol. 443, no. 130188, p. 130188, 2023.
- S. G. T. / I. G. d. C. d. Agua, «CONAGUA,» 2018. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/925171/Diagn_stico_Presas_Taxhimay-Endho_Hgo_2012-2018.pdf
- SILVA-JUÁREZ. (30 de Junio de 2020). Obtenido de Revista de Energía Química y Física: https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol7num22/Revista_de_Energia_Quimica_y_Fisica_V7_N22_3.pdf

T. Carmen, R. Flores Morales, O. Primavera, H. Huaman, J. Hugo, y P. Capcha, “Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental”, 2022.

Torres, D. N. (2004). Obtenido de <https://imarrero.webs.ull.es/sctm04/modulo2/8/ntorres.pdf>

Torres, D. N. (s.f.). CAOS EN SISTEMAS BIOLÓGICOS. Obtenido de <https://imarrero.webs.ull.es/sctm04/modulo2/8/ntorres.pdf>

turbidez, F. i. (s.f.). Obtenido de https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3150sp.pdf

X. Cui, Q. Ruan, X. Zhuo, X. Xia, J. Hu, and H. Xu, “Photothermal nanomaterials: A powerful light-to-heat converter,” *Chem. Rev.*, vol. 123, no. 11, pp. 6891–6952, 2023.

X. Dong, Y.-L. Bai, Y. Lu, and M. Fan, “An improved sparse identification of nonlinear dynamics with Akaike information criterion and group sparsity,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 111, no. 2, pp. 1485–1510, 2023.

Y.-J. Huang, C.-W. Chang, and C.-H. Hsieh, “Detecting shifts in nonlinear dynamics using Empirical Dynamic Modeling with Nested-Library Analysis,” *PLoS Comput. Biol.*, vol. 20, no. 1, p. e1011759, 2024.

Y. Guo et al., “Development and application of a new sensitivity analysis model for the remote sensing retrieval of heavy metals in water,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12033, 2022

Y. Shen, Y. Li, W. Li, H. Gao, and C. Wu, "A novel underwater weak target detection method based on 3D chaotic system and maximal overlap discrete wavelet transform," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 139, no. 4, 2024

COLLORI, M. A. G., VERA, O. J. S., PERICHE, J. T. R., GONZÁLES, J. D. R. G., & GARCIA, A. C. V. (2022). Sistema de osmosis inversa en remoción de arsénico de agua subterránea en Pacora. *UCV Hacer*, 11(4), 11-17.

Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta ecológica*, (64), 9-18.

Apéndice 1. Normatividad Mexicana para la determinación de la calidad del agua

Existen normativas que establecen criterios que repercuten a la contaminación de aguas, llevando a que se busque una manera de analizar que tipos de contaminantes se encuentren en el agua.

1. Normatividad Mexicana de la calidad de aguas residuales

En base al Diario Oficial de la Federación (DOF) la SEMARNAT comprende normas que tiene como objetivo la protección del medio ambiente y su conservación, estas se encargan de que se lleve un control, así también establece criterios para el control de los residuos; así mismo, genera sistemas para que haya un monitoreo de los contaminantes para que se pueda llevar a cabo alternativas o mecanismos para prevenir y se pueda corregir la contaminación que existe en el agua, suelo y aire. Existen normas sobre establecen los indicadores contaminantes de las aguas.

Tabla 3

Principales normas mexicanas normas actuales que establecen los indicadores contaminantes de las aguas residuales

Norma	Descripción
NMX-AA-034-SCFI-2015	Análisis de agua, medición de sólidos y sales disueltas en agua naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba.
NMX-AA-072-SCFI-2001	Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba

NMX-AA-008-SCFI-2016	Análisis de agua. - medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba
NMX-AA-007-SCFI-2013	Análisis de agua - medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba
NMX-AA-038-SCFI-2001	Determinación de turbiedad en análisis de agua - aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba
NMX-AA-093-SCFI-2018	Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba
NMX-AA-017-SCFI-2021	Análisis de agua – medición de color verdadero en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas - mediante coeficientes de absorción espectral - método de prueba
NMX-AA-004-SCFI-2013	Análisis de agua – medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-051-SCFI-2016	Análisis de agua - medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-034-SCFI-2015	Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-005-SCFI-2013	Análisis de agua – medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-026-SCFI-2010	Análisis de agua - medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas

NMX-AA-017-SCFI-2021	Análisis de agua – medición de color verdadero en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas - mediante coeficientes de absorción espectral - método de prueba
NMX-AA-029-SCFI-2001	Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba
NMX-AA-039-SCFI-2001	Análisis de aguas - determinación de sustancias activas al azul de metileno (saam) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-074-SCFI-2014	Análisis de agua – medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-099-SCFI-2021	Análisis de agua – medición de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas
NMX-AA-042-SCFI-2015	Análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli – método del número más probable en tubos múltiples
NMX-AA-007-SCFI-2013	Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas
NMX-AA-008-SCFI-2016	Análisis de agua. - medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba
NMX-AA-012-SCFI-2001	Análisis de agua - determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba

NMX-AA-006-SCFI-2010	Análisis de agua - determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas
NMX-AA-14-1980	Cuerpos receptores. - muestreo
NMX-AA-003-1980	Aguas residuales. - muestreo

Anexo 1.

Publicación de un artículo a partir de esta tesis.

  Journals ▾ Books Publishing Support  Login ▾

Measurement Science and Technology 

ACCEPTED MANUSCRIPT

Chaos-Driven Detection of Methylene Blue in Wastewater Using Fractional Calculus and Laser Systems

Lizeth Martínez-Ayala¹, Jhovani Bornacelli¹, Manuel Alejandro Ojeda Misses² ,
Jose Alberto Arano-Martinez³ , Carlos Torres-Torres⁴  and Hilario Martines-Arano¹ 

Accepted Manuscript online 30 September 2024 • © 2024 IOP Publishing Ltd. All rights, including for text and data mining, AI training, and similar technologies, are reserved.

[What is an Accepted Manuscript?](#)

DOI 10.1088/1361-6501/ad817d

 Accepted Manuscript PDF

Anexo 2.

Participación en modalidad poster en la UAEH, Jóvenes Investigadores Inteligencia Artificial



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
División de Investigación Desarrollo e Innovación

Otorga la presente

CONSTANCIA

a

Almanza Villegas Norma Jacqueline

Por su destacada participación en el Cuarto Encuentro Garza de Jóvenes Investigadores "Inteligencia Artificial" con su ponencia titulada "Detección de azul de metileno presente en aguas residuales asistida por monitoreo caótico". Llevado a cabo los días 12 y 13 de noviembre de 2024.

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Pachuca, Hidalgo; 13 de noviembre de 2024.

Jessica Mendoza Moheno
Dra. Jessica Mendoza Moheno
Coordinadora de la División de Investigación
Desarrollo e Innovación

Dr. Mario Cruz Cruz
Dr. Mario Cruz Cruz
Director de Investigación