



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería

**“Efecto de la radiación UV en la remoción del remazol amarillo
por medio de una reacción solar Fenton heterogénea”**

TESIS DE LICENCIATURA
INGENIERO EN SISTEMAS ENERGÉTICOS SUSTENTABLES

PRESENTA

Andrea Mariana Pichardo López

ASESOR

Dra. Carolina Álvarez Bastida

COASESOR

Dra. Verónica Martínez Miranda

Toluca, México 13 de octubre del 2023

RESUMEN

Un reto importante para las futuras investigaciones sobre tratamiento de agua residual es desarrollar tecnologías sustentables.

En el presente trabajo de investigación, se dan a conocer los resultados de la implementación de un proceso de oxidación avanzada Fenton asistido con un concentrador solar parabólico compuesto.

El objetivo es remover un tinte azoico utilizado principalmente para teñido textil el cual es el Amarillo Remazol (AR).

Se realizaron 16 experimentos mediante el diseño Box-Behnken, con los datos obtenidos se calcularon las eficiencias de remoción de color, colorante y DQO mediante el software STATGRAPHICS®; encontrando que, en condiciones óptimas $219.15 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, 20 min de tiempo de tratamiento, relación masa-volumen m/V de 0.1 y asistiendo el proceso con radiación solar, el colorante AR se remueve hasta en un 90%. También se ha obtenido la energía acumulada por el sistema, presentando un valor máximo de 293.41 kJ/L .

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), bajo la asesoría de la Dra. Carolina Álvarez Bastida, la Dra. Verónica Martínez Miranda, la Dra. Ivonne Linares Hernández y el Dr. Luis Antonio Castillo Suárez.

Agradezco profundamente a las autoridades de esta institución por las facilidades que me otorgaron para la realización de este proyecto, a la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Autónoma del Estado de México, que, a través de la Secretaría de Investigación de Estudios Avanzados, brindaron el financiamiento (6738/2022CIB).

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	11
2.1 El Sol.....	11
2.1.1 Infrarrojo.....	12
2.1.2 Luz visible	13
2.1.3 Luz ultravioleta.....	15
2.1.4 Rayos X.....	16
2.1.5 Rayos gamma γ	17
2.2 Energía solar	18
2.2.1 Tipos de energía solar	18
2.2.2 Proceso de producción de la energía solar.....	19
2.2.3 Aplicaciones	19
2.3 Radiación solar	20
2.3.1 Tipos de radiación solar sobre la superficie terrestre.....	21
2.3.2 Seguimiento solar.....	22
2.4 Concentradores solares.....	23
2.4.1 Definición	23
2.4.2 Clasificación	23
2.4.3 Concentrador solar cilindro parabólico.....	24
2.5 Tratamiento de aguas residuales con energía solar	25
2.5.1 Fotólisis	27
2.5.2 Fotocatálisis Heterogénea Solar.....	27
2.5.3 Fenton	28
2.5.4 Solar Fenton.....	28
2.6 Colorantes.....	29
2.6.1 Colorantes azo.....	29
2.6.2 Amarillo remazol.....	30
2.7 Impacto a los ecosistemas y a la salud.....	31
2.7.1 Salud	31
2.7.2 Ecosistemas.....	31
2.8 Legislación de descarga de colorantes.....	32

2.8.1 Internacional.....	32
2.8.2 Nacional.....	33
2.9 Estado del arte.....	36
CAPÍTULO 3 JUSTIFICACIÓN, HIPOTÉISIS Y OBJETIVOS	39
3.1 Justificación.....	39
3.2 Hipótesis.....	40
3.3 Objetivo general.....	40
3.3.1 Objetivos específicos.....	40
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....	41
4.1 Revisión de bibliográfica.....	41
4.2 Lecturas de radiación UV.....	41
4.3 Diseño y optimización.....	42
4.4 Monitoreo de temperatura.....	42
4.5 Análisis de resultados.....	43
4.6 Reactivos y equipo.....	44
4.7 Metodología analítica general.....	44
4.7.1 Preparación de las disoluciones madre y de H ₂ O ₂	45
4.7.2 Curva de calibración.....	45
4.7.3 Diseño y matriz experimental.....	48
4.7.4 Concentrador solar.....	50
4.7.5 Análisis de las muestras.....	51
4.7.6 Técnicas e instrumentos de análisis.....	52
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	53
5.1 Caracterización del colorante.....	53
5.2 Tratamiento Solar-Fenton.....	53
5.2.1 Efecto de la radiación UVA y radiación solar.....	54
5.3 Efectos de los factores.....	57
5.3.1 Efecto del H ₂ O ₂ y TRH.....	57
5.3.2 Efecto del THR y relación m/V	59
5.3.3 Efecto del H ₂ O ₂ y relación m/V	61
5.3.4 Pruebas de máximo ascenso.....	63
5.3.5 Cinética de la reacción.....	64
5.3.6 Efecto de la concentración inicial.....	67

5.3.7 Fotólisis	68
5.3.8 Efecto del H ₂ O ₂	69
5.3.9 Efecto del catalizador.....	69
5.3.10 Sin radiación UV.....	70
6 CONCLUSIONES	73
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA	74
CAPÍTULO 8 ANEXOS	79
8.1 Radiación UV- A	79
8.2 Cálculo de irradiación.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectro electromagnético (Buitrago, 2005).	11
Figura 2 Espectro visible de la luz. Elaboración propia.....	14
Figura 3 Clasificación de la radiación UV. Elaboración propia.....	15
Figura 4 Clasificación de la energía solar. Elaboración propia.	19
Figura 5 Ángulos de posicionamiento respecto al Sol (Lamaison, 2016).....	22

Figura 6 Estructura molecular Amarillo Remazol. (ChemicalLook, 2008).	30
Figura 7 Metodología general. Elaboración propia.....	41
Figura 8 Metodología analítica general. Elaboración propia.	45
Figura 9 Curva de calibración	47
Figura 10 Espectro UV- Vis del AR.....	48
Figura 11 Concentrador solar parabólico con seguimiento manual.	50
Figura 12 Metodología analítica para muestras.	51
Figura 13 Energía acumulada de los 16 experimentos realizados.....	55
Figura 14 Efecto del H ₂ O ₂ y TRH.....	58
Figura 15 Efecto del THR y relación m/V	60
Figura 16 Efecto del H ₂ O ₂ y relación m/V.....	62
Figura 17 Cinética de la reacción. a) Color b) Colorante c) DQO y d) Turbidez. ..	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Longitudes de onda del espectro electromagnético (Sáenz, 2019).....	12
Tabla 2 Longitud de onda de la luz visible (Núñez, 2014).....	14
Tabla 3 Clasificación de PAO. (Carbajo, 2013).....	26
Tabla 4 Parámetros internacionales permisibles de descarga de agua (Truong, 2015) (Gazette, 1988) (CONAMA, 2011).	33
Tabla 5: Concentraciones máximas permisibles a nivel Nacional, Baja California Sur (BCS) y Querétaro (Ayuntamiento B.C.S, 2013).	34
Tabla 6 Parámetros de color y toxicidad (SEMANART, 2022).....	35
Tabla 7 Temperatura registrada para el diseño experimental Box-Behnken	43
Tabla 8 Concentraciones de la curva de calibración.....	46
Tabla 9 Absorbancias a 270 nm.	47
Tabla 10 Matriz experimental.....	49
Tabla 11 Medidas del concentrador solar parabólico.....	51
Tabla 12 Técnicas e instrumentos de análisis.....	52
Tabla 13 Caracterización del AR.....	53
Tabla 14 Resultados de los experimentos del Diseño Box- Behnken.....	53
Tabla 15 Valores de Irradiación extraterrestre.	56
Tabla 16 Condiciones óptimas de remoción de color.....	63
Tabla 17 Condiciones óptimas de remoción de colorante.....	63
Tabla 18 Condiciones óptimas de remoción de DQO.	64
Tabla 19 Condiciones óptimas para turbidez.	64
Tabla 20 Cinética de la reacción	65
Tabla 21 Constantes cinéticas.	67
Tabla 22 Efecto de la concentración.....	68
Tabla 23 Fotólisis del colorante.....	68
Tabla 24 Peróxido de Hidrógeno.....	69
Tabla 25 Catalizador	69
Tabla 26 Sin radiación UV	70

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

La falta de un tratamiento adecuado para las aguas residuales de diversas industrias, principalmente textil, papelera y alimenticia es un problema ambiental y de salud grave, ya que la mayoría de los colorantes utilizados son tóxicos y no biodegradables (Farhan Hanafi y Sapawe, 2020).

Esto tiene como consecuencia que sean desechados en canales y ríos, permaneciendo por largos periodos en los ecosistemas. Por este motivo, se requiere buscar soluciones innovadoras que permitan procesos más eficientes, económicos, fáciles de aplicar y sustentables (Farhan Hanafi y Sapawe, 2020).

La mayoría de los colorantes ingresan a los ecosistemas a través del agua y la cadena alimenticia, causando irritación de la piel, enfermedades respiratorias e incluso el desarrollo de cáncer (Castañeda, 2009).

El amarillo remazol (AR), remazol rojo y remazol azul son diferentes tipos de colorantes azo, altamente persistentes en el agua y en el medio ambiente. Se utilizan para colorear textiles, fibras e hilos (Farhan Hanafi y Sapawe, 2020).

La mitad de todos los colorantes y pigmentos empleados en las industrias son del tipo "azo". Constituyen la clase química más importante de colorantes sintéticos. Los efectos reportados por el uso de estos colorantes son: teratogenicidad en embriones de rana, degradación enzimática, metabolitos tóxicos y carcinogenicidad (Pérez y Buitrón, 2010).

Los métodos convencionales, como los biológicos y fisicoquímicos, tienen bajas eficiencias en la remoción de los colorantes azo, entre el 60% y 70% mientras que los tratamientos de oxidación avanzada presentan eficiencias de remoción entre 85-98%, mostrando así ser una mejor opción para la remoción de colorantes azoicos

(Vences-Benitez, 2017) (Bakaraki Turan, Sari Erkan y Onkal Engin, 2021) (Boran, Birhanli y Özbey, 2019) (Couto, Marques y Balmant, 2018) (A. Othmani y A. Kesraoui, 2017).

El método solar Fenton Heterogéneo permite tratar contaminantes no biodegradables, como los colorantes azo, mediante la aplicación de luz UV (ultravioleta). Esto acelera el proceso de remoción, lo hace altamente eficiente, disminuye el uso de productos químicos y mejora la calidad del agua que se descarga.

Proponer estrategias que permitan una remoción eficiente, a bajo costo y amigables con el medio ambiente es un tema prioritario. Por tanto, el objetivo de este proyecto es desarrollar un proceso sustentable con el ambiente mediante la aplicación de la radiación UV en la remoción de AR a través de una reacción solar Fenton heterogénea.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2.1 El Sol

El Sol es considerado la fuente primaria de la energía presente en la Tierra, ya que la luz solar da vida a todos los organismos que la habita. Es una esfera de gases con temperatura extremadamente alta que emana energía constantemente al exterior. Su masa representa el 99.86% del total del sistema solar (Bachiller, 2009).

La energía del Sol proviene de reacciones termonucleares que ocurren en su centro, donde la temperatura varía entre 15 y 25 millones de °C. Una gran parte de la energía generada por el Sol es luz visible, es decir, aquella luz que puede percibir el ojo humano y que hace posible la visión (Bachiller, 2009).

La Figura 1 muestra el espectro electromagnético del Sol, desde la radiación menos energética compuesta por las ondas de radio, ondas de microondas, infrarrojo y la luz visible, hasta la más energética que incluye la radiación UV, los rayos X y los rayos gamma (Buitrago, 2005).

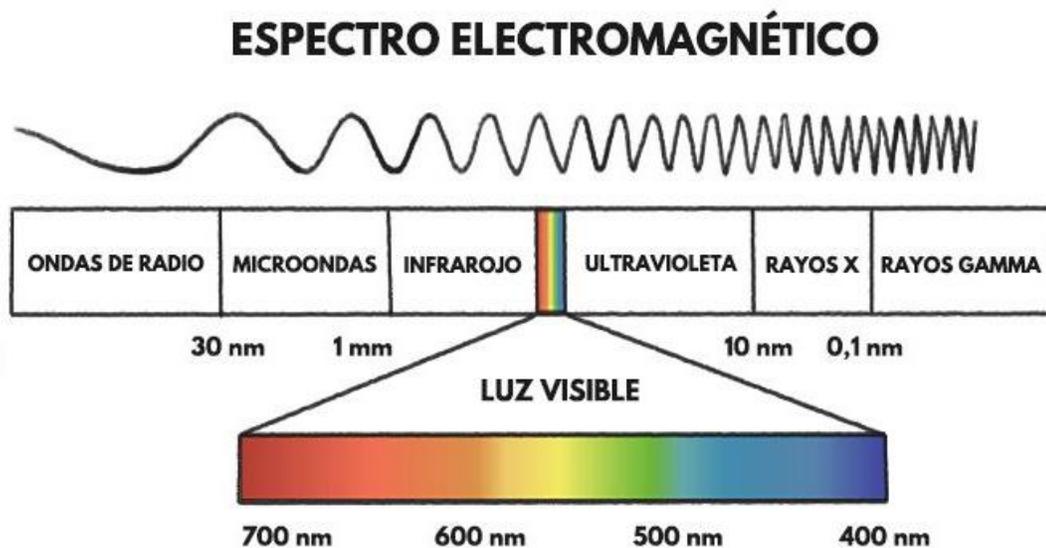


Figura 1 Espectro electromagnético (Buitrago, 2005).

La Tabla 1 describe las longitudes de onda de algunas de las regiones que componen al espectro electromagnético (Sáenz, 2019).

Tabla 1 Longitudes de onda del espectro electromagnético (Sáenz, 2019).

Región	Frecuencia	Longitud de onda	Energía del fotón
	<i>Hz</i>	<i>m</i>	<i>eV</i>
Rayos γ	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	10^{10}
Rayos X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	10^5
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	10^3
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	10^{-3}

2.1.1 Infrarrojo

Los rayos infrarrojos o la radiación infrarroja (IR) fueron descubiertos por William Herschel en el año 1800 (Núñez, 2014) y tienen una longitud de onda menor que la de las microondas, pero mayor que la de la luz visible. Su nombre significa "por debajo del rojo", pues el color rojo visible es el que posee una mayor longitud de onda (Fontal, 2015).

La espectroscopía infrarroja se basa en las vibraciones de los átomos que componen una molécula, es decir, en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia irradiada (Sáenz, 2019). Cuando está posea una temperatura mayor al cero absoluto (-273.15 K) será capaz de emitir rayos infrarrojos, los cuales aumentarán conforme se incremente la temperatura (Núñez, 2014).

La zona de radiación infrarroja no se puede ver, pero sí se puede detectar (Núñez, 2014) y se encuentra dentro del intervalo de longitudes de onda entre 700 nm y 1 mm.

Se puede clasificar en:

- a) Cercano (IRC, 780 - 3000 nm)
- b) Medio (IRM, 3000 - 6000 nm)
- c) Lejano (IRL, 6000 nm - 1 mm) (Sáenz, 2019)

Algunas aplicaciones de la radiación infrarroja incluyen:

- a) Astronomía
- b) Equipos de visión nocturna
- c) Cámaras termográficas
- d) Mando a distancia
- e) Medicina
- f) Terapia infrarroja (Sáenz, 2019)

2.1.2 Luz visible

Isaac Newton a través del uso de un prisma, logró ser el primero en descomponer la luz blanca del Sol en sus diferentes elementos. La luz visible está compuesta por la mezcla de ondas que poseen energías similares y ninguna predomina sobre las demás (Figura 2) (Núñez, 2014).

La radiación visible se encuentra en el rango de frecuencia de 384×10^{12} a 769×10^{12} Hz, donde las frecuencias más bajas y las longitudes de onda más largas corresponden al color rojo, y las frecuencias más altas y las longitudes de onda más cortas corresponden al color violeta siendo estos colores los que conforman los extremos del espectro electromagnético (Núñez, 2014).

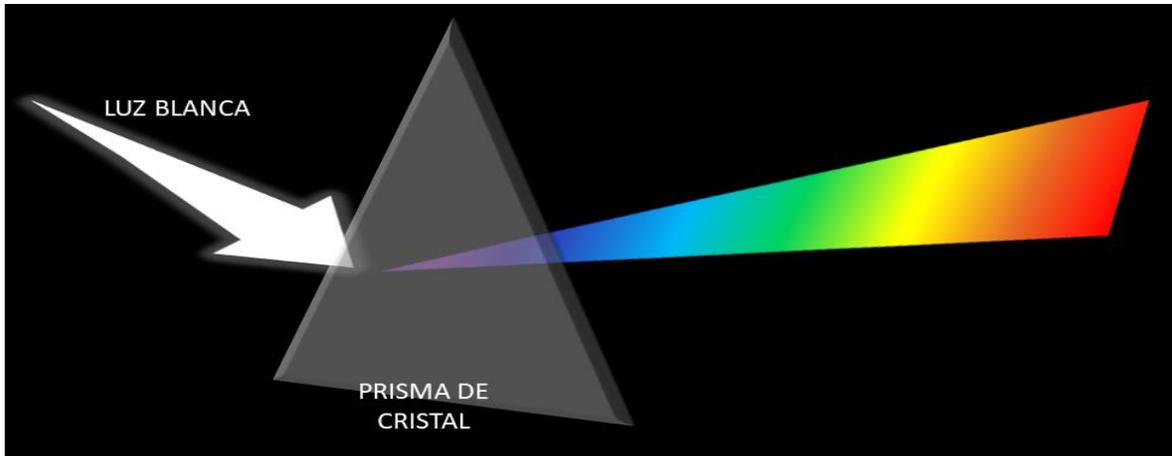


Figura 2 Espectro visible de la luz. Elaboración propia.

La luz visible es un pequeño segmento del espectro electromagnético dentro del intervalo de longitud de onda de 280 – 760 nm, en el que cualquier energía producida dentro de él generará la sensación de visión cuando el ojo humano sea estimulado y así generar una sensación de color distinto donde no hay un límite preciso entre los colores, sino una transición gradual entre cada uno de ellos (Fontal, 2015).

La Tabla 2 muestra los intervalos de longitud de onda correspondientes a los diferentes colores que componen la luz visible (Núñez, 2014).

Tabla 2 Longitud de onda de la luz visible (Núñez, 2014).

Color	Longitud de onda (nm)
Rojo 	630 – 760
Naranja 	590 – 630
Amarillo 	560 – 590
Verde 	490 – 560
Azul 	440 – 490
Índigo 	420 – 440
Violeta 	280 – 420

2.1.3 Luz ultravioleta

La luz ultravioleta (UV) es un tipo de radiación electromagnética descubierta por Johann Wilhelm Ritter en 1801. No es perceptible para el ojo humano y se utiliza en diversas aplicaciones, como:

- a) Tratamientos médicos y estéticos
- b) Cultivo de plantas
- c) Esterilización de alimentos
- d) Potabilización de agua (Océane Bidault, 2018)

La luz UV se divide en tres tipos según su longitud de onda y energía, como se muestra en la Figura 3:

- a) Luz UV- A: Onda más larga dentro del espectro ultravioleta, con una longitud de onda de 400 a 315 nm , y una energía por fotón de 3.10 – 3.94 eV
- b) Luz UV- B: Onda de naturaleza media, con una longitud de onda de 315 a 280 nm , y una energía por fotón de 3.94 – 4.43 eV
- c) Luz UV- C: Onda corta, con una longitud de onda aproximada de 280 a 100 nm y una energía por fotón de 4.43 – 12.40 eV (Océane Bidault, 2018)



Figura 3 Clasificación de la radiación UV. Elaboración propia.

El Sol emite radiación ultravioleta (UV-A, UV-B y UV-C), pero debido a la absorción en la capa de ozono de la atmósfera, aproximadamente el 99% de la radiación que llega a la superficie terrestre es UV-A (Fontal, 2015).

2.1.4 Rayos X

En 1895, el físico Wilhelm Roentgen descubrió los rayos X al observar que una radiación invisible atravesaba los tejidos para dibujar los huesos de un ser vivo en una placa (Fontal, 2015). Los rayos X tienen una frecuencia que va desde 2.4×10^{16} a $5 \times 10^{19} \text{ Hz}$ y una longitud de onda pequeña, aproximadamente de 10 nm a 100 pm (Núñez, 2014).

Los rayos X se generan por la desaceleración rápida de partículas cargadas a gran velocidad, lo que los convierte en radiación ionizante y potencialmente peligrosa (Fontal, 2015).

Los rayos X se dividen en:

- a. Suaves: Longitud de onda mayor que 0.1 nm
- b. Duros: Longitud de onda menor que 0.1 nm

Aplicaciones:

- a. Medicina:

Los Rayos X se utilizan para obtener imágenes anatómicas del cuerpo y ayudar en el diagnóstico médico. Algunos equipos que usan Rayos X son:

1. Equipo de rayos X convencional
2. Tomografía axial computarizada (TAC) (Martínez, 2018)

- b. Cristalografía de rayos X

Se utiliza la difracción de rayos X a través de cristales para determinar su estructura cristalina y la disposición de los átomos, iones o moléculas que lo conforman (Martínez, 2018).

2.1.5 Rayos gamma γ

Los rayos gamma γ son radiaciones electromagnéticas generadas por la desintegración de núcleos atómicos. Tienen una frecuencia extremadamente alta, por encima de 10^{20} Hz y una longitud de onda inferior a $3 \times 10^{-13} \text{ m}$ (Alfaro, Berlmont y González, 2009).

Son considerados altamente peligrosos para los seres humanos, ya que poseen una energía muy alta que puede dañar las moléculas celulares sin posibilidad de reparación, lo que puede resultar en mutaciones o incluso la muerte (Planas, 2019).

La desintegración de los radios nucleídos y las interacciones de los rayos cósmicos, los cuales son partículas cargadas energéticas que chocan con la atmósfera terrestres y vienen desde el Universo, forman parte de las fuentes naturales que la Tierra posee donde se pueden observar los rayos gamma (Alfaro, Berlmont y González, 2009).

Los rayos γ provenientes del espacio se generan mediante los procesos de interacción de los gases interestelares con los rayos cósmicos y cuando las supernovas explotan.

Es importante mencionar que los rayos X son producidos por procesos electrónicos energéticos, mientras que los rayos γ por las transiciones producidas en los núcleos atómicos (Fontal, 2015).

Aplicaciones:

- a. Medicina: Tratamiento contra el cáncer y tomografías.
- b. Industria: Esterilización de alimentos y equipos (Alfaro, Belmont y González, 2009).

2.2 Energía solar

La energía solar es una energía renovable, gratuita y disponible que se obtiene mediante la radiación electromagnética del Sol (Nandwani, 2005).

Es una energía renovable porque tiene origen en una fuente natural e inagotable, además provee de la energía necesaria para producir alimentos mediante el proceso de fotosíntesis e induce el movimiento del viento y del agua. Por lo tanto, la energía solar es el origen de la mayoría de las fuentes de energías renovables, como la eólica, hidroeléctrica, biomasa y maremotriz (Bachiller, 2009).

La energía que emite el Sol no llega a la Tierra de modo uniforme, ya que varía según la hora del día, la inclinación estacional del globo terráqueo respecto al Sol, las distintas zonas de la superficie terrestre, los movimientos de la tierra y la absorción de la radiación solar por parte de la atmósfera (Mózo, 2017).

2.2.1 Tipos de energía solar

La energía solar se puede clasificar según su fuente de origen y el tipo de proceso, como se muestra en la Figura 4.

a) Energía solar térmica

Es la energía en la que se genera calor a través de la radiación solar, el cual se utiliza como fuente de energía en el sector doméstico e industrial. Se requiere llevar a cabo un proceso de transformación para convertir el calor en energía mecánica y posteriormente, generar electricidad (Buitrago, 2005).

La energía solar térmica se transporta en forma de calor utilizando captadores sencillos que se pueden fabricar fácilmente, ya que los materiales son accesibles (Nandwani, 2005).

b) Energía solar fotovoltaica

Es la energía que se obtiene directamente en forma de electricidad a partir de la radiación solar. Este proceso se logra mediante la instalación de paneles solares

fotovoltaicos compuestos por celdas de silicio que transforman la luz en electricidad (Buitrago, 2005).

Para producir energía eléctrica de esta manera, se requiere una inversión inicial alta y la producción tiene una elevada complejidad, por esta razón pocos países en el mundo fabrican módulos solares (Nandwani, 2005).

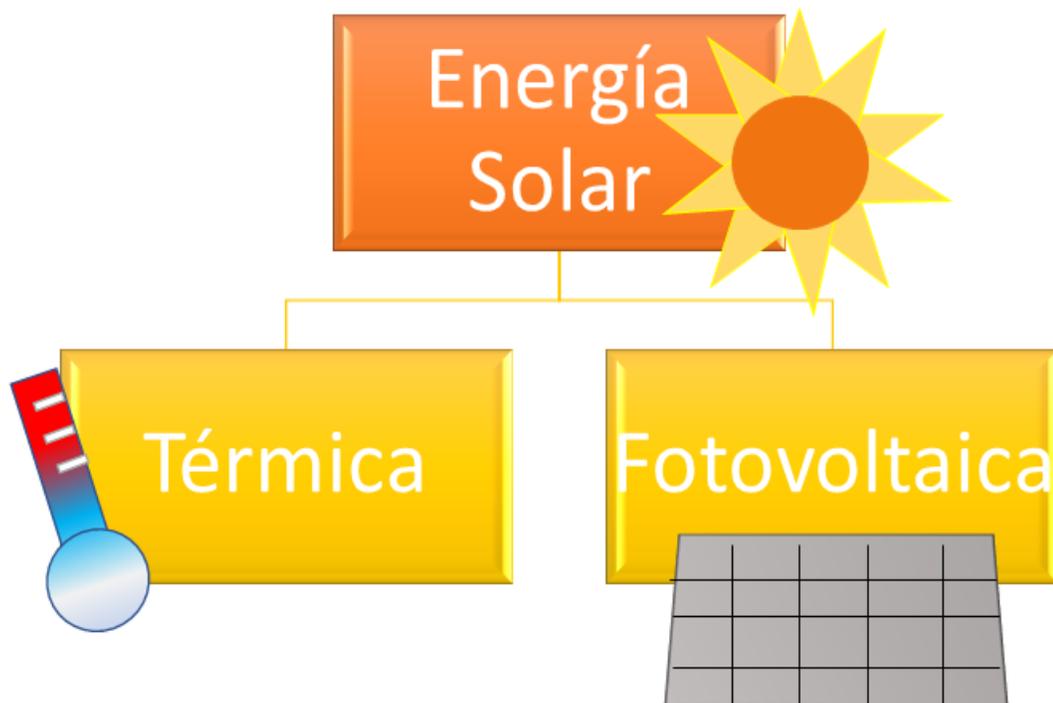


Figura 4 Clasificación de la energía solar. Elaboración propia.

2.2.2 Proceso de producción de la energía solar

La energía solar se puede captar mediante celdas fotovoltaicas o colectores solares los cuales la transforman en energía eléctrica o energía térmica, respectivamente, utilizando la luz del sol (García, 2021).

2.2.3 Aplicaciones

a) Sector doméstico

En el sector doméstico, se utilizan colectores solares que se instalan en el tejado de las construcciones o en áreas soleadas.

Estos colectores solares tienen la función de capturar la radiación solar y transformarla en calor. El calor generado se utiliza para la calefacción a través de un circuito de tubos metálicos, proporcionando suficiente energía para calentar el agua o el espacio (García, 2021).

b) Sector industrial

El sector industrial requiere la producción de energía solar a gran escala. Esto se logra mediante la implementación de centrales solares térmicas, que constan de colectores solares de alta temperatura. Estos colectores pueden operar a temperaturas superiores a los 500 °C (García, 2021).

Una central solar tiene como función principal transformar la energía térmica en energía eléctrica para abastecer a la red eléctrica tradicional. Las tecnologías actuales permiten almacenar el calor de forma más económica y transformarlo en electricidad según sea el caso (García, 2021).

2.3 Radiación solar

La radiación solar es el flujo de energía que la Tierra recibe del Sol en forma de ondas electromagnéticas. También puede ser definida como el resultado de reacciones de fusión que ocurren en el interior del Sol (Lamaison, 2016).

La ley de Stefan-Boltzman, representada por la Ecuación 1, establece que una parte de la cantidad de energía emitida es en forma de radiación electromagnética y que esta cantidad es función de la temperatura de la superficie solar (Clocchiatti y Catelan, 2018).

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

E : Flujo irradiado [W/m^2]

ε : Factor de emisividad

σ : Constante de Stefan-Boltzman = 5.67×10^{-8} [$W/m^2 K^4$]

T : Temperatura de la superficie [K]

2.3.1 Tipos de radiación solar sobre la superficie terrestre

A continuación, se enlistan los diversos tipos de radiación solar que se pueden estudiar:

- a. Directa: Radiación que proviene directamente del Sol sin obstáculos.
- b. Difusa: Rayos dispersos por la atmósfera, puede haber obstáculos como nubes.
- c. Reflejada o Albedo: Radiación reflejada por la superficie terrestre hacia el receptor. Depende de montañas, lagos o edificios.
- d. Global: Suma de todas las radiaciones (Lamaison, 2016).

La constante solar es necesaria para determinar la magnitud exacta de la potencia de la radiación solar.

Esta constante representa la cantidad total de energía que atraviesa en un minuto una superficie perpendicular a los rayos incidentes con área de 1 cm^2 , ubicada a la distancia media entre la Tierra y el Sol (AEMet, 2014).

El valor aproximado de la constante solar es de $1,361 \text{ W/m}^2$ (Clocchiatti y Catelan, 2018) (Lamaison, 2016) (AEMet, 2014).

Para realizar mediciones precisas de la radiación solar, es importante considerar que el ángulo de incidencia está relacionado con la posición del Sol en relación a la superficie de incidencia.

En la Figura 5 se muestran los ángulos principales utilizados en el análisis de geometría solar (Lamaison, 2016):

a) Acimut γ : Desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación en el plano horizontal.

Puede tomar valores entre $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ con dirección al oeste y $-180^\circ \leq \gamma \leq 0^\circ$ con dirección al este.

b) Pendiente β : Ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal.

c) Declinación δ : Posición angular del Sol al mediodía solar.

A lo largo del año toma valores entre -23.45° y 23.45° .

d) Latitud φ : Ubicación angular dada por las líneas paralelas.

Los valores que puede tomar son: Al norte $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ y al sur $-90^\circ \leq \varphi \leq 0^\circ$.

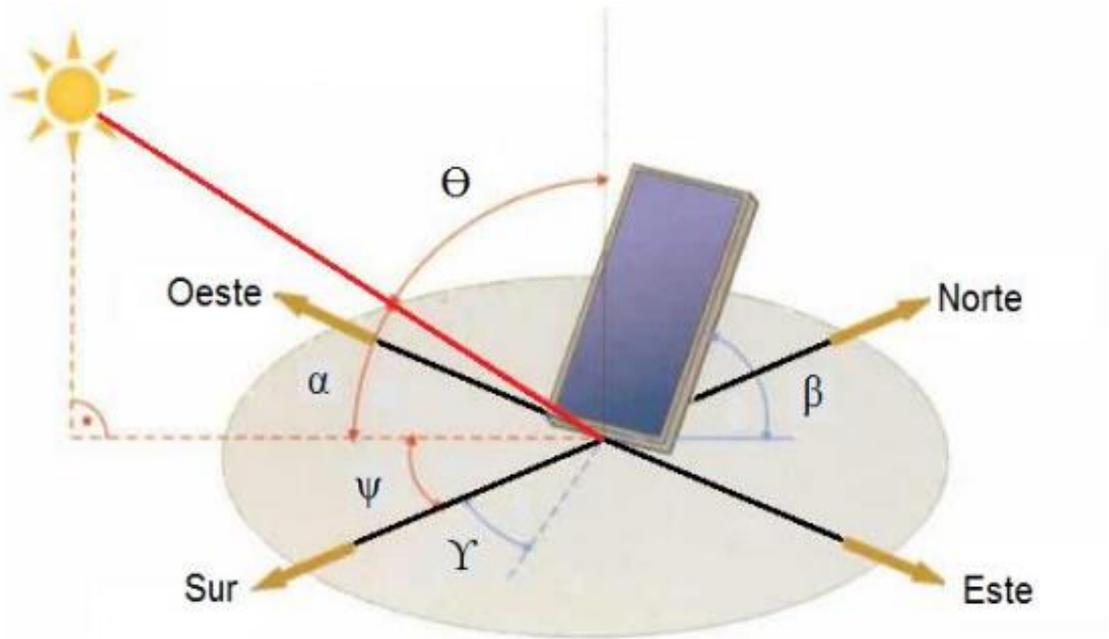


Figura 5 Ángulos de posicionamiento respecto al Sol (Lamaison, 2016).

2.3.2 Seguimiento solar

Los mecanismos de seguimiento solar están diseñados para captar la máxima cantidad de energía incidente ajustando la orientación de manera que permanezcan perpendiculares a los rayos del Sol (Ajbar, 2018).

Los principales sistemas de seguimiento solar son los siguientes:

- a) Eje vertical: Reduce el ángulo de incidencia mediante la rotación del sistema alrededor de un eje, de modo que la superficie y el acimut solar se alineen.
- b) Orientación Norte-Sur con ajuste continuo: El acimut de la superficie varía desde el este (-90°) hasta el oeste (90°).
- c) Orientación Este-Oeste con ajuste continuo: En este caso, el eje ajusta la inclinación de la superficie de acuerdo con el ángulo cenital y el acimut solar (Hernández, 2012) (Ajbar, 2018).

2.4 Concentradores solares

2.4.1 Definición

Dispositivo capaz de captar la radiación máxima emitida por el Sol mediante superficies reflectantes para concentrar la energía en un área pequeña y aumentar su intensidad (González, 2018).

2.4.2 Clasificación

Los colectores solares se pueden clasificar según su uso y la temperatura de operación (Hernández, 2012) (Ajbar, 2018).

a) Sistemas de baja temperatura

Estos sistemas operan a una temperatura de aproximadamente 65°C y utilizan absorbedores metálicos o no metálicos. Se emplean principalmente para calentar agua doméstica, piscinas y otras aplicaciones que no requieren temperaturas muy altas (Ibarra y Rojas, 2012). Los colectores solares planos son comúnmente utilizados para estos fines (Ibarra y Rojas, 2012) (Ajbar, 2018).

b) Sistemas de media temperatura

Estos sistemas operan en un rango de temperatura de 100 a 300°C. Ejemplos de estos sistemas son los colectores lineales tipo Fresnel (CLF) y los colectores parabólicos compuestos (CPC) (Hernández, 2012).

El CPC es un tipo de colector solar que combina dos parábolas para aumentar la captación de los rayos reflejados hacia la línea focal de la parábola, lo que incrementa la concentración y el rendimiento térmico. Sin embargo, se requiere un seguidor solar para su funcionamiento (Ajbar, 2018).

c) Sistemas de alta temperatura

Estos sistemas operan a temperaturas superiores a 300°C y se utilizan principalmente para la generación de electricidad. Están compuestos por una mayor cantidad de espejos llamados helióstatos (Ajbar, 2018).

Los helióstatos siguen la posición del Sol durante el día para reflejar la radiación solar incidente en el receptor, donde se calienta un fluido de trabajo como agua-vapor, sales fundidas o sodio líquido (Hernández, 2012) (Ajbar, 2018).

2.4.3 Concentrador solar cilindro parabólico

Una vez conocidos los conceptos básicos para el aprovechamiento de la energía solar, se puede determinar que, para obtener un mayor rendimiento en cuanto a su aprovechamiento, esta tiene que ser concentrada en áreas pequeñas y esto se puede alcanzar a través del uso de concentradores solares en su forma más simple la cual es de un cilindro parabólico.

Este tipo de concentrador está conformado por un canal con perfil parabólico, el cual consiste en una superficie reflejante que concentra la radiación incidente en un plano sobre una línea que se encuentra a la altura del foco de la parábola que forma dicho perfil (Ajbar, 2018).

El foco de la parábola se extiende formando una línea focal a lo largo de todo el canal, y sobre esta línea se coloca un tubo (receptor) que contiene el fluido de

trabajo. El fluido se calienta al absorber la radiación solar (Kokkinos, Venieri y Mantzavinos, 2021).

2.5 Tratamiento de aguas residuales con energía solar

La necesidad de contar con métodos más eficientes para tratar diferentes tipos de agua contaminada ha aumentado, ya que las normativas cada vez son más exigentes. Por lo tanto, se busca impulsar la innovación tecnológica para la remoción de compuestos tóxicos del agua.

El agua contaminada puede ser tratada mediante métodos convencionales como la adsorción con carbón activado o tratamientos químicos (oxidación térmica o cloración), entre otros. Sin embargo, estos procedimientos no son tan eficientes para cumplir con las nuevas normativas (García, 2014).

Las fuentes de agua son vulnerables a la contaminación con sustancias tóxicas que pueden ser perjudiciales para la salud. Por lo tanto, surge la necesidad de desarrollar procesos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. En este sentido, se ha descubierto que la energía solar es un medio eficiente para la eliminación de compuestos contaminantes del agua (Fermin, 2018).

Las actividades antropogénicas generan la contaminación del agua con colorantes, antibióticos, fármacos, plaguicidas y otros compuestos de origen sintético. Una forma de degradar o al menos reducir la actividad de estos compuestos es a través de reacciones que implican el uso de energía luminosa para romper los enlaces en las moléculas (Fermin, 2018).

La eliminación de compuestos persistentes del agua con ayuda de la energía solar puede ser aplicada en diferentes ámbitos, como el sector doméstico, industrial y comercial, mediante un pequeño reactor solar. Algunas ventajas que se obtienen al tratar aguas residuales son:

- a) Utilización en actividades de limpieza y riego.
- b) Reducción de la sobreexplotación de los mantos acuíferos y la presión hídrica.
- c) Prevención de la contaminación en cuerpos de agua.

Los procesos de oxidación avanzada (PAO) fueron denominados así por Glaze en 1987. Son tratamientos de contaminantes en fase acuosa en los que se generan radicales hidroxilos ($\text{HO}\cdot$) y se mantienen en condiciones ambientales. En este grupo se incluyen procesos catalíticos y no catalíticos que conducen a la oxidación de materia orgánica (Carbajo, 2013).

La Tabla 3 muestra la clasificación de los procesos de oxidación avanzada (PAO) en dos categorías: fotoquímicos y no fotoquímicos. Los procesos fotoquímicos aplican radiación para generar los radicales hidroxilos ($\text{HO}\cdot$), mientras que los procesos no fotoquímicos crean los radicales a través de la transformación de especies químicas o mediante el uso de otras fuentes de energía distintas a la luz (Carbajo, 2013).

Tabla 3 Clasificación de PAO. (Carbajo, 2013).

Fotoquímicos	No Fotoquímicos
Fotólisis con radiación UV (H_2O_2 / UV)	Ultrasonidos
Ozono y radiación UV (O_3 / UV)	Radiólisis y tratamiento con haces de e^-
Peróxido de hidrógeno, ozono, y radiación UV ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/ \text{UV}$)	Oxidación electroquímica / electrocatalítica
Procesos Foto-Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ / UV)	Procesos Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$)
Fotocatálisis heterogénea (Catalizador/ O_2 / UV)	Ozonización en medio alcalino (O_3/ OH^-)

2.5.1 Fotólisis

La fotólisis es un proceso químico en el que la luz UV proporciona la energía necesaria para romper una molécula en sus componentes más simples. También se conoce como foto-descomposición o fotodisociación. (Cruz y Corona, 2013).

La fotólisis puede ser directa o indirecta.

- a) En la fotólisis directa, la molécula absorbe la radiación UV y se separa en fragmentos más simples.
- b) En la fotólisis indirecta, se produce la fotodegradación a través de fotosensibilizantes como el oxígeno y radicales libres altamente reactivos que se forman en la reacción.

La fotólisis directa e indirecta pueden ocurrir al mismo tiempo; sin embargo, la fotólisis indirecta es mucho más importante para la vida media de los contaminantes (Cruz y Corona 2013).

El uso de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como agente oxidante en combinación con radiación UV aumenta la eficiencia del proceso, ya que la fotólisis del H_2O_2 genera radicales hidroxilos que reaccionan con los contaminantes orgánicos, formando compuestos más simples (Cruz, Julcour y Jáuregui, 2017).

2.5.2 Fotocatálisis Heterogénea Solar

El proceso empieza cuando la luz UV, proveniente de la radiación solar, se encarga de activar el fotocatalizador. Como consecuencia, se generan especies químicas llamadas radicales $HO\cdot$, los cuales van a oxidar los contaminantes orgánicos e inorgánicos y así cumplir el objetivo de descontaminar el agua (Cruz, Julcour y Jáuregui, 2017).

La reacción se lleva a cabo a través de fotocatalizadores de la familia de los calcogenuros, que son óxidos y sulfuros. Para este tipo de reacciones, usualmente se utiliza el TiO_2 (dióxido de titanio) por poseer algunas ventajas como alta

estabilidad química, bajo costo y, sobre todo, el ser inocuo para los seres vivos (Campos, 2015) (Cruz, Julcour y Jáuregui, 2017).

La fotocatalisis heterogénea solar es un PAO que involucra la radiación UV y un catalizador semiconductor, el cual debe poseer la capacidad de ser excitado con facilidad para que se puedan formar sitios donadores y captoreadores de electrones, dando lugar a reacciones redox (Carbajo, 2013).

2.5.3 Fenton

La reacción Fenton es la generación catalítica de radicales HO^\cdot , especie oxidante primaria, formada a partir de la reacción en cadena entre el ion ferroso y el H_2O_2 (Tobón y Peñaloza, 2014).

Los estudios de Henry J.H. Fenton pudieron demostrar que las soluciones de H_2O_2 y sales ferrosas son capaces de oxidar el ácido tartárico y málico, así como compuestos orgánicos (Cruz, Julcour y Jáuregui, 2017).

En la reacción Fenton, los radicales HO^\cdot son producidos por la descomposición catalítica del H_2O_2 , utilizando de catalizador iones Fe^{2+} en medio ácido, en un pH de 2 a 4 (Ecuación 2 a la 4)

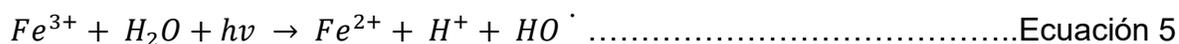


2.5.4 Solar Fenton

El proceso de Fenton solar es el resultado de agregar radiación UV a la reacción Fenton tradicional para aumentar la eficiencia. La radiación UV acelera la generación de radicales HO^\cdot , ayuda a la regeneración del catalizador ferroso al

reducir los iones Fe^{3+} y elimina complejos férricos (Carbajo, 2013) (Cruz, Julcour y Jáuregui, 2017).

El proceso de Fenton solar se expresa en la Ecuación 5, y el ciclo de reducción-oxidación puede continuar mientras haya H_2O_2 disponible para reaccionar (Cruz, Julcour y Jáuregui, 2017).



Este PAO se puede utilizar para oxidar una amplia variedad de contaminantes orgánicos disueltos, pero tiene la desventaja de requerir la adición continua de H_2O_2 y mantener condiciones ácidas.

Las aplicaciones más comunes de esta tecnología han sido en el tratamiento de aguas residuales industriales, suelos y lixiviados. Además, ha demostrado ser exitoso en la degradación de compuestos nitroaromáticos, fenoles policlorados y plaguicidas (Doménech, Jardim y Litter, 2016).

El rendimiento de los procesos Fenton y Solar Fenton puede verse afectado por varios parámetros, pero principalmente por el pH. Un valor de pH por debajo de 3 puede provocar la reducción de los radicales $HO \cdot$ (Cruz y Corona, 2013).

2.6 Colorantes

2.6.1 Colorantes azo

Los colorantes azo son sustancias que se adhieren de manera estable a algún material y se aplican mediante una unión química o absorción física a través de un medio acuoso. Estos colorantes se utilizan como aditivos para recuperar, realzar o proporcionar color a diferentes materiales o alimentos (Juan, 2013).

La mitad de todos los colorantes y pigmentos utilizados en la industria textil son de tipo "azo", lo que los convierte en la clase química más importante de colorantes sintéticos debido a su versatilidad y facilidad de síntesis (Zaruma, 2018).

Los colorantes azo se obtienen mediante síntesis química y se caracterizan por la presencia de uno o más grupos azo: C-N=N-C (Marcano, 2018).

2.6.2 Amarillo remazol

El colorante amarillo remazol es un colorante azoico utilizado en la tintura textil debido a su facilidad de uso, estabilidad de color y resistencia al lavado. Sin embargo, en cuanto a su seguridad de uso, se ha encontrado que puede ser carcinógeno, ya que puede liberar sustancias tóxicas de SO_x y NO_x cuando se calienta (ChemicalLook, 2008).

La Figura 6 muestra la estructura molecular del AR (ChemicalLook, 2008).

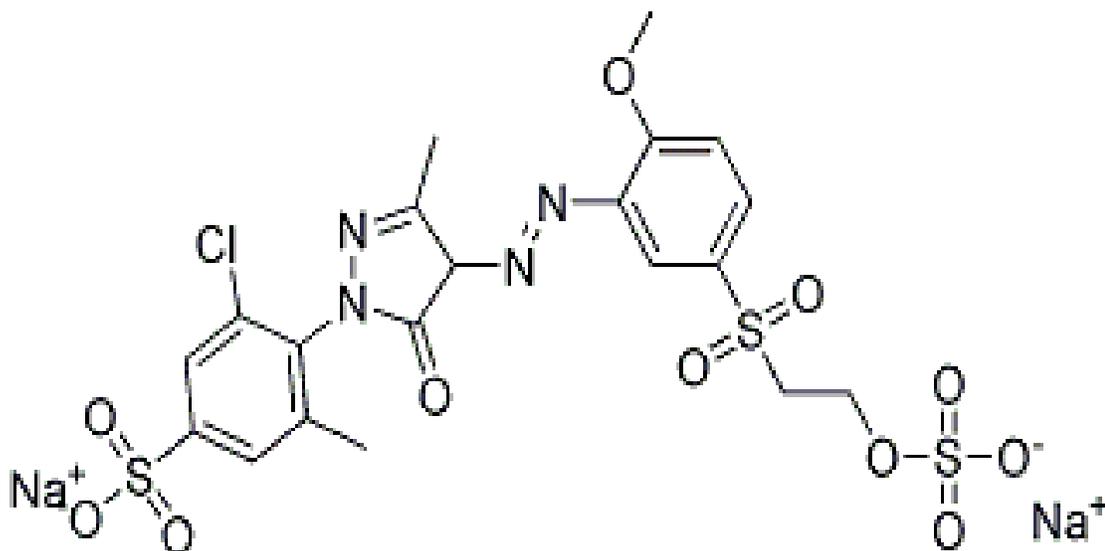


Figura 6 Estructura molecular Amarillo Remazol. (ChemicalLook, 2008).

2.7 Impacto a los ecosistemas y a la salud

La deficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en industrias y ciudades genera grandes cantidades de agua contaminada que afectan al medio ambiente. La mayor parte de esta agua contaminada se vierte directamente en mares, lagos y ríos, e incluso se filtra en los suelos a través de rellenos sanitarios y pozos sépticos (Rodríguez, 2017).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que el agua está contaminada cuando sus propiedades químicas, biológicas y físicas se modifican o alteran, lo que significa que no cumple con los requisitos necesarios para su uso (Sánchez y Martínez, 2020).

2.7.1 Salud

Aproximadamente el 15% de la producción total de colorantes azo se descarga al medio ambiente a través de aguas residuales, lo cual es peligroso debido a que algunos de estos colorantes pueden ser altamente tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos. Por esta razón, la mayoría de los colorantes azo están prohibidos (Piña, 2007).

Una de las causas de morbilidad y mortalidad en países desarrollados es la contaminación de cuerpos de agua superficiales, ya que las condiciones del agua no son las óptimas debido a la agricultura y, sobre todo, a las grandes áreas industriales y urbanas (Sánchez y Martínez, 2020).

2.7.2 Ecosistemas

Los efluentes que contienen colorantes pueden causar una grave contaminación orgánica y de color en el medio acuático. Aproximadamente el 80% de los contaminantes tienen origen en los cuerpos de agua, como arroyos y ríos que desembocan en el mar, teniendo como consecuencia la afectación a las franjas costeras (Ozbay y Yargic, 2015).

Las principales consecuencias de la contaminación del agua en los ecosistemas son:

- a) Alteraciones a las funciones ecológicas.
- b) Disminución de la biodiversidad.
- c) Afectaciones a los ecosistemas marinos y acuáticos.
- d) Pérdida de especies (Ozbay y Yargic, 2015).

Actualmente, un porcentaje muy alto de flora y fauna está en riesgo debido a la contaminación y pérdida de su hábitat. Se ha reportado que alrededor del 37% de especies de peces de agua dulce, el 67% de moluscos, así como el 52% de crustáceos y cerca del 40% de los anfibios, además de un gran número de aves y vegetales, están en grave peligro (Escobar, 2019).

2.8 Legislación de descarga de colorantes

Tras la gran necesidad de contar con agua de calidad, el incremento en la demanda y la contaminación del líquido, se ha optado por desarrollar un marco normativo que cumple con la función de cuidar, proteger y regular los recursos hídricos (Carbajo, 2013).

El marco legal establece restricciones referentes a la contaminación del agua, así como los requerimientos para que el agua sea de buena calidad (Carbajo, 2013).

2.8.1 Internacional

En la actualidad, los colorantes conforman el grupo de aditivos donde los países tienen más diferencias en cuanto a sus legislaciones. En los países nórdicos, hay colorantes que están prohibidos, mientras que en parte de Reino Unido se llegan a utilizar colorantes que no están autorizados en ningún otro país de la Unión Europea (Juan, 2013).

La Tabla 4 muestra los parámetros permisibles de descarga de agua para los países de Turquía, Brasil y Vietnam (Truong, 2015) (Gazette, 1988) (CONAMA, 2011).

Tabla 4 Parámetros internacionales permisibles de descarga de agua (Truong, 2015) (Gazette, 1988) (CONAMA, 2011).

Parámetros	Unidades	Turquía	Brasil	Vietnam
DQO	<i>mg/L</i>	200	60	150
SST	<i>mg/L</i>	50	30	25
Grasas y aceites	<i>mg/L</i>	15	50	185
Plomo	<i>mg/L</i>	0.5	0.3	0.5
Zinc	<i>mg/L</i>	2	5	–
Cadmio	<i>mg/L</i>	1	0.2	0.1
pH		6 – 8.5	5 – 9	5 – 9
Arsénico	<i>mg/L</i>	0.3	0.5	0.3
Temperatura	°C	30	< 40	30
Cianuro	<i>mg/L</i>	10	1	2
COT	<i>mg/L</i>	25	–	25

2.8.2 Nacional

El 27 de agosto de 2021, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) informó que el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COMARNAT) dio la aprobación a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2022, la cual establece los límites permitidos de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua de la Nación (SEMARNAT, 2022).

La nueva norma reemplaza a la expedida en 1996, la cual no había sido modificada durante 25 años, a pesar de que la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización exige que las normas se actualicen cada 5 años.

Las modificaciones que incluye la nueva NOM-001-SEMARNAT-2022 toman en cuenta parámetros de color verdadero, temperatura, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y grado de toxicidad. Esta norma establece como temperatura límite para la descarga en ríos es de 35 °C, reduciendo cinco grados al parámetro que establecía la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2022).

La Tabla 5 muestra los parámetros permisibles de descarga de agua que establece la NOM-001-SEMARNAT-2022 (SEMARNAT, 2022). También se incluyen parámetros de los estados de Baja California Sur (Ayuntamiento B.C.S, 2013) y Querétaro (Burgos y Espinosa, 1996).

Tabla 5: Concentraciones máximas permisibles a nivel Nacional, Baja California Sur (BCS) y Querétaro (Ayuntamiento B.C.S, 2013).

Parámetro	NOM – 001 SEMARNAT-2022			BCS	Querétaro
	Ríos y drenes	Lagos y lagunas	Zonas marinas	Alcantarillado	
	<i>mg/L</i>				
DQO	180	120	100	420	470
DBO	220				
SST	72	24	24	125	270
Grasas y aceites	18	18	18	75	80
Plomo	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
Zinc	15			2	2
Cadmio	0.3	0.15	0.3	0.75	0.01
pH (unidimensional)	6 – 9				
Arsénico	0.3	0.15	0.3	0.75	0.5
Temperatura	35 °C			40 °C	35 °C
Cianuro	2	1.5	2.5	1.5	0.1
COT	45	30	25	30	45

BCS: Baja California Sur, COT: Carbono orgánico total, DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno, DQO: Demanda Química de Oxígeno y SST: Sólidos suspendidos totales.

La NOM-001-SEMARNAT-2022 también establece parámetros para el color verdadero y toxicidad aguda, los cuales se muestran en la Tabla 6 (SEMARNAT, 2022).

Tabla 6 Parámetros de color y toxicidad (SEMARNAT, 2022).

Color verdadero $\lambda \text{ nm}$	Toxicidad aguda
436	2-15 min de exposición
525	
620	

λ Longitud de onda

2.9 Estado del arte

Tratamiento	Condiciones	Resultados	Referencia
Evaluación de la degradación del colorante amarillo entre catálisis heterogénea y homogénea.	<p>Heterogénea</p> <p>pH 4</p> <p>H₂O₂ 300 <i>mg/L</i>.</p> <p>TiO₂ 700 <i>mg/L</i>.</p> <p>4 h con agitación constante por 30 min y sin radiación UV.</p> <p>Homogénea</p> <p>pH 3</p> <p>H₂O₂ 200 <i>mg/L</i></p> <p>Fe₂SO₄ 30 <i>mg/L</i></p> <p>4 h con radiación UV.</p> <p>Solución de Amarillo 25<i>mg/L</i></p> <p>Reactor Batch</p>	<p>Heterogénea</p> <p>97.87% degradación.</p> <p>Homogénea</p> <p>87.51% degradación</p>	(Tobón y Peñaloza, 2014)
<p>Aplicación de la Fotocatálisis solar para tratamiento y reutilización de efluentes textiles.</p> <p>Colorantes</p> <p>a) Azul</p> <p>b) Marino</p> <p>c) Turquesa</p>	<p>Reactor de vidrio abierto</p> <p>Agitación magnética</p> <p>TiO₂: 1 y 2 <i>g/L</i></p> <p>pH inicial: 10.55</p> <p>DQO: 100 <i>mg/L</i></p> <p>7 h</p>	<p>pH final: 10.80</p> <p>DQO final: 25</p> <p>Los colorantes azul y marino 88% de remoción de color</p>	(Pey, 2010)

<p>Biodegradación de colorante azul directo por consorcios bacterianos aislados de un efluente textil. Azul Directo</p>	<p>Solución: 10000 <i>mg/L</i> Azul directo (<i>mg/L</i>): 10, 50, 100 y 150. 30°C pH de 7.5 $\lambda = 583 \text{ nm}$ Consortio bacteriano 100 <i>mg/L</i> de colorante. Condiciones estáticas.</p>	<p>93.91% degradación</p>	<p>(Orozco, 2018)</p>
<p>Degradación de Amarillo en medio acuoso usando hidrotalcitas como catalizadores Fenton heterogéneos.</p>	<p>100 <i>mL</i> de 10 <i>mg/L</i> de Amarillo-5. 70°C en agitación constante. H₂O₂ al 30%. $\lambda = 428 \text{ nm}$. pH 3 Catalizador <i>CoNiMgAl(OH)</i></p>	<p>95% de degradación de color</p>	<p>(Flores y López, 2020)</p>
<p>Degradación fotocatalítica del amarillo remazol utilizando fotocatalizadores híbridos de óxido de estaño dopados con polianilina con soporte de diatomita.</p>	<p>250 <i>mL</i> 25 °C 50 ppm de AR 15 min Catalizador <i>PANI – SnO₂</i> Reactor Batch $\lambda = 429 \text{ nm}$</p>	<p>Degradación del 96%.</p>	<p>(Akti, 2018)</p>
<p>Decoloración de colorantes azoicos</p>	<p>100 <i>mg/L</i></p>	<p>Decoloración de VB 95.70 %</p>	<p>(Budikania <i>et al.</i>, 2019)</p>

mediante electrólisis de descarga de resplandor de contacto. Colorantes: Rojo Remazol Amarillo Remazol Violeta Brillante	20 mg/L de iones Fe^{2+} Electrolito: Sulfato de sodio Reactor Batch CGDE a 700 V. Inyección de aire 1.1 L/min 180 min $\lambda = 517 \text{ nm}$ pH 7.5	Decoloración de RR 70.36 % Decoloración de AR 51.26 %	
Aplicación de riboflavina inmovilizada con celulosa para la degradación anaeróbica de un modelo de colorante azoico RGY.	120°C 6 h $\lambda = 410 \text{ nm}$ pH 7	Degradación 89.4%	(Martins <i>et.</i> , 2015)

AR Amarillo remazol, CGDE Electrólisis de descarga de resplandor de contacto, PANI Polianilina, RGY Remazol Golden Yellow, RR Rojo remazol, SBA Sílice mesoporosa dopada con aluminio, VB Violeta brillante y ZZ Zhou & Zimmermann.

CAPÍTULO 3 JUSTIFICACIÓN, HIPOTÉISIS Y OBJETIVOS

3.1 Justificación

La calidad de las aguas superficiales se deteriora día a día por la descarga de efluentes industriales con alto contenido de compuestos orgánicos, como los colorantes. Más de 10,000 colorantes se están utilizando actualmente en diversas industrias, principalmente en la textil (Zaruma, 2018).

Se estima que alrededor del 15% del total de los colorantes textiles se liberan en los alrededores como efluentes, lo cual está causando daños directos o indirectos en nuestro entorno. Estos compuestos son considerados tóxicos y perjudiciales para el ambiente y la salud humana.

El método solar Fenton Heterogéneo permite tratar contaminantes no biodegradables mediante la aplicación de luz UV, la cual acelera el proceso de remoción, haciéndolo altamente eficiente, además de que disminuye el uso de productos químicos y mejora la calidad del agua que se descarga (Pérez y Buitrón, 2010).

El uso de la energía solar trae beneficios al ambiente al llevar a cabo este proceso, ya que es de fácil acceso y disminuye el consumo de reactivos químicos al acelerar la reacción. Además, sustituye el uso de lámparas UV.

Alcances y delimitación

Evaluar el efecto de la radiación ultravioleta en la remoción del AR en solución acuosa.

3.2 Hipótesis

La reacción solar Fenton heterogénea incrementa eficientemente la remoción del colorante AR en un 80%.

3.3 Objetivo general

Evaluar el efecto de la radiación UV en la remoción del colorante AR mediante un sistema solar Fenton heterogéneo.

3.3.1 Objetivos específicos

1. Establecer la metodología para las determinaciones analíticas y caracterización del colorante amarillo remazol.
2. Realizar lecturas de radiación UV por medio de un radiómetro y analizar los datos obtenidos para calcular la energía acumulada en kJ/L .
3. Diseñar la matriz experimental mediante un diseño Box-Benhken y optimizar el proceso mediante el software STATGRAPHICS®.
4. Operar un reactor de flujo continuo y un concentrador solar parabólico para realizar el proceso Fenton solar heterogéneo.
5. Determinar las condiciones experimentales óptimas para la remoción del colorante amarillo remazol mediante un proceso Fenton solar heterogéneo.
6. Evaluar el efecto de parámetros como: temperatura, % de remoción de color, % de remoción de colorante, % de remoción de DQO, turbidez y concentración de H_2O_2 .

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

La Figura 7 se muestra el diagrama general de la metodología llevada a cabo durante este proyecto.

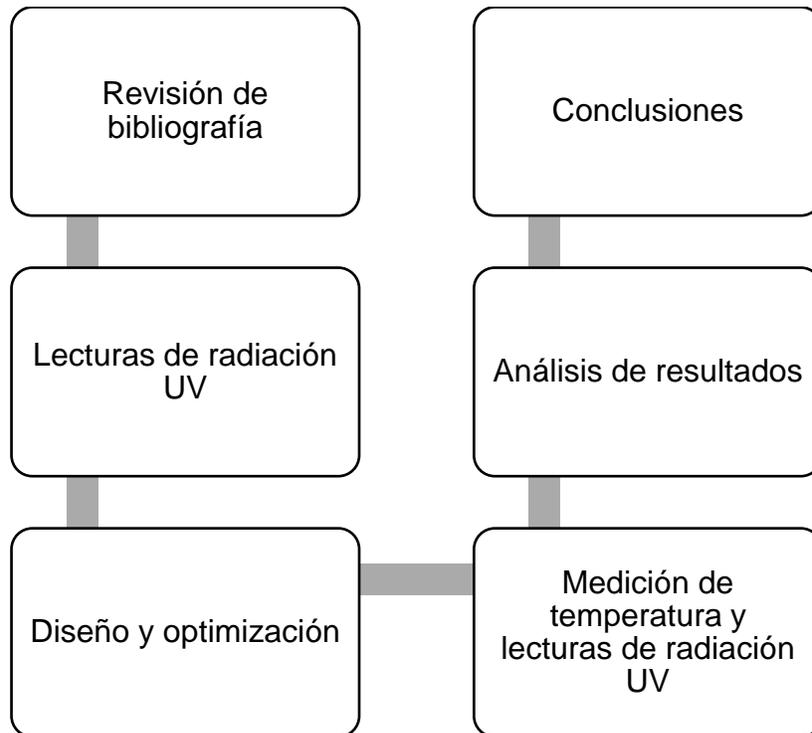


Figura 7 Metodología general. Elaboración propia.

4.1 Revisión de bibliográfica

Se realizó la revisión bibliográfica de 61 artículos científicos para la construcción del marco teórico, desarrollo experimental y discusión de resultados.

4.2 Lecturas de radiación UV

Las lecturas de radiación se llevaron a cabo con el radiómetro UV Solar Light® PMA2100 con sensores de radiación UV-A+B, monitoreando la irradiancia antes durante y después de tomar cada muestra en todos los experimentos.

Con la información adquirida por este equipo se midió la radiación UV- A y UV- B en W/m^2 y se calculó la cantidad de energía acumulada.

4.3 Diseño y optimización

Para delimitar los niveles del diseño experimental se han corrido pruebas preliminares con valores de las variables aleatoriamente elegidos de acuerdo con la literatura revisada; con los resultados de estas pruebas se eligieron los niveles para cada una de las variables del diseño.

El diseño experimental aplicado fue un modelo central compuesto, el cual tiene un diseño factorial fraccionado con puntos centrales y ampliado con puntos axiales.

La elección de este diseño se debe a que los resultados de los primeros experimentos no han sido claros para la definición de los niveles de las variables, por lo que el uso de un diseño factorial simple podría causar errores en la selección de estos niveles generando una interpretación incorrecta de los resultados, al incluir puntos centrales y axiales el ajuste de los resultados es más exacto.

Para el diseño experimental Box-Behnken se ha utilizado STATGRAPHICS®, el cual es un software de apoyo en el análisis de métodos experimentales y estadísticos. Se han elegido los niveles de las variables a controlar: H_2O_2 : 200-400 mg/L , THR: 20-40 min y Relación m/V : 0.1-0.3, posteriormente se han introducido en el asistente de diseño del software, el cual arrojó una matriz experimental con 16 experimentos y 4 grados de libertad.

El software STATGRAPHICS® también permite obtener el rango óptimo de las variables a controlar para alcanzar las eficiencias máximas en cada variable de respuesta.

Los experimentos presentados han sido realizados en un periodo de 1 mes y medio entre la última semana de enero y la primera semana de marzo en horarios de entre 10:00 y 12:00 puesto que son las horas con mayor radiación solar aparente y por la disponibilidad de los equipos.

4.4 Monitoreo de temperatura

Debido a que se ha reportado en la literatura que el H_2O_2 se descompone a temperaturas mayores a $80^\circ C$ (Castañeda, 2022), se tiene que monitorear la temperatura de la solución para asegurar que el H_2O_2 suministrado tenga efecto en

el sistema. Las lecturas de temperatura se midieron con un termómetro infrarrojo digital Big Healthy.

La Tabla 7 muestra la hora en que se registró la temperatura al momento de tomar las muestras.

Tabla 7 Temperatura registrada para el diseño experimental Box-Behnken

EXPERIMENTO	HORA MUESTRA	TEMPERATURA °C
1	11:43	47.2
2	12:13	53.9
3	12:43	50.6
4	13:13	49.8
5	13:40	49.2
6	10:41	59.4
7	11:45	60.8
8	12:38	45.2
9	11:12	64.1
10	11:55	53.3
11	10:35	35.6
12	11:23	48.2
13	12:25	57.8
14	13:15	58.1
15	12:00	56.0
16	12:50	58.7

4.5 Análisis de resultados

El análisis estadístico de los resultados se basó en el software STATGRAPHICS® para obtener gráficas de superficie de respuesta de cada variable para así

determinar el ajuste del modelo y las condiciones óptimas para maximizar las eficiencias.

4.6 Reactivos y equipo

Reactivos:

- Reactivo Amarillo Remazol
- Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2)

Instrumentos:

- 3 bombas peristálticas
- 1 concentrador solar parabólico con seguimiento manual
- HACH® DR 6000
- Radiómetro UV Solar Light® PMA2100

4.7 Metodología analítica general

La Figura 8 presenta la metodología analítica que se llevó a cabo en este trabajo de tesis.

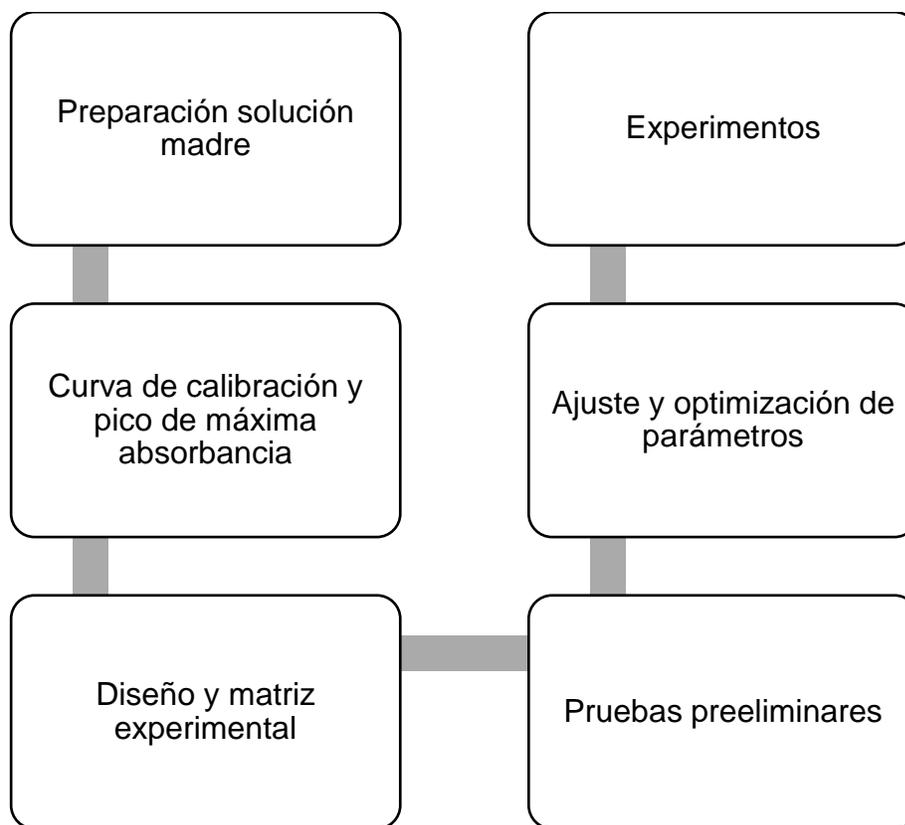


Figura 8 Metodología analítica general. Elaboración propia.

4.7.1 Preparación de las disoluciones madre y de H_2O_2

El reactivo utilizado fue el colorante amarillo remazol en solución acuosa a una concentración de 50 mg/L , se pesaron 0.025 g de reactivo y se aforó a 500 mL .

La solución de H_2O_2 se preparó con 2 mL de reactivo aforado a 100 mL , se tituló mediante la técnica por yodometría; la cual permite determinar la concentración de la solución.

4.7.2 Curva de calibración

A partir de la solución madre de AR se prepararon 6 puntos de la curva de calibración y se obtuvo el volumen V_1 de acuerdo con la siguiente fórmula $V_1 C_1 = V_2 C_2$.

Donde:

C: Concentración [mg/L]

V: Volumen [L]

1 y 2: Subíndices de la solución inicial y final respectivamente

De la solución madre de colorante se ha tomado el volumen correspondiente y se ha aforado en matraces de 25 mL.

La Tabla 8 muestra las concentraciones y el volumen inicial utilizadas para la construcción de la curva de calibración.

Tabla 8 Concentraciones de la curva de calibración.

Concentración <i>mg/L</i>	Volumen inicial <i>mL</i>
30	15
20	10
10	5
5	2.5
2	1

Los datos obtenidos se han mapeado en un diagrama de dispersión XY donde el eje de las abscisas corresponde a la concentración de la solución y el eje de las ordenadas al valor de absorbancia leído a esa concentración.

Después se ajustó a una ecuación lineal con un coeficiente de determinación $R^2 \geq 0.95$. Con esta curva de calibración se han leído las concentraciones de las soluciones preparadas para los experimentos realizados al inicio y al final del tratamiento.

La Figura 9 muestra la curva de calibración del colorante AR presentando una R^2 de 0.9962.

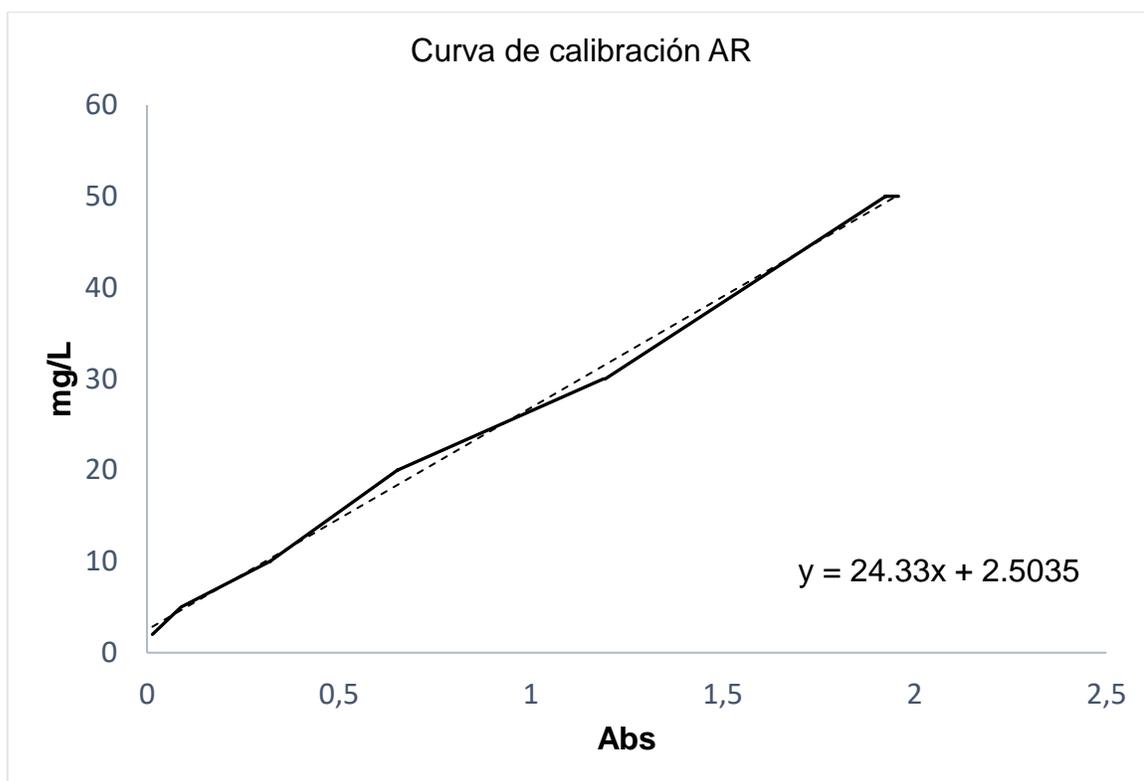


Figura 9 Curva de calibración

Se utilizó el espectrofotómetro UV-Vis Cary 1E para las lecturas de absorbancia de cada solución a una longitud de onda de 270 nm , todo eso para obtener el pico máximo de absorción (Tabla 9).

Tabla 9 Absorbancias a 270 nm .

Concentración <i>mg/L</i>	Absorbancia
30	1.935
20	1.191
10	0.065
5	0.089
2	0.014

A continuación se muestra el pico de máxima absorbancia el cual se presentó a una longitud de onda de 270 nm (Figura 10).

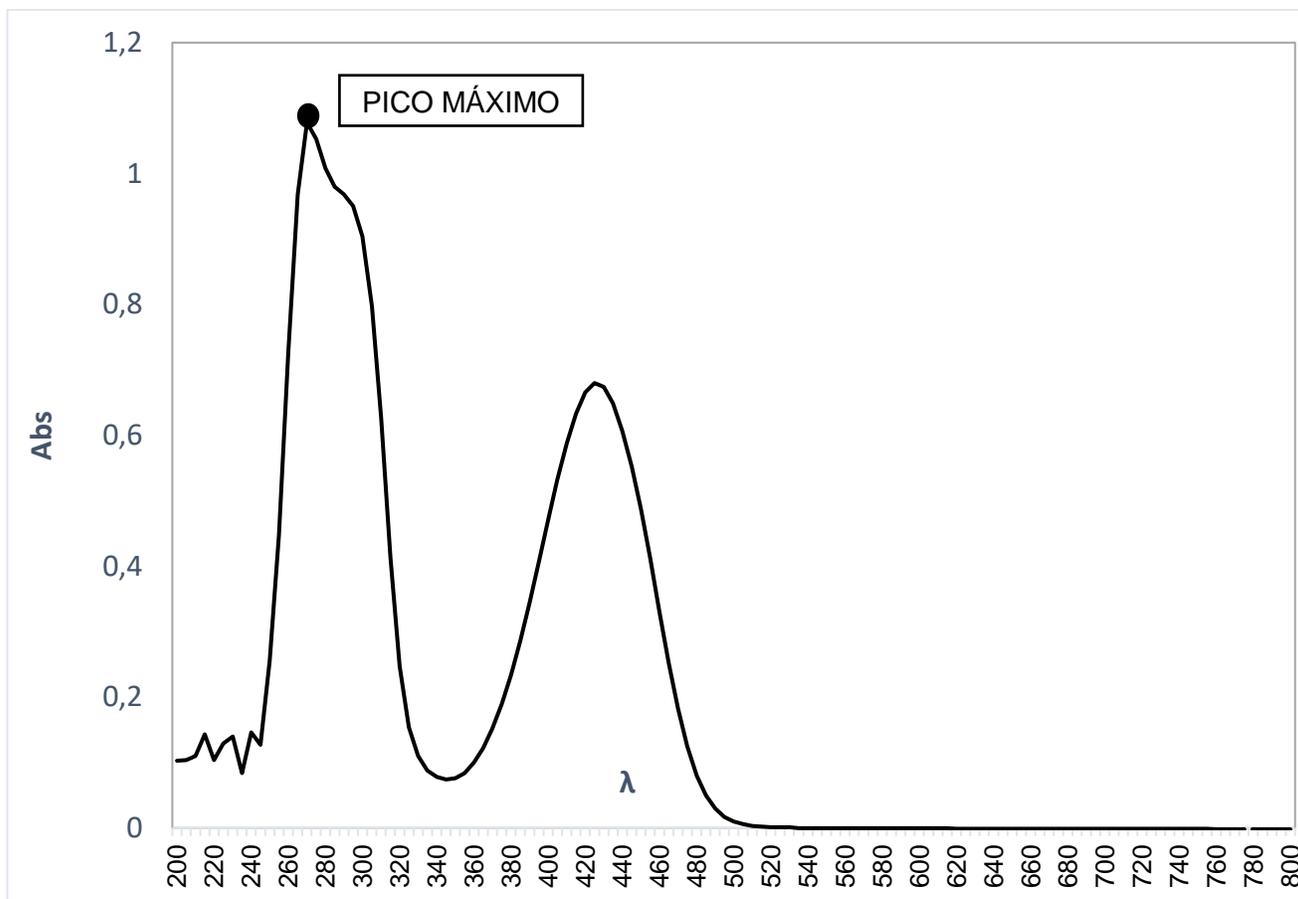


Figura 10 Espectro UV- Vis del AR.

4.7.3 Diseño y matriz experimental

El diseño experimental que se aplicó fue un Box-Behnken con 4 puntos centrales, 16 corridas y 6 grados de libertad del error mostrada en la Tabla 10.

Los factores de operación fueron:

- Concentración de H_2O_2 (200-400 mg/L)
- TRH de 20-40 min
- Relación m/V (0.1-0.3)

El efecto de cada uno de los factores se evaluó sobre las variables de respuesta: porcentaje de remoción de color, colorante, DQO y valor final de turbidez.

Tabla 10 Matriz experimental.

Experimento	H₂O₂ <i>mg/L</i>	TRH <i>min</i>	Relación <i>m/V</i>
1	300.0	30.0	0.2
2	300.0	30.0	0.2
3	300.0	30.0	0.2
4	300.0	30.0	0.2
5	200.0	20.0	0.2
6	400.0	20.0	0.2
7	200.0	40.0	0.2
8	400.0	40.0	0.2
9	200.0	30.0	0.1
10	400.0	30.0	0.1
11	200.0	30.0	0.3
12	400.0	30.0	0.3
13	300.0	20.0	0.1
14	300.0	40.0	0.1
15	300.0	20.0	0.3
16	300.0	40.0	0.3

4.7.4 Concentrador solar

El concentrador solar implementado para la realización de los experimentos fue un concentrador solar parabólico con seguimiento manual, con un ángulo de inclinación de 60° (Figura 11).

El aprovechamiento máximo de energía en los sistemas sin seguimiento se obtiene cuando la pendiente es igual a la latitud del lugar, sin embargo, en este caso para el sitio donde se realizaron los experimentos esto no se cumple, puesto que la latitud en Toluca es de 19.2878° .

Por lo tanto, el diseño del concentrador a un ángulo de 60° permite el paso adecuado de la solución a través del sistema; así mismo, la implementación del seguimiento solar sobre un eje vertical permite minimizar la variación en los valores de irradiancia durante todo el tiempo de tratamiento y tener una mayor captación de energía comparado con un sistema estacionario.

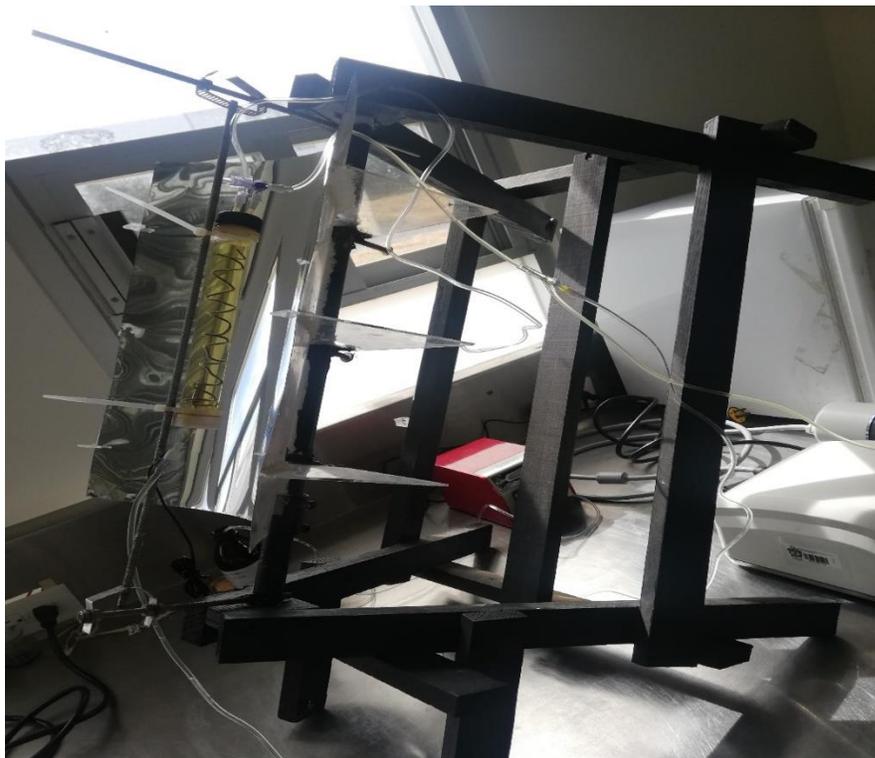


Figura 11 Concentrador solar parabólico con seguimiento manual.

La Tabla 11 muestra las medidas del concentrador parabólico utilizado para la realización de este trabajo.

Tabla 11 Medidas del concentrador solar parabólico.

Lado recto	28 cm
Distancia focal	7 cm
Distancia al tubo pyrex	4.5 cm
Longitud parábola	32 cm
Largo	36 cm
Área del concentrador	1149 cm²

4.7.5 Análisis de las muestras

En la Figura 12 se describen los pasos a seguir para el análisis de las muestras.

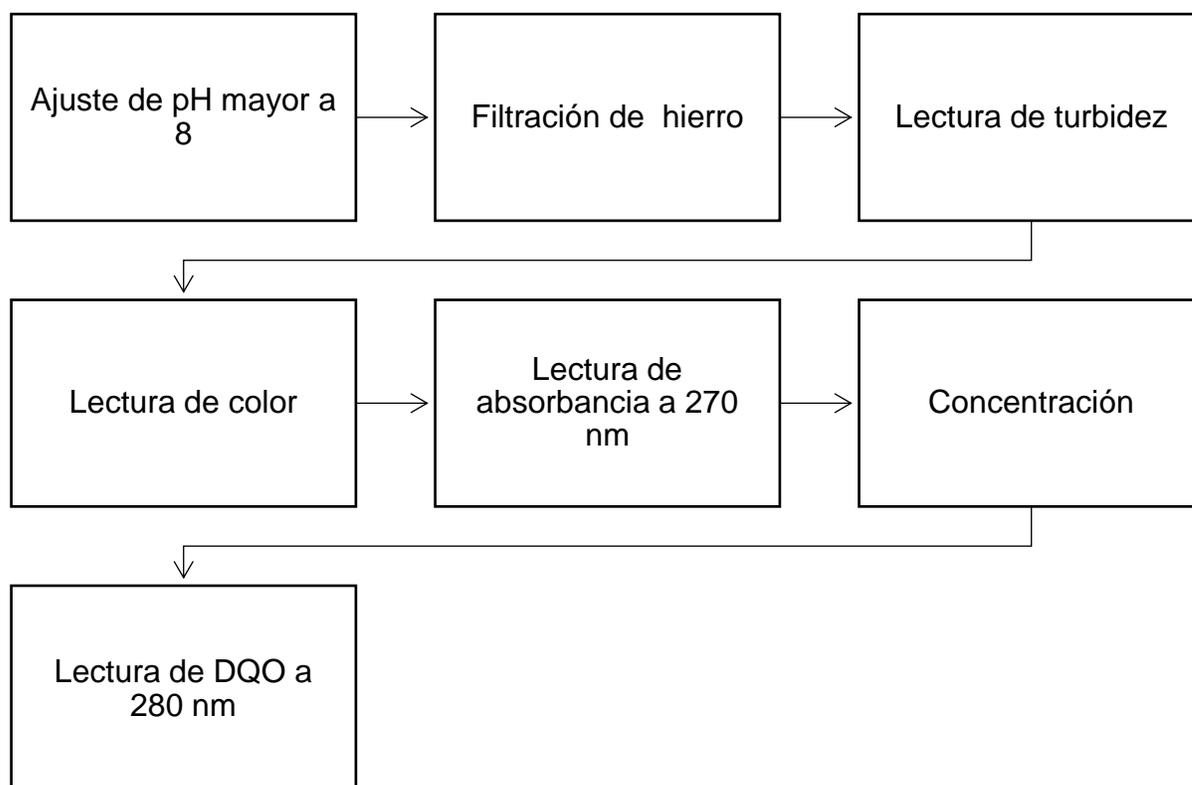


Figura 12 Metodología analítica para muestras.

4.7.6 Técnicas e instrumentos de análisis

En la Tabla 12 se presentan las técnicas e instrumentos que se llevaron a cabo para la caracterización de las muestras.

Tabla 12 Técnicas e instrumentos de análisis.

Parámetro	Técnicas e instrumentos
pH	Método potenciométrico
Turbidez	HACH® Programa 95
Color	HACH® Programa 19
Absorbancia	HACH® λ 270 nm
DQO	<i>DQO – H₂O₂</i> (Carbajal-Palacios, 2017)

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

5.1 Caracterización del colorante

La Tabla 13 muestra los parámetros iniciales de la caracterización del colorante AR.

Tabla 13 Caracterización del AR.

Colorante	Turbidez <i>NTU</i>	Color <i>Pt – Co</i>	Concentración <i>mg/L</i>	DQO <i>mg/L de O₂</i>
Amarillo	7	1650	48.71	270.63

5.2 Tratamiento Solar-Fenton

Se realizaron 16 experimentos de acuerdo con el diseño Box-Behnken, como se muestra en la Tabla 14, para determinar las condiciones óptimas de operación.

Siendo el experimento 2 el que mostró la mayor eficiencia 99%, en términos de la DQO, 97.2% de color y 79.3% del colorante, la turbidez al final del tratamiento fue de 15 NTU bajo las condiciones de 300 mg/L de H_2O_2 , 30 min de tiempo de retención hidráulico (THR) y una relación de m/V de 0.2.

Tabla 14 Resultados de los experimentos del Diseño Box- Behnken.

Experimento	H_2O_2	THR	Relación	Color	DQO	Colorante	Turbidez
	<i>mg/L</i>	<i>min</i>	<i>g/mL</i>	%			<i>NTU</i>
1	300	30	0.2	98.8	87.3	81.5	7
2	300	30	0.2	97.2	99.0	79.3	15
3	300	30	0.2	96.8	58.5	64.0	6
4	300	30	0.2	98.2	57.0	65.9	12

5	200	20	0.2	98.2	61.9	85.3	4
6	400	20	0.2	90.4	60.7	64.0	15
7	200	40	0.2	75.2	59.6	55.0	37
8	400	40	0.2	88.9	69.0	73.3	11
9	200	30	0.1	97.8	68.5	66.3	9
10	400	30	0.1	96.2	82.1	71.7	14
11	200	30	0.3	91.6	73.6	71.4	9
12	400	30	0.3	75.0	60.8	71.9	30
13	300	20	0.1	92.7	89.0	81.7	12
14	300	40	0.1	95.5	59.1	71.6	10
15	300	20	0.3	98.4	48.8	73.1	27
16	300	40	0.3	97.8	51.3	79.0	37

5.2.1 Efecto de la radiación UVA y radiación solar

La energía acumulada es aquella cantidad de energía que se necesita para romper un enlace molecular, en este caso de acuerdo con los cálculos termodinámicos para romper los enlaces del AR se necesitan aproximadamente 2.07 kJ/L para 50 mg/L de colorante y el concentrador solar utilizado permitió la captación de una energía superior a este valor.

La Figura 13 muestra la energía acumulada expresada en términos de radiación UV que se obtuvo a lo largo de los 16 experimentos del diseño Box-Behnken, en el experimento 2 que se corrió a las 12:13 horas; la energía acumulada obtenida fue de 199.79 kJ/L con una eficiencia de remoción de color del 97.2% así como un 79.3% y 99% para la remoción de colorante y DQO, respectivamente.

El valor máximo de energía acumulada fue de 293.41 kJ/L el cual se presentó en el experimento 7 que se corrió a las 11:45 horas mostrando una eficiencia de remoción

de color de 75.2%, remoción del colorante y DQO de 55% y 59.6%, respectivamente, estos porcentajes de remoción no fueron los más altos durante el diseño experimental, por lo que no existe una relación directa entre la energía acumulada y el porcentaje de remoción.

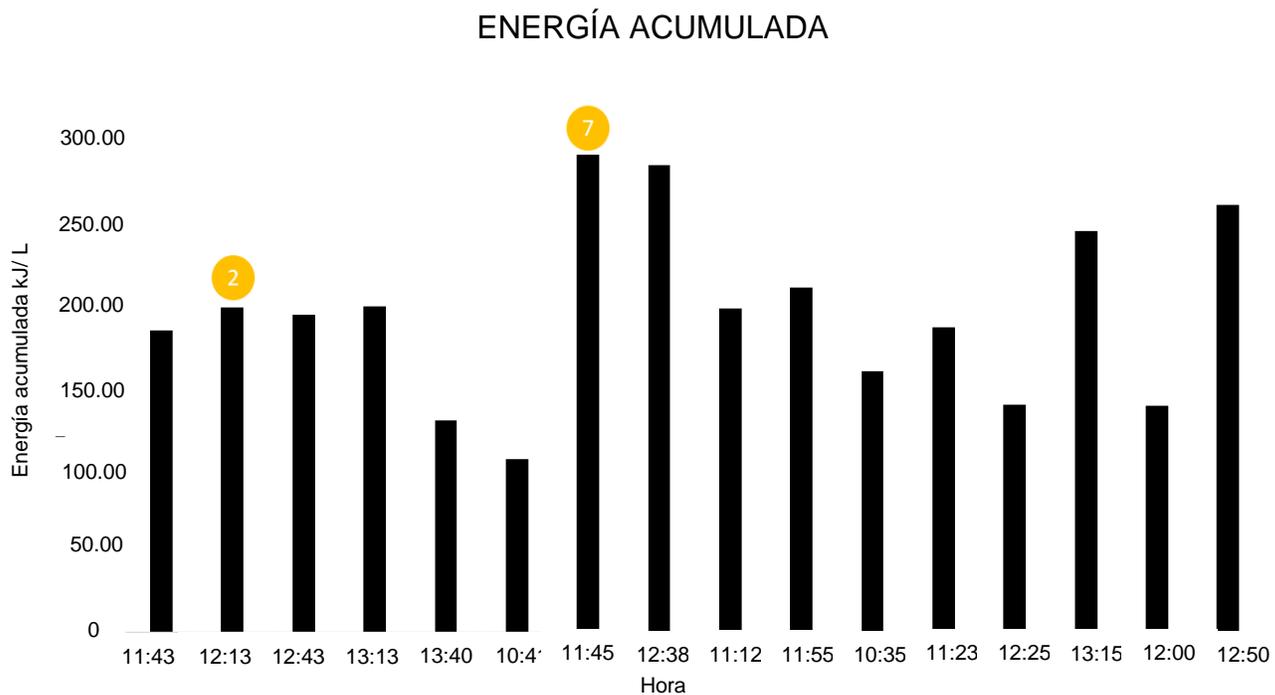


Figura 13 Energía acumulada de los 16 experimentos realizados.

La radiación solar determina un valor máximo teórico de la energía solar disponible, y es ampliamente utilizada como referencia en el estudio de la radiación solar.

Los resultados para la irradiación solar se obtuvieron con base a la Geometría Solar, descrita anteriormente. Los datos utilizados para el análisis de la irradiación solar fueron:

- a. Constante solar G_{sc} con un valor de $1,361.00 \text{ W/m}^2$
- b. Latitud de Toluca ϕ con un valor de 19.2878°

La Tabla 15 muestra para cada experimento el valor de la irradiación solar, en función de la hora y día del experimento.

Tabla 15 Valores de Irradiación extraterrestre.

Experimento	Fecha	Hora	n	H_o MJ/m^2
1	25-ene	11:43	25	19.9147
2	25-ene	12:13	25	19.9147
3	25-ene	12:43	25	19.9147
4	25-ene	13:13	25	19.9147
5	25-ene	13:40	25	19.9147
6	15-feb	10:41	46	26.7733
7	15-feb	11:45	46	26.7733
8	15-feb	12:38	46	26.7733
9	22-feb	11:12	53	29.2702
10	22-feb	11:55	53	29.2702
11	22-feb	10:35	53	29.2702
12	22-feb	11:23	53	29.2702
13	01-mar	12:25	60	31.7348

14	01-mar	13:15	60	31.7348
15	01-mar	12:00	60	31.7348
16	01-mar	12:50	60	31.7348

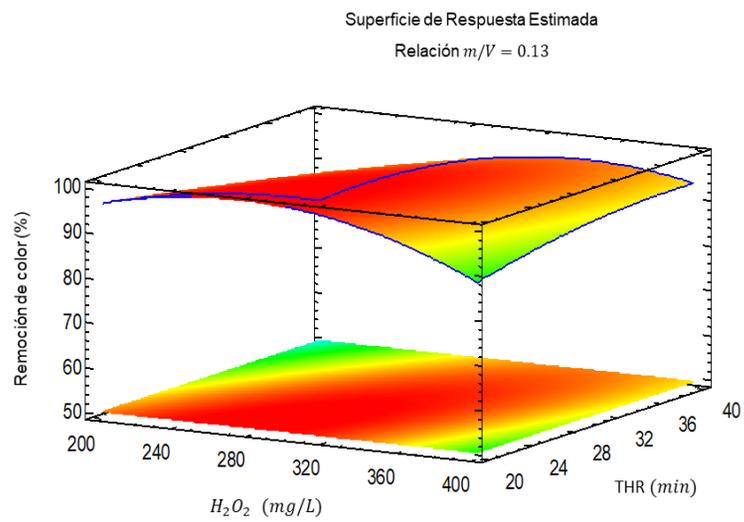
H_0 irradiación solar y n día del año.

El valor máximo de H_0 fue de $31.7348 \text{ MJ}/\text{m}^2$ y se presentó en el último experimento, por lo que se concluye que la irradiación solar tiene una relación proporcional con los días del año, también se observa que no hay una relación directa entre la energía acumulada y la irradiación solar ya que los valores máximos de cada una no se presentaron en el mismo número de experimento.

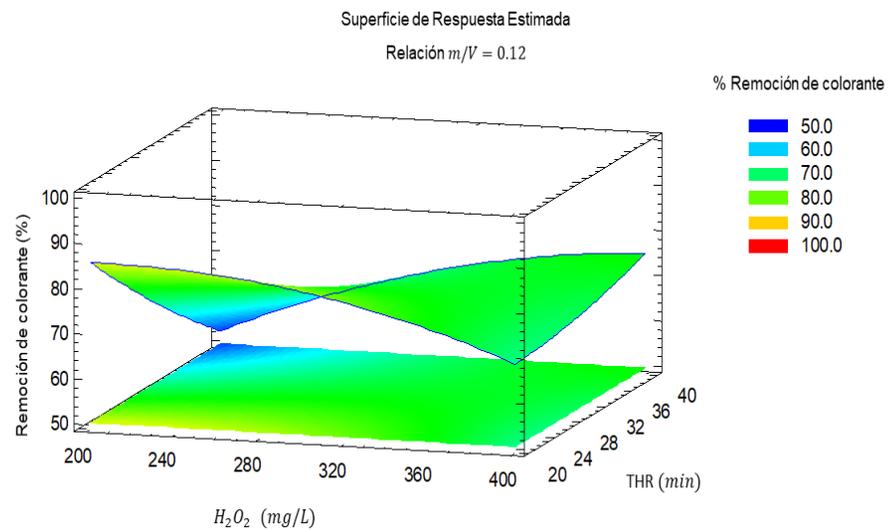
5.3 Efectos de los factores

5.3.1 Efecto del H_2O_2 y TRH

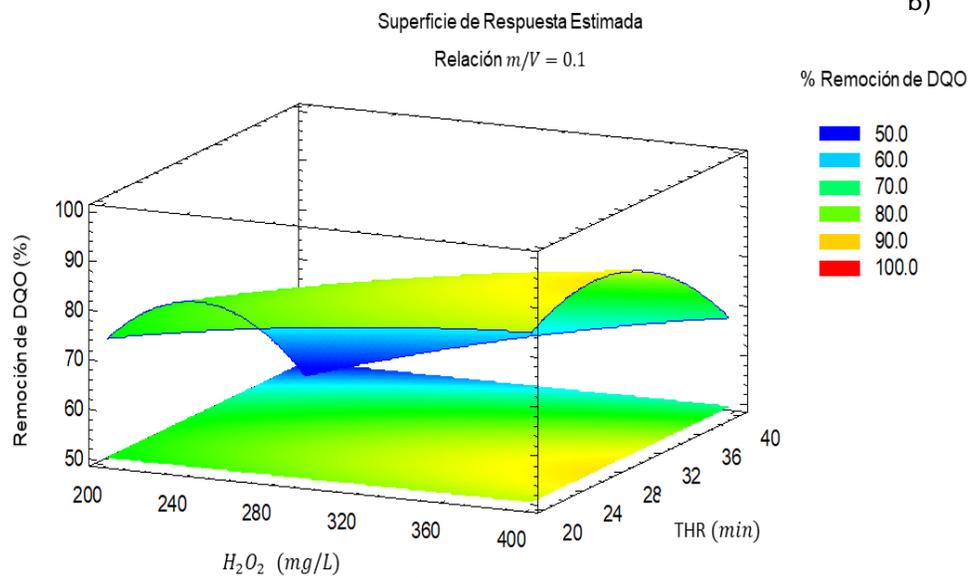
La Figura 14 muestra el efecto del H_2O_2 y TRH en a) color, b) colorante y c) DQO, de manera general al aumentar la concentración del H_2O_2 de 200 a 320 mg/L la eficiencia de color, colorante y DQO disminuye debido a la formación de reacciones parásitas (Leonardo, 2002), por otro lado, a mayor THR se favorece la remoción de todos los parámetros, debido a que existen mayor tiempo de contacto de los radicales $HO\cdot$ y el contaminante, alcanzando un 98.8 % de remoción de color, 81.7% de colorante y 99% de DQO.



a)



b)



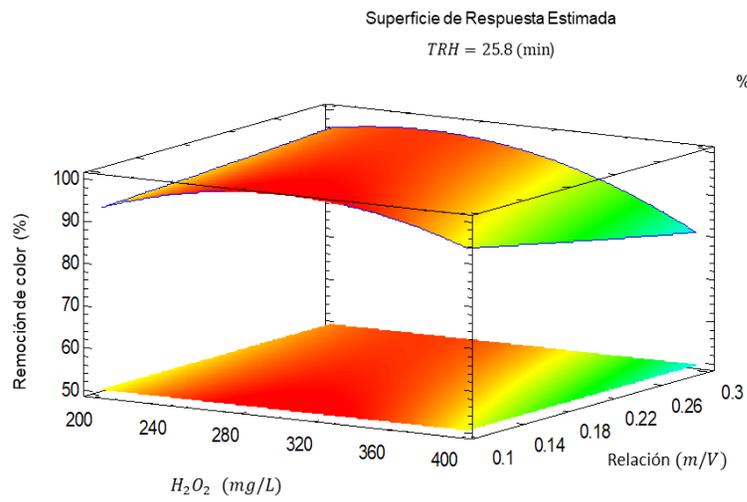
c)

Figura 14 Efecto del H_2O_2 y TRH

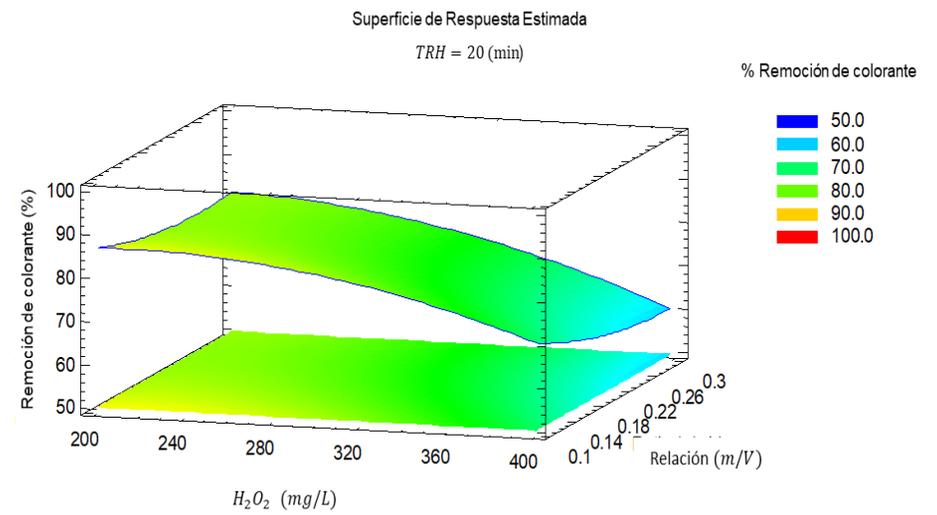
5.3.2 Efecto del TRH y relación m/V

La Figura 15 muestra el efecto del TRH y la relación m/V sobre las eficiencias de remoción en cuanto a: a) color, b) colorante y c) DQO. La máxima eficiencia de remoción se obtuvo con un TRH de 20 min y la relación m/V más baja de 0.1.

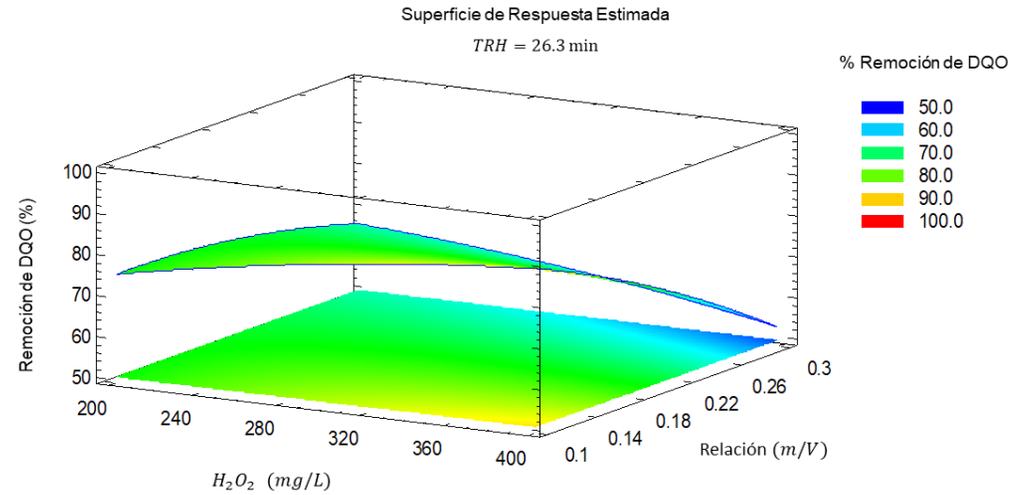
Al aumentar el TRH y la relación m/V las eficiencias decaen hasta un 75%, esto puede deberse al incremento de la concentración del catalizador (hierro) a tiempos más largos y relaciones m/V más altas promoviendo la generación de complejos e incrementando la coloración.



a)



b)

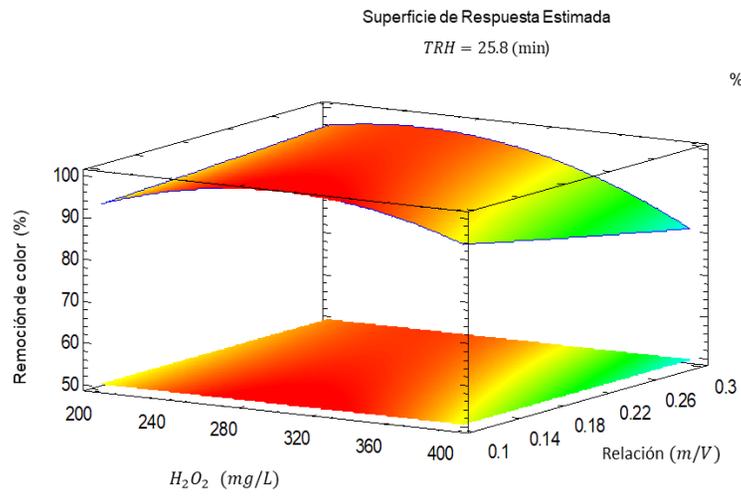


c)

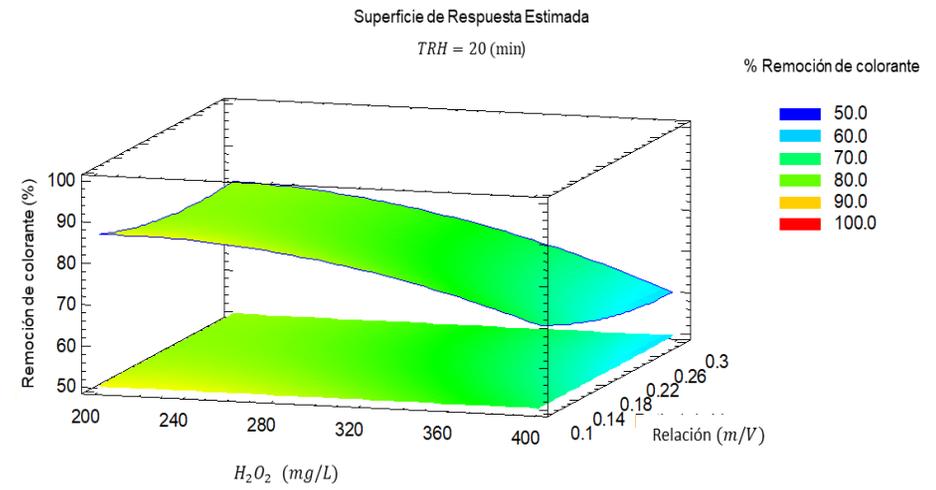
Figura 15 Efecto del THR y relación m/V

5.3.3 Efecto del H_2O_2 y relación m/V

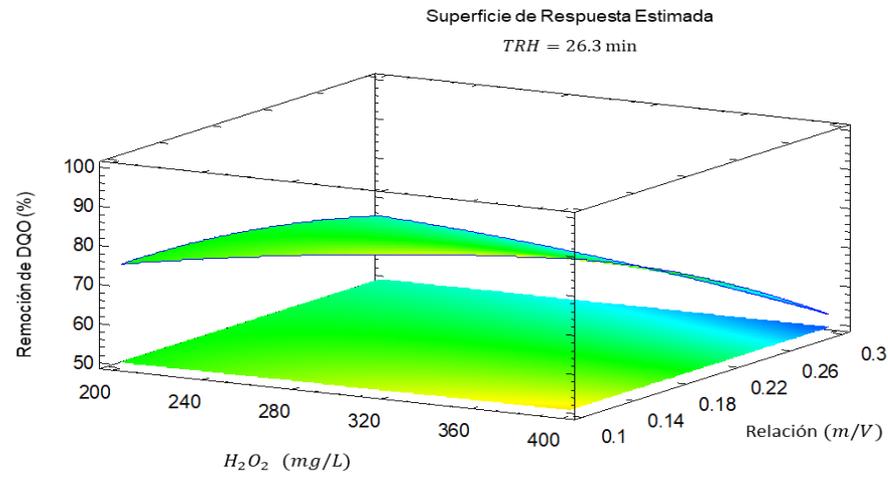
La Figura 16 representa el efecto del H_2O_2 y relación m/V sobre a) color, b) colorante y c) DQO. Se observa que a mayor concentración de H_2O_2 (280-300 mg/L) y a menor relación m/V (0.1) obteniendo eficiencias de hasta un 95.5% de remoción de color, 81.7% y 89% de colorante y DQO, respectivamente.



a)



b)



c)

Figura 16 Efecto del H_2O_2 y relación m/V

5.3.4 Pruebas de máximo ascenso

Con la finalidad de determinar si es factible alcanzar una máxima eficiencia de remoción se determinaron las condiciones de máximo ascenso en el programa STATGRAPHICS® para cada una de las variables de respuesta.

El modelo Box-Benhken utilizado para este proyecto tuvo una R^2 de 0.63 para color, de acuerdo con el programa STATGRAPHICS®, para alcanzar una eficiencia máxima del 99.9% se requieren las siguientes condiciones reportadas en la Tabla 16.

Tabla 16 Condiciones óptimas de remoción de color.

Factor	Óptimo
H_2O_2 <i>mg/L</i>	313.79
TRH <i>min</i>	25.80
Relación <i>m/V</i>	0.13

Para la remoción de colorante se tuvo una R^2 de 0.69 y el análisis realizado con el software STATGRAPHICS® mostró que las condiciones óptimas para alcanzar un valor máximo de 85.51% de remoción de colorante se reportan en la Tabla 17.

Tabla 17 Condiciones óptimas de remoción de colorante

Factor	Óptimo
H_2O_2 <i>mg/L</i>	219.15
TRH <i>min</i>	20.0
Relación <i>m/V</i>	0.12

Con respecto a la DQO, las condiciones óptimas para alcanzar un valor máximo de 88.5% de remoción de DQO se muestran en la Tabla 18. El valor de R^2 de 0.49 para la remoción de DQO.

Tabla 18 Condiciones óptimas de remoción de DQO.

Factor	Óptimo
H_2O_2 <i>mg/L</i>	400
TRH <i>min</i>	26.3
Relación <i>m/V</i>	0.1

La turbidez aumenta debido al incremento de sólidos suspendidos y disueltos derivados de la oxidación del colorante en compuestos más simples. Las condiciones óptimas para la disminución de turbidez hasta 1.47 *NTU* se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19 Condiciones óptimas para turbidez.

Factor	Óptimo
H_2O_2 <i>mg/L</i>	200
TRH <i>min</i>	20
Relación <i>m/V</i>	0.19

5.3.5 Cinética de la reacción

La cinética de la reacción se llevó a cabo a las condiciones óptimas, con un THR de 20 min, concentración de 219.15 *mg/L* de H_2O_2 y una relación de 0.1 *m/V*.

La Tabla 20 muestra los resultados obtenidos a lo largo de la cinética de la reacción.

Tabla 20 Cinética de la reacción

Tiempo <i>min</i>	Color <i>Pt – Co</i>	DQO <i>mg/L de O₂</i>	Colorante <i>mg/L</i>	Turbidez <i>NTU</i>
0	1650	270.63	48.71	7
4	548	150.63	37.83	8
8	279	111.46	29.19	13
12	219	107.71	29.41	19
16	110	83.96	19.22	23
20	119	50.63	16.32	28
%	93.0	81.3	66.0	-

La Figura 17 muestra la cinética de remoción de a) color, b) colorante, c) DQO y d) turbidez, a las condiciones óptimas de remoción de colorante.

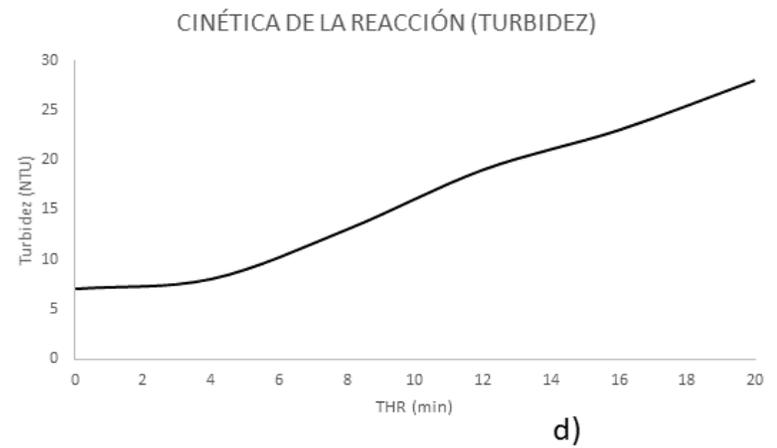
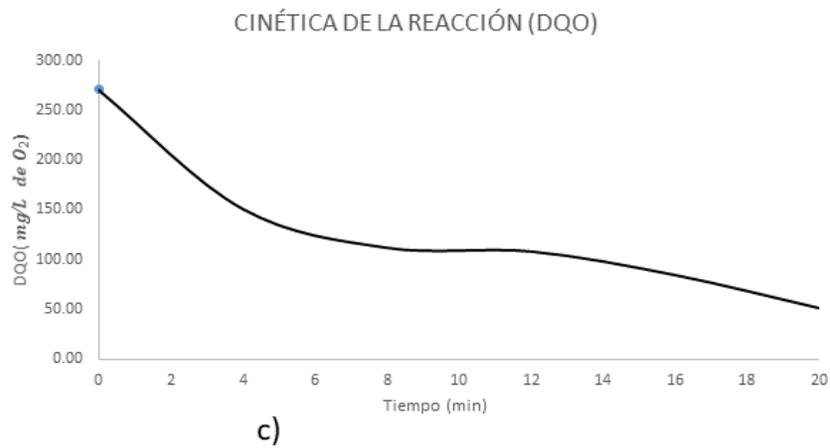
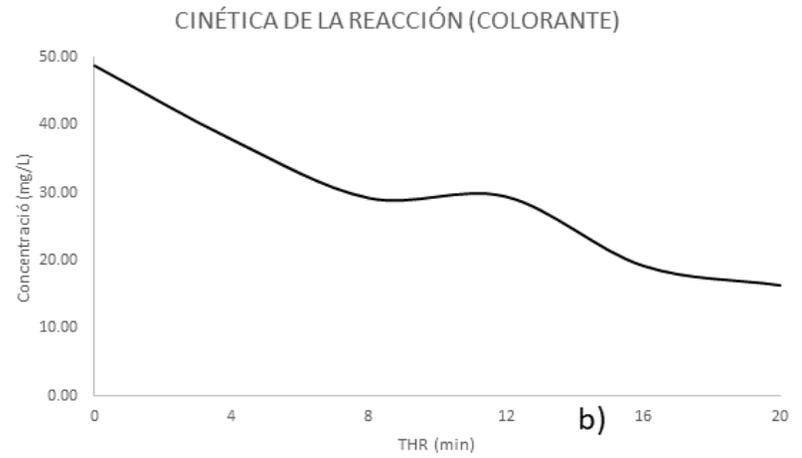
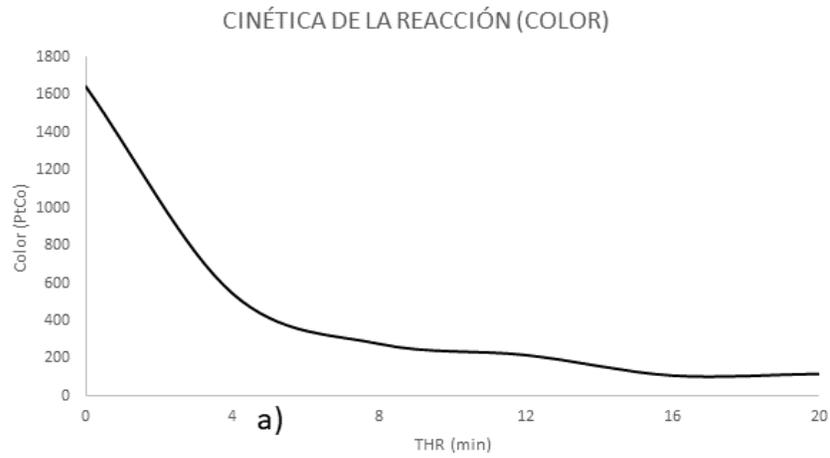


Figura 17 Cinética de la reacción. a) Color b) Colorante c) DQO y d) Turbidez.

En la cinética de color se observa una eficiencia máxima de 93.0%, con una constante cinética de segundo orden de 4×10^{-4} ($1/U Pt - Co \text{ min}$) y una R^2 de 0.92; para la cinética de colorante se tiene una constante de primer orden con un valor de 0.053 (min^{-1}) y una R^2 de 0.96 con una eficiencia de 81.3%.

La cinética de DQO muestra una eficiencia máxima de 66% con una constante cinética de primer orden de 0.073 (min^{-1}) y un valor para de R^2 0.93, en el caso de la turbidez se tiene una constante cinética de primer orden con un valor de -0.075 (min^{-1}), debido a que incrementa la turbidez respecto al tiempo y una R^2 de 0.97 (Tabla 21).

Tabla 21 Constantes cinéticas.

Parámetro	Orden 1		Orden 2	
	K_1 min^{-1}	R^2	K_2	R^2
Color	0.13	0.90	4×10^{-4} $1/UPtCo \text{ min}$	0.92
Colorante	0.053	0.96	0.002 $L/mg \text{ min}$	0.93
DQO	0.073	0.93	7×10^{-4} $L/mg \text{ min}$	0.88
Turbidez	-0.075	0.97	0.006 $1/NTU \text{ min}$	0.92

En conclusión, la cinética de reacción del colorante AR se ajusta a una cinética de orden uno ya que los valores de los coeficientes de correlación son mayores que en el orden 2.

5.3.6 Efecto de la concentración inicial

Se evaluó el efecto de las concentraciones iniciales de 50, 30 y 10 (mg/L).

La concentración intermedia de 30 mg/L promueve mayores eficiencias de remoción de color 94.8%, colorante 30.97% y DQO 93%.

Esto demuestra activamente que a bajas concentraciones el colorante se dispersa disminuyendo la velocidad y la eficiencia de remoción y que, a mayor concentración del colorante, probablemente el H_2O_2 limite el incremento en el porcentaje de remoción (Tabla 22).

Tabla 22 Efecto de la concentración.

Concentración AR mg/L	Remoción de color %	Remoción de colorante %	Remoción de DQO %	Turbidez Final NTU
50	92.79	66.49	81.29	28
30	94.847	30.970	93.186	7
10	83.143	20.791	22.343	4

5.3.7 Fotólisis

El experimento se corrió en presencia de luz solar y en ausencia de H_2O_2 y catalizador a 50 mg/L de concentración del colorante.

A continuación; la Tabla 23 muestra los resultados obtenidos, observándose que el H_2O_2 y catalizador si influyen en la remoción de colorante.

Tabla 23 Fotólisis del colorante

Remoción de color	Remoción de colorante	Remoción de DQO	Turbidez Final
%			NTU
37.45	4.95	27.41	30

La radiación que se registró durante este experimento fue:

A. UV-A: $43.6 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

B. UV-B: $45.4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

5.3.8 Efecto del H₂O₂

Se analizó el efecto del H₂O₂ con UV y sin catalizador a una concentración de 50 mg/L de AR.

Los resultados se muestran en la Tabla 24, indicando que el efecto del H₂O₂ es importante en la remoción de colorante.

Tabla 24 Peróxido de Hidrógeno

Remoción de color	Remoción de colorante	Remoción de DQO	Turbidez Final
%			<i>NTU</i>
33.58	28.98	36.64	34

La radiación que se registró durante este experimento fue:

A. UV-A: $39.6 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

B. UV-B: $41.2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

5.3.9 Efecto del catalizador

El experimento fue realizado sin H₂O₂, con radiación UV y a una concentración de 50 mg/L de AR; los resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25 Catalizador

Remoción de color	Remoción de colorante	Remoción de DQO	Turbidez Final
%			<i>NTU</i>
35.39	22.88	4.31	18

La radiación que se registró durante este experimento fue:

A. UV-A: $53.7 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

B. UV-B: $55.7 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

5.3.10 Sin radiación UV

Las condiciones para este experimento fueron con catalizador y H_2O_2 , en ausencia de UV solar y a una concentración de colorante de 50 mg/L .

De acuerdo con las condiciones óptimas y en presencia de luz UV se alcanzaron eficiencias de 97.2% de remoción de color, 99% de remoción de DQO y 79.3% para remoción colorante, en ausencia de luz UV se obtuvieron menores eficiencias de remoción con lo que se demuestra que la radiación UV tiene un efecto significativo en el proceso.

La Tabla 26 muestra los resultados obtenidos en ausencia de radiación UV.

Tabla 26 Sin radiación UV

Remoción de color	Remoción de colorante	Remoción de DQO	Turbidez Final
%			<i>NTU</i>
77.52	25.43	40.49	2

5.3.11. Calidad del agua tratada

En la tabla 27 se muestran las características fisicoquímicas del AR después del tratamiento. Se observa que existe una mayor remoción de la DQO (82.5%), 79.1 % de color y 61.8 % de colorante.

Tabla 27. Características fisicoquímicas del AR antes y después del tratamiento.

Parámetro	Unidad	Muestra cruda	±	Muestra tratada	±	% remoción
DQO	mg/L	287.8	1.83 85	50.5	7.7 8	82.5
Color	Pt-Co	1715.5	64.3	359	4.2 4	79.1
Colorante	mg/L	52.7	0.21	20.13	0.0 4	61.8
Turbidez	NTU	0.3	0.6	21.7	1.2	-
Potencial redox	mV	441.0	8.5	392.5	2.1	-
pH		5.4	0.1	4.0	0.2	-
SDT	mg/L	33.9	0.1	76.1	0.3	-
Conductividad eléctrica	µS/cm	405.5	0.7	90.9	0.5	77.6
Fe ²⁺	mg/L	0	0	1.73	0.0 9	-
Radiación	W/m ²	0	0	51.8	1.4	-
Energía acumulada	kJ/L	0	0	596.7	16. 3	-
Ration H ₂ O ₂ :Fe ²⁺		-	-	126.6	-	-

5.3.12. Espectro infrarrojo del amarillo remazol

En la figura 18 a y b, se muestra el espectro infrarrojo del amarillo remazol antes y después del tratamiento, donde se puede observar que se llevó a cabo la degradación completa del AR.

En la figura 18a se muestra el espectro AR, picos en 3455 cm⁻¹ que representa la presencia de estiramiento N-H, 1622 cm⁻¹ N = N (enlace azoico), 1547 cm⁻¹ N = O estiramiento, 1413 cm⁻¹ deformación CH₃, 1186 cm⁻¹ S = O estiramiento simétrico ácido sulfónico, 1135 cm⁻¹ estiramiento C-O, 1057 cm⁻¹ estiramiento C-N, 887 cm⁻¹ estiramiento C-H, 745 cm⁻¹ estiramiento C-Cl (grupo cloro), 685 cm⁻¹ la deformación C-H y 617 cm⁻¹ grupo azufre de estiramiento C-S.

En el espectro de AR tratado los picos desaparecen observándose una banda ancha (figura 18b).

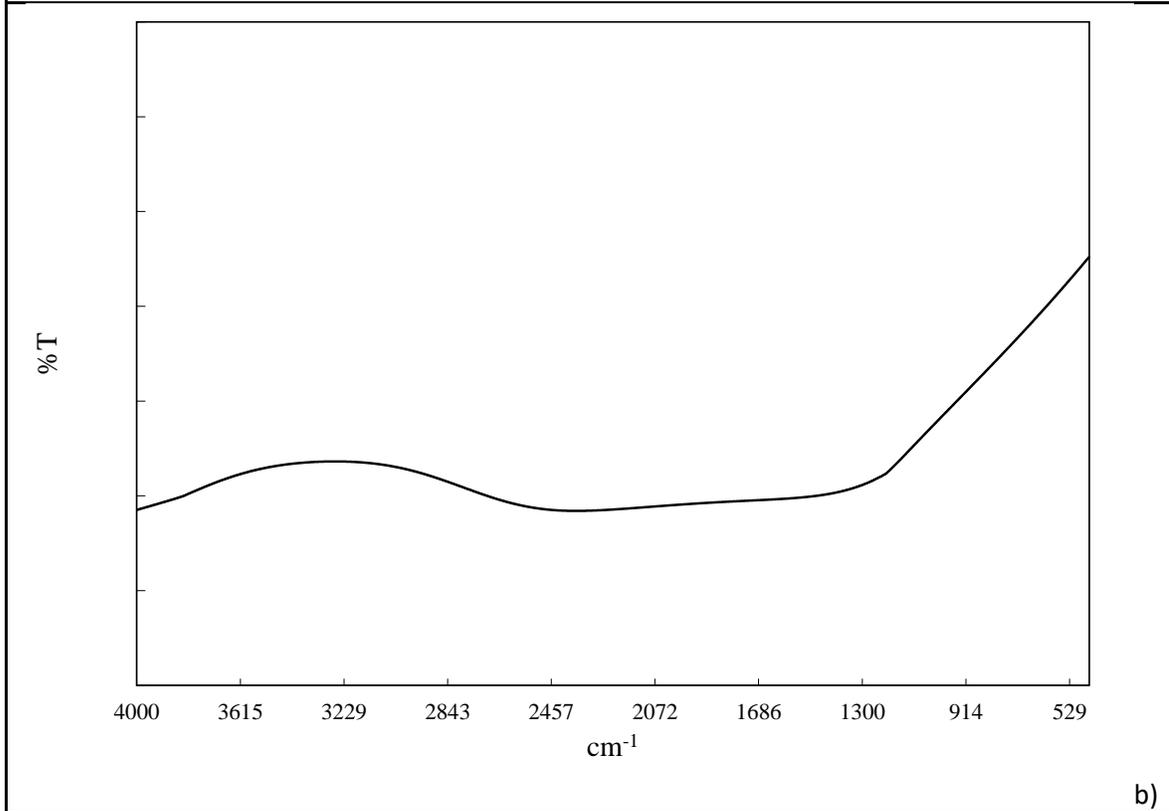
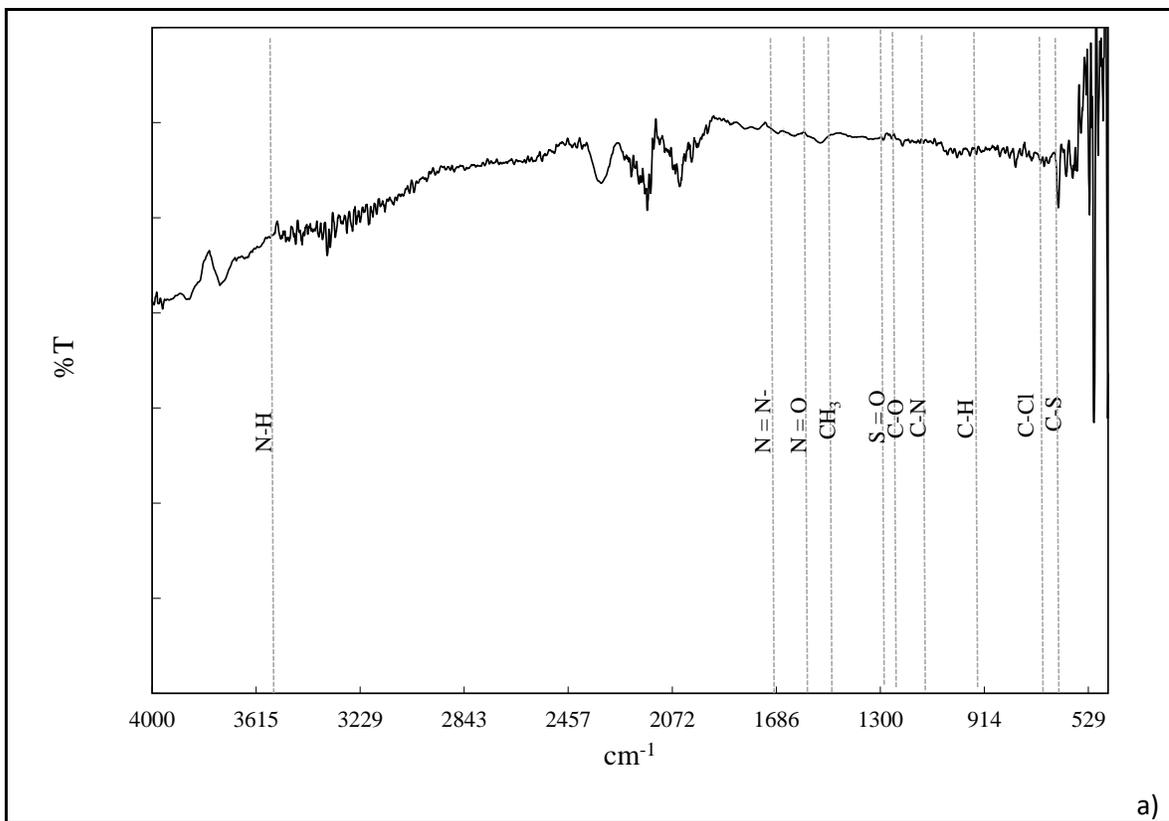


Figura 18 a) Espectro del AR en solución acuosa, b) Espectro de AR después del tratamiento.

6 CONCLUSIONES

De acuerdo con la bibliografía consultada, el colorante AR es tóxico, no biodegradable y altamente persistente en el agua residual, debido a esto, se buscan soluciones sustentables e innovadoras para que el agua de descarga cumpla con las normas oficiales establecidas.

La reacción Fenton es un PAO eficiente para la remoción del AR, sin embargo, el uso de un concentrador solar incrementa la eficiencia de remoción; este proceso resulta ser una opción factible y sustentable para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil.

Se realizó un diseño experimental Box-Behnken con 16 experimentos de los cuales el experimento número 2 con $300 \text{ mg/L } H_2O_2$, THR de 30 min y una relación m/V de 0.2 fue el que mostró mayores eficiencias de remoción de color 97.2% ,99% y 79.3% de remoción de DQO y colorante, respectivamente.

Se observó que las mayores eficiencias se obtienen a menor cantidad de catalizador y THR, debido a que el catalizador de hierro al oxidarse forma hidróxidos los cuales aportan color, así como turbidez a la muestra final del tratamiento.

Una adecuada dosificación y concentración de H_2O_2 también es fundamental para obtener buenas eficiencias, ya que permite oxidar de una manera más eficiente el colorante.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

1. A. Othmani y A. Kesraoui (2017) 'The alternating and direct current effect on the elimination of cationic and anionic dye from aqueous solutions by electrocoagulation y coagulation flocculation', Euro-Mediterranean J. Environ. Integr'.1–12.
2. AEMet (2014) 'La Radiación solar'.148–162.
3. Ajbar, W. (2018) 'Sistema de concentradores solares de canal parabólico para la generación de calor'. 120.
4. Akti, F. (2018) 'Photocatalytic degradation of remazol yellow using polyaniline–doped tin oxide hybrid photocatalysts with diatomite support'. 931–939.
5. Al-Momani, F. (2002) 'Biodegradability enhancement of textile dyes y textile wastewater by VUV photolysis'. 191–197.
6. Alfaro, R., Belmont, E. y González, M. (2009) 'HAWC: un nuevo observatorio de rayos gamma en México'. 13.
7. Ayuntamiento B.C.S (2013) 'Reglamento del uso de la red de alcantarillado del municipio de los cabos, baja california sur' .23.
8. Bachiller, R. (2009) 'El Sol: Nuestra estrella, nuestra energía'.371–382.
9. Bakaraki Turan, N., Sari Erkan, H. y Onkal Engin, G. (2021) 'Highlighting the cathodic contribution of an electrooxidation post-treatment study on decolorization of textile wastewater effluent pre-treated with a lab-scale moving bed-membrane bioreactor'.123-134.
10. Boran, F., Birhanli, E. y Özbey, E. (2019) 'Comparison of indigo carmine decolorization by *Pseudomonas aeruginosa* and crude laccase enzyme from *Funalia trogii*'. 37–46.
11. Budikania, T. S. et al. (2019) 'Decolorization of azo dyes using contact glow discharge electrolysis'.45.
12. Buitrago, R. (2005) 'La Energía del Sol'. 8–9.
13. Burgos, E. y Espinosa, A. (1996) 'Reglamento Para El Control De Las

- Descargas De Aguas Residuales a Los Sistemas De Alcantarillado Del Estado De Querétaro'. p. 11.
14. Campos, T. (2015) 'Limpiar aguas residuales'.30-67-
 15. Carbajal-Palacios, P. (2017) 'Chemical oxygen demand test'. 26.
 16. Carbajo, J. (2013) 'Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂'.1–277.
 17. Castañeda, J. (2009) 'Sistema Electrocoagulación- Sorción En Continuo Para Remoción De Colorantes, Verde Malaquita Y Remazol Amarillo En Solución Acuosa'. 90.
 18. ChemicalLook (2008) 'Remazol Amarillo'.20-34.
 19. Clocchiatti, A. y Catelan, M. (2018) 'Transferencia radiativa', Radiación y materia en astrofísica'.27–56.
 20. CONAMA (2011) 'Efluentes'. 8.
 21. Couto, C., Marques, L. y Balmant, J. (2018) 'Hybrid MF and membrane bioreactor process applied towards water y indigo reuse from denim textile wastewater'.725–738.
 22. Cruz, E. y Corona, H. (2013) 'Métodos Métodos de remoción y degradación de antibióticos en medio acuoso'.23-54.
 23. Cruz, G., Julcour, C. y Jáuregui, U. (2017) 'El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación State of the art y perspectives of pesticides degradation by advanced oxidation processes Resumen'.492–516.
 24. Doménech, X., Jardim, W. F. y Litter, M. (2016) 'Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes'.7–34.
 25. Escobar, J. (2019) Recursos Naturales E Infraestructura La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar'.2.
 26. Farhan Hanafi, M. y Sapawe, N. (2020) 'A review on the water problem associate with organic pollutants derived from phenol, methyl orange'.141-150.
 27. Fermin, G. (2018) ¿Qué es la fotólisis? Available at:

<https://www.lifeder.com/fotolisis/>.

28. Flores, C. y López, L. (2020) 'Degradación de Amarillo-5 en medio acuoso usando hidrotalcitas como catalizadores Fenton heterogéneos'.250–257.
29. Fontal, B. (2015) 'El espectro electromagnético y sus aplicaciones'.1–15.
30. García, J. C. (2014) Procesos fenton y foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico'.27-35.
31. García, R. (2021) Energía solar: todo lo que necesitas saber. Available at: <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo/energia-solar/>.
32. Gazette (1988) 'Regulation for Water Pollution Control'.443.
33. González, J. P. (2018) Diseño de un concentrador solar compacto de foco fijo de alta eficiencia para aplicaciones de alta temperatura'.12-17.
34. Hernández, Y. (2012) Diseño de un concentrador solar de geometría paraboidal portátil. Available at: http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11610.pdf.
35. Ibarra, B. y Rojas, F. (2012) Diseño y construcción de un prototipo de colector solar'.23-34.
36. Juan, R. S. (2013) 'La química de los colorantes en los alimentos'. 234–246.
37. Kokkinos, P., Venieri, D. y Mantzavinos, D. (2021) 'Advanced Oxidation Processes for Water y Wastewater Viral Disinfection'.54-56.
38. Lamaison, R. M. (2016) 'El Potencial de la Radiación Solar'.26–54.
39. Leonardo, J. (2002) 'Caracterización de una celda electrolítica de membrana, para la producción de cloro y potasa'.1–118.
40. Marcano, D. (2018) Introducción a la Química de los Colorantes, Colección Divulgación Científica y Tecnológica'.13-14.
41. Martínez, L. (2018) Rayos X, historia y aplicaciones, Divulgación. Available at: <https://nusgrem.es/rayos-x-historia-y-aplicaciones/>.
42. Martins, L. R. et al. (2015) 'Application of cellulose-immobilized riboflavin as a redox mediator for anaerobic degradation of a model azo dye Remazol Golden Yellow RNL'.454–462.
43. Mózo, B. S. (2017) 'Colector Térmico Fotovoltaico Interconectado a la Red', Journal of Chemical Information y Modeling'.1689–1699.
44. Nandwani, S. (2005) 'Energía solar. Conceptos básicos y su utilización'.1–

- 26.
45. Núñez, L. (2014) 'Nociones básicas de la luz', Comunicación audiovisual'.1–6.
46. Océane Bidault (2018) ¿Qué es la luz ultravioleta y para qué sirve? Available at: <https://www.waterlogic.es/blog/que-es-la-luz-ultravioleta/>.
47. Orozco, K. (2018) 'Biodegradación de colorante azul directo por consorcios bacterianos aislados de un efluente textil de Lima, Perú'. Available at: http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/hyle/20.500.12672/8807/Orozco_rk.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
48. Ozbay, N. y Yargic, A. S. (2015) 'Factorial experimental design for Remazol Yellow dye sorption using apple pulp/apple pulp carbon-titanium dioxide co-sorbent'.333–343.
49. Pérez, J. y Buitrón, G. (2010) 'Tratamiento de colorantes tipo azo por medio de un proceso fotocatalítico'. 22–35.
50. Pey, C. (2010) 'Aplicación de procesos de oxidación avanzada para tratamiento y reutilización de efluentes textiles.', British Medical Journal'.198.
51. Piña, S. (2007) 'Decoloración biológica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio'.98.
52. Planas, O. (2019) ¿Qué son los rayos gama?, Energía Nuclear. Available at: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/radioactividad/rayos-gamma>.
53. Rodríguez, H. (2017) 'Las aguas residuales y sus efectos contaminantes '.25-29.
54. Sáenz, M. A. (2019) 'Metodología de espectroscopía infrarroja como apoyo para la determinación de grupos funcionales en hidrocarburos'.5-18.
55. Salazar, R. et al. (2019) 'Treatment of industrial textile wastewater by the solar photoelectro-Fenton process'.82–91.
56. Sánchez Martínez, D. V. (2020) 'Una comparativa de la legislación de aguas residuales en México y España.'30-35.
57. SEMANART (2022) Semarnat actualiza NOM 001, Semarnat actualiza NOM 001 sobre descargas de aguas residuales, tras 25 años de

- parálisis Semarnat. (2021).15-21.
58. Tobón, A. y Peñaloza, A. (2014) 'Evaluación de la degradación del colorante amarillo reactivo.'12-13.
59. Treviño, A. P., Martínez, V. y Solache, M. (2013) 'Removal of remazol yellow from aqueous solutions by unmodified y stabilized iron modified clay'.23-34.
60. Truong, M. (2015) 'Normativa Vietnam'. Available at: <https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Thong-tu-13-2015-TT-BTNMT>.
61. Vences-Benitez, J. . et al. (2017) 'Electrooxidation Performance of Aqueous Solution of Nonylphenol Decaethoxylate y Denim Wastewater', Water. Air. Soil Pollut.14-16.

CAPÍTULO 8 ANEXOS

8.1 Radiación UV- A

Experimento	UVA W/m^2	UVA kJ/L
1	44.9	185.72
2	48.3	199.79
3	47.3	195.65
4	48.4	200.20
5	47.3	130.43
6	38.6	106.44
7	53.2	293.41
8	52.1	287.34
9	48.2	199.37
10	51.2	211.78
11	38.8	160.49
12	45.4	187.79
13	50.8	140.09
14	44.8	247.08
15	50.6	139.53
16	47.7	263.08

8.2 Cálculo de irradiación

Experimento	Fecha	Hora	G_o <i>W/m²</i>	Ho <i>MJ/m²</i>
1	25-ene	11:43	1781.1018	19.9147
2	25-ene	12:13	1781.1018	19.9147
3	25-ene	12:43	1781.1018	19.9147
4	25-ene	13:13	1781.1018	19.9147
5	25-ene	13:40	1781.1018	19.9147
6	15-feb	10:41	1697.7695	26.7733
7	15-feb	11:45	1697.7695	26.7733
8	15-feb	12:38	1697.7695	26.7733
9	22-feb	11:12	1659.6065	29.2702
10	22-feb	11:55	1659.6065	29.2702
11	22-feb	10:35	1659.6065	29.2702
12	22-feb	11:23	1659.6065	29.2702
13	01-mar	12:25	1617.1129	31.7348
4	01-mar	13:15	1617.1129	31.7348
15	01-mar	12:00	1617.1129	31.7348
16	01-mar	12:50	1617.1129	31.7348