



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ESTUDIO DE LA FOTODEGRADACIÓN DE
ROJO CARMÍN A ALTA
TEMPERATURA MEDIANTE UN SISTEMA
ACOPLADO DE CALENTAMIENTO-
DESTILACIÓN SOLAR”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

INGENIERA EVA CARINA TARANGO BRITO

DIRIGIDA POR:

DR. CARLOS EDUARDO BARRERA DÍAZ

DRA. LILIANA IVETTE ÁVILA CÓRDOBA

DRA. PATRICIA BALDERAS HERNÁNDEZ



TOLUCA, MÉXICO, JULIO DE 2022

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM bajo la dirección del Dr. Carlos Barrera Díaz, de la Dra. Liliana Ivette Ávila Córdoba y la Dra. Patricia Balderas Hernández.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título: “Estudio de la fotodegradación de rojo carmín a alta temperatura mediante un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar” con número de registro MACIAS-1121 ante la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA).

El proyecto se inscribe en la línea de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC): Prevención, Control y Efectos de la Contaminación Ambiental, del área de Calidad Ambiental del Programa de Posgrado en Ciencias Ambientales en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

CONTENIDO

RELACIÓN DE FIGURAS	10
RELACIÓN DE TABLAS	13
RELACIÓN DE GRÁFICAS.....	15
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	20
1.1 Colorantes como contaminantes hídricos	21
1.1.1 Tipos de colorantes	22
1.1.1.1 Colorantes Naturales.....	22
1.1.1.2 Colorantes Sintéticos	27
1.1.1.2.1 Contaminación por colorantes artificiales	30
1.2 Rojo Carmín	31
1.2.1 Propiedades fisicoquímicas	32
1.2.2 Efectos ambientales	32
1.2.3 Técnicas convencionales de degradación de colorantes azoicos	33
1.3 Destilación solar.....	36
1.3.1 Tipos de destiladores solares.....	38
1.3.2 Descontaminación de aguas residuales por medio de la destilación solar.....	49
1.4 Interacción colorante tipo azoico- luz solar.....	52
1.4.1 Fotocatalizadores	54
1.4.1.1 Óxido de zinc	55

1.5 Técnicas de caracterización para la determinación de foto-degradación de los colorantes	58
1.5.1 Espectrofotometría UV- Vis	58
1.5.2 Espectroscopía IR	59
JUSTIFICACIÓN	61
OBJETIVO GENERAL	63
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	64
HIPÓTESIS	65
CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL	66
2.1 Materiales y métodos	67
2.1.1 Materiales, equipo y reactivos	67
2.2 Metodología	68
2.2.1 Preparación del agua residual sintética con colorante rojo carmín	68
2.2.2 Construcción del destilador solar de una sola pendiente	68
2.2.3 Evaluación de temperatura y eficiencia	70
2.2.3.1 En el destilador	70
2.2.3.2 En el calentador solar parabólico	71
2.2.3.3 En el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar	72
2.2.4 Optimización de parámetros.....	74
2.2.5 Estudio de la foto-degradación del colorante rojo carmín a partir del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar	74
2.2.6 Evaluación de la calidad del agua	75
2.2.6.1 pH	76
2.2.6.2 Conductividad.....	76
2.2.6.3 DQO	76
2.2.6.4 Turbiedad	77
2.2.6.5 Sólidos totales	77

2.2.6.6 Espectrofotometría UV-VIS	78
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
3.1 Evaluación de temperatura y eficiencia	80
3.1.1 En el destilador.....	80
3.1.2 En el calentador solar parabólico	82
3.1.3 En el sistema acoplado de calentamiento y destilación solar	84
3.2 Optimización de los parámetros de operación del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar.....	86
3.3 Caracterización de la placa galvanizada	89
3.3.1 Análisis por XPS.....	89
3.3.2 Análisis por MEB	93
3.4 Análisis de la foto-degradación del colorante rojo carmín en solución acuosa tratada a partir del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar	95
3.4.1 Tratamiento realizador con una modificación de placa galvanizada con tratamiento térmico.....	98
3.4.1.1 Espectrofotometría UV-VIS	98
3.4.1.2 Espectroscopía IR-ATR.....	100
3.4.2 Tratamiento realizador con una modificación de placa galvanizada sin tratamiento térmico.....	101
3.4.2.1 Espectrofotometría UV-VIS	101
3.4.2.2 Espectroscopía IR-ATR.....	103
3.5 Evaluación de la calidad del agua	104
3.5.1 pH	104
3.5.2 Conductividad.....	105
3.5.3 DQO	105
3.5.4 Turbiedad	106
3.5.5 Sólidos totales	107
3.5.6 Espectrofotometría UV-VIS	107
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES.....	109
ANEXOS	112
ANEXO 1. Técnicas de caracterización para la placa galvanizada	113

ANEXO 2. Técnica de caracterización para determinar la calidad el agua residual y destilada tratada	119
ANEXO 3. Normatividad de la Calidad del Agua.....	125
REFERENCIAS.....	133

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura química de la curcumina (Elaboración propia, 2022)	23
Figura 1.2 Estructura química del ácido carmínico (Elaboración propia, 2022)....	23
Figura 1.3 Estructura química de las betacianinas (Elaboración propia, 2022).....	24
Figura 1.4 Estructura química de las betaxantinas (Elaboración propia, 2022)....	24
Figura 1.5 Estructura química de las antocianinas (Elaboración propia, 2022)....	25
Figura 1.6 Estructura química de las clorofilas (Elaboración propia, 2022).....	25
Figura 1.7 Ejemplos de estructuras químicas de los grupos funcionales de los carotenoides (Elaboración propia, 2022).....	26
Figura 1.8 Estructura química de las xantofilas (Elaboración propia, 2022).....	26
Figura 1.9 Estructura química del carbón vegetal, colorante E-153 (García Bello, 2019)	27
Figura 1.10 Estructura química del rojo carmín (Elaboración propia, 2022).....	28
Figura 1.11 Estructura química del amarillo sunset (Elaboración propia, 2022)...	28
Figura 1.12 Estructura química de la tartrazina (Elaboración propia, 2022).....	29
Figura 1.13 Estructura química del ponceau R4 (Elaboración propia, 2022)	29
Figura 1.14 Estructura química de la eritrosina (Elaboración propia, 2022).....	29
Figura 1.15 Estructura química del azul brillante FCP (Elaboración propia, 2022)30	
Figura 1.16 Estructura química del azul indigotina (Elaboración propia, 2022)....	30
Figura 1.17 Estructura química del rojo carmín (Barrera, <i>et al.</i> , 2020)	31
Figura 1.18 Esquema de un destilador solar básico de una sola vertiente (Elaboración propia, 2022)	38
Figura 1.19 Esquema de un destilador solar de dos vertientes (Elaboración propia, 2022)	40

Figura 1.20 Esquema de un destilador solar de invernadero (Elaboración propia, 2022)	41
Figura 1.21 Esquema de un destilador solar de cascada (Elaboración propia, 2022)	42
Figura 1.22 Esquema de un destilador solar esférico de barredera (Elaboración propia, 2022)	43
Figura 1.23 Destilador solar multietapa y sus procesos (CETENMA, 2008)	44
Figura 1.24 Degradación de un colorante al exponerse a una luz ultravioleta (Elaboración propia, 2022)	54
Figura 1.25 Teoría de las bandas para un material semiconductor (Elaboración propia, 2022)	55
Figura 1.26 Esquema del proceso general para la foto-degradación de contaminantes orgánicos por medio de catalizador semiconductor (Elaboración propia, 2022)	56
Figura 2.1 Preparación de la disolución de colorante rojo carmín a una concentración de 25 ppm para el proceso de destilación, (Elaboración propia, 2022)	68
Figura 2.2 Plano estructural del destilador solar de una sola pendiente (Elaboración propia, 2022)	69
Figura 2.3 Ensamble del destilador solar de una sola pendiente (Elaboración propia, 2022)	70
Figura 2.4 Destilador solar simple o de una sola pendiente (Elaboración propia, 2022)	71
Figura 2.5 Calentador solar parabólico previamente diseñado y construido Ramírez, 2020).....	72
Figura 2.6 Sistema acoplado de calentamiento-destilación solar (Elaboración propia, 2022)	73
Figura 3.1 (a) Espectro EDS, (b) Micrografía SEM, de la lámina galvanizada sin tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022).....	93
Figura 3.2 (a) Espectro EDS, (b) Micrografía MEB de la lámina galvanizada con tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022).....	94
Figura 3.3 Muestras colectadas de agua residual con colorante rojo carmín a 25ppm bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar sin placa galvanizada (Elaboración propia, 2022)	96

Figura 3.4 Cinética de fotodegradación del agua residual con colorante rojo carmín a 25ppm bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con placa galvanizada con tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022)	99
Figura 3.5 Muestras colectadas de agua residual con colorante rojo carmín a 25ppm bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con placa galvanizada sin tratamiento térmico. (Elaboración propia, 2022)	102

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de colorantes naturales (Elaboración propia, 2022)	23
Tabla 2. Colorantes artificiales con mayor uso en México (Martínez, et al., 2015) 28	
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del rojo carmín (Parra, <i>et al.</i> , 2008)	32
Tabla 4. Longitudes de onda de diferentes tipos de radiación electromagnética (Díaz <i>et al.</i> , 2020)	59
Tabla 5. Eficiencia en el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar, variando el volumen de agua destilada de laboratorio inicial (Elaboración propia, 2022).	87
Tabla 6. Eficiencia en el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar, variando el volumen de una disolución de rojo carmín a 25 ppm (Elaboración propia, 2022).	87
Tabla 7. Resultados obtenidos de la evaluación del pH (Elaboración propia, 2022)104	
Tabla 8 Resultados obtenidos de la evaluación de la conductividad (Elaboración propia, 2022)	105
Tabla 9. Resultados obtenidos de la evaluación de la DQO conductividad (Elaboración propia, 2022)	106
Tabla 10. Resultados obtenidos de la evaluación de la turbiedad (Elaboración propia, 2022)	106
Tabla 11. Resultados obtenidos de la evaluación de los sólidos totales (Elaboración propia, 2022)	107
Tabla 12. Absorciones para grupos funcionales representativos (Rubinson K.A., Rubinson J.F., “Análisis Instrumental”, Ed. Pearson Educación, 2000)	116
Tabla 13. Límites permisibles de características bacteriológicas (NOM-127-SSA1-1994	125
Tabla 14. Límites permisibles de características físicas y organolépticas (NOM-127-SSA1-1994).....	126

Tabla 15 Límites permisibles de características químicas (NOM-127-SSA1-1994)	127
Tabla 16 Cumplimiento gradual (NOM-127-SSA1-1994).....	129
Tabla 17. Límites permisibles de características físicas radiactivas (NOM-127-SSA1-1994).....	130
Tabla 18 Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997)	130
Tabla 19 Límites máximos permisibles establecidos para promedio diario y mensual según corresponda al tipo de cuerpo receptor (NOM-001-SEMARNAT-2021)	131
Tabla 20. Límites máximos permisibles para metales y cianuros (NOM-001-SEMARNAT-2021)	132

RELACIÓN DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Determinación de temperatura en el destilador solar con agua destilada (Elaboración propia, 2022)	81
Gráfica 2. Determinación de temperatura en el destilador solar con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm (Elaboración propia, 2022).....	82
Gráfica 3. Determinación de temperatura en el calentador solar parabólico con agua destilada de laboratorio (Elaboración propia, 2022)	83
Gráfica 4. Determinación de temperatura en el calentador solar parabólico con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm (Elaboración propia, 2022) ...	84
Gráfica 5. Determinación de temperatura en el destilador solar utilizando agua destilada de laboratorio a partir de un precalentamiento de agua por medio de un calentador solar parabólico (Elaboración propia, 2022)	85
Gráfica 6. Determinación de temperatura en el destilador solar con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm a partir de un precalentamiento de agua por medio de un calentador solar parabólico (Elaboración propia, 2022).....	86
Gráfica 7. Evaluación de la eficiencia en un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar variando el volumen inicial de agua destilada de laboratorio en el proceso (Elaboración propia, 2022)	88
Gráfica 8. Evaluación de la eficiencia en un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar variando el volumen inicial de una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm (Elaboración propia, 2022)	89
Gráfica 9. Espectro general de XPS para la placa galvanizada con y sin tratamiento térmico. (a) Zinc (Zn), (b) Oxígeno (O), (c) Carbono (C) (Elaboración propia, 2022)	91
Gráfica 10. Región deconvolucionada de C 1s para la lámina galvanizada a) sin tratamiento térmico y b) con tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022)	92
Gráfica 11. Región deconvolucionada de O 1s para la lámina galvanizada a) sin tratamiento térmico y b) con tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022)	92
Gráfica 12. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar sin placa galvanizada. (Elaboración propia, 2022)	96

Gráfica 13. Espectroscopía IR-ATR del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar sin placa galvanizada. (Elaboración propia, 2022)	97
Gráfica 14. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con placa galvanizada con tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022)	99
Gráfica 15. Espectroscopía IR-ATR del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con placa galvanizada con tratamiento térmico (Elaboración propia, 2022)	100
Gráfica 16. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar con placa galvanizada sin tratamiento térmico. (Elaboración propia, 2022)	102
Gráfica 17. Espectroscopía IR-ATR del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar con placa galvanizada sin tratamiento térmico. (Elaboración propia, 2022)	103
Gráfica 18. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual y destilada tratada final por medio de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar con placa galvanizada con tratamiento térmico. (Elaboración propia, 2022)	108

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un tratamiento de agua contaminada con colorante rojo carmín a partir de un sistema acoplado de calentamiento y destilación solar, modificando el destilador con dos placas galvanizadas, con y sin tratamiento térmico con el objetivo de estudiar la fotodegradación del compuesto y mejorar la calidad del agua residual y destilada obtenida al final del proceso. Para ello se realizó la síntesis del rojo carmín a 25 ppm. Posteriormente se evaluó la optimización del sistema, así como la determinación de los parámetros de operación para dicho tratamiento. Una vez obtenido, se realizaron dos procesos: con cada una de las placas, tomando muestras del agua residual cada 30 min durante 2 h para ambas. El estudio de la fotodegradación se realizó por medio de Espectrofotometría UV-Vis donde se observó disminución del color de hasta 26 % utilizando la placa sin tratamiento térmico, mientras que para la placa con tratamiento se anuló el color en un 93%; en la espectroscopía IR-ATR se observaron grupos funcionales del colorante a un intervalo de número de onda de 4000 a 400 cm^{-1} . Para determinar la calidad del agua residual y destilada colectada al final del proceso se tomaron en cuenta los parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad, DQO, turbiedad y sólidos totales tomando en cuenta los fundamentos establecidos en la normatividad mexicana, con el propósito de evaluar los límites máximos permisibles (LMP) expuestos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-127-SSA1-1994. Los resultados indicaron que ambos tipos de agua mejoraran su calidad, mostrando valores inferiores a los LMP para cada uno de los parámetros.

ABSTRACT

In the present work, a treatment of water contaminated with carmine red dye was carried out using a coupled solar heating and distillation system, modifying the distiller with two galvanized plates, with and without heat treatment, with the objective of studying the photodegradation of the compound and improving the quality of the waste and distilled water obtained at the end of the process. For this purpose, the synthesis of carmine red at 25 ppm was carried out. Subsequently, the optimization of the system was evaluated, as well as the determination of the operating parameters for such treatment. Once obtained, two processes were carried out: with each of the plates, taking samples of the wastewater every 30 min for 2 h for both. The study of photodegradation was obtained by UV-Vis spectrophotometry where a decrease in color of up to 26 % was observed using the plate without thermal treatment, while for the plate with treatment the color was annulled by 93 %; in the IR-ATR spectroscopy, functional groups of the dye were observed at wave numbers from 4000 to 400 cm^{-1} . To determine the quality of the wastewater and distilled water collected at the end of the process, the physicochemical parameters of pH, conductivity, COD, turbidity and total solids were taken into account in accordance with Mexican regulations, in order to evaluate the maximum permissible limits (MPL) set forth in NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-003-SEMARNAT-1997 and NOM-127-SSA1-1994. The results indicated that both types of water improved their quality, showing values below the MPLs for each of the parameters.

INTRODUCCIÓN

En busca de mejorar la calidad del agua contaminada con colorante a partir de un tratamiento sustentable y amigable con el ambiente, se propone un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con dos tipos de fotocatalizadores: una placa galvanizada con y sin tratamiento térmico para obtener óxido de zinc (ZnO) y fotodegradar el compuesto contaminante. De esta manera, se obtiene un agua residual de mejor calidad que puede vertirse a los ríos sin causar daños al ecosistema y al mismo tiempo adquirir por medio de la destilación, agua potable para su reutilización en actividades antropogénicas.

Bajo este contexto, el objetivo del trabajo consistió en evaluar el porcentaje de degradación del rojo carmín mediante la implementación del sistema acoplado, para mejorar la calidad del agua contaminada por dicho colorante.

En el Capítulo 1 se detalla qué son y tipos de colorantes, especificando las propiedades fisicoquímicas del rojo carmín, así como los efectos ambientales y las técnicas convencionales de degradación. Posteriormente, se presentan los tipos y características de los destiladores solares, además de mencionar su auge en el uso como tratamiento para descontaminación de aguas residuales. Conjuntamente, se hace una revisión general sobre los fotocatalizadores, tal como el ZnO, para la degradación de colorantes.

En el Capítulo 2 se describe la metodología experimental que incluye las condiciones de síntesis del colorante, el diseño y construcción del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar, así como la optimización de parámetros de operación. Posteriormente, la modificación de este a partir de las placas galvanizadas con y sin tratamiento térmico y la evaluación de los parámetros de calidad del agua residual y destilada colectada al final del tratamiento.

En el Capítulo 4, se muestran los resultados y el análisis de la optimización del sistema, así como, la caracterización de la foto-degradación del colorante y la de la calidad del agua. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO I

MARCO TÉORICO

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Colorantes como contaminantes hídricos

Los colorantes artificiales son sustancias con fórmulas muy diferentes entre sí, por lo que es difícil encontrar una clasificación adecuada, sin embargo, es posible catalogarlos de acuerdo con su estructura química como: azoicos, xanténicos, quinoleínicos, trifenilmetánicos, indigoides, ftalocianínicos, etc.

La contaminación del agua por colorantes se extiende a nivel mundial; pues se producen aproximadamente 8×10^5 t/año destinadas a la industria textil y alimenticia (Palmieri *et al.*, 2005; Wong y Yu, 1999) de los cuales, entre el 10 y 15 % no se fijan a los tejidos, vertiéndose a los ríos (Sudha *et al.*, 2014). La descarga de este tipo de efluentes en los mantos freáticos ha traído considerables daños a la flora y la fauna terrestre debido a su elevada toxicidad y gran resistencia a la biodegradabilidad, además de causar serios problemas en la vida acuática y cambios drásticos en el ambiente, aunado a esto, hay estudios que indican que dichos colorantes tienen efectos negativos en la salud humana ya que pueden causar alergias además de ser mutagénicos y carcinógenos (Stevens, *et al.*, 2013; Basu y Kumar, 2015; Rovina, *et al.*, 2017). El color en los efluentes industriales pocas veces es considerado como una forma de contaminación a pesar de los daños que provoca (Rodríguez *et al.*, 2003). En las aguas residuales, esta característica es altamente visible y altera la estética natural. Además de afectar parámetros como transparencia y solubilidad, el color en el agua impide el paso tanto de la luz como del oxígeno, con lo cual no favorece el desarrollo de microorganismos y su auto depuración o tratamiento biológico (Kim *et al.*, 2002), ya que al ser compuestos orgánicos refractarios, intervienen en los procesos fotosintéticos que realizan los organismos en los cuerpos hídricos.

1.1.1 Tipos de colorantes

Los colorantes tienen la capacidad de absorber y emitir radiación. El color que presenta una sustancia es el complementario al de la radiación que absorbe, por lo tanto, corresponde a la radiación que refleja. Aunado a esto, la percepción visual que dan los colorantes está asociada con transiciones energéticas entre niveles permitidos, así que, una vez que el electrón excitado vuelve a su estado fundamental se emite energía, que puede ser en forma de radiación. En este caso, dicha transición se debe tanto a los enlaces dobles como a los pares de electrones no compartidos de los heteroátomos, y a este grupo se le denomina cromóforo (Calero, *et al.* 2012).

En la actualidad los colorantes se clasifican de acuerdo con su origen y se describen a continuación.

1.1.1.1 Colorantes Naturales

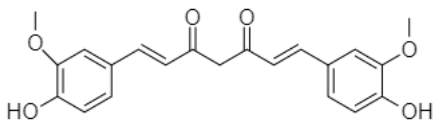
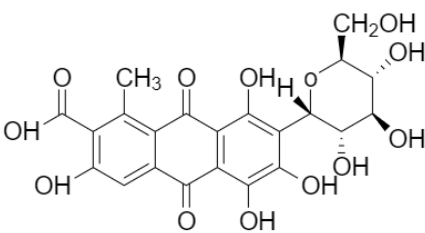
Según la FDA (Estados Unidos, Food and Drug Administration, 1993), este tipo de compuestos son aquellos que incluyen pigmentos derivados de fuentes naturales, tales como, vegetales, minerales o animales, (Gičević, 2019). Algunas de las características de este tipo de compuestos son:

- Son productos de fácil degradación al medio ambiente
- Su estabilidad depende mucho del pH, temperatura y humedad.
- A comparación de los colorantes sintéticos, su poder de teñido es menor, además presenta menor uniformidad.

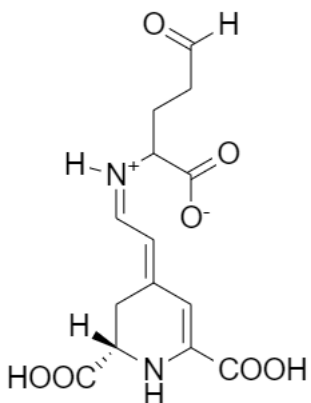
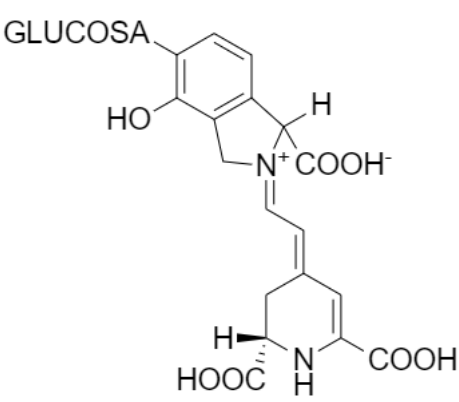
En la Tabla 1. se muestran algunos ejemplos de colorantes naturales.

Tabla 1. Tipos de colorantes naturales

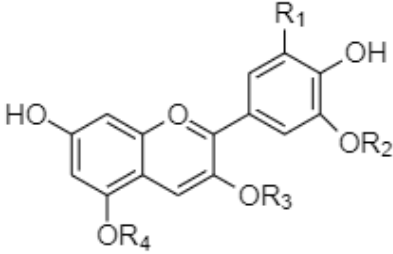
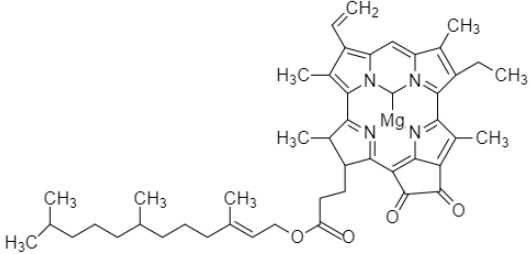
(Fuente: Elaboración propia, 2022)

Nombre	Origen	Color	Estructura química
Curcumina	<p>Este colorante proviene de la cúrcuma. El nombre sistemático es (1E,6E)-1,7-bis(4-hidroxi-3-metoxifenil)-1,6-heptadieno-3,5-diona.</p> <p>Código de identificación: E-100</p> <p>Existen dos formas de la curcumina, ambas tautómeras: la ceto en forma sólida y la enol en forma líquida (Figueroa, 2020).</p>	Amarillo	 <p>Figura 1.1 Estructura química de la Curcumina</p> <p>Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Torres Rodríguez, <i>et al.</i> 2014.</p>
Carmín cochinilla	<p>Este colorante se obtiene de las hembras desecadas del insecto <i>Dactylopius coccus</i> costa, de la familia <i>Dactylopiidae</i>. Dicho compuesto es un polvo hidrosoluble, constituido de 50% de ácido carmínico y 20% de material proteico de las cochinillas. Código de identificación: E-120, (Flores, <i>et al.</i>, 2006, López, 2011).</p>	Rojo	 <p>Figura 1.2 Estructura química del ácido carmínico</p> <p>Fuente: Elaboración propia, 2022 En base a: Gómez, <i>et al.</i> 2006.</p>

Continuación Tabla 1. Tipos de colorantes naturales

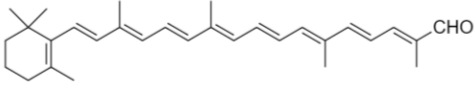
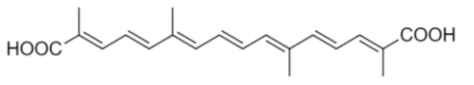
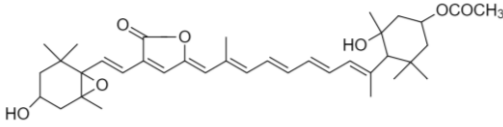
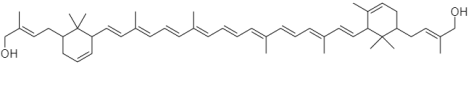
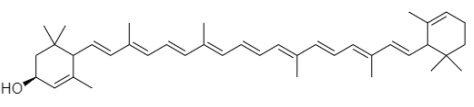
<p>Betanina o rojo remolacha</p>	<p>Este colorante se obtiene de la remolacha roja, <i>Beta vulgaris</i>. Resiste bien las condiciones ácidas. Código de identificación: E-162.</p> <p>Existen dos tipos de betanina: Las betacianinas de color rojo, (Figura 1.3) y las betaxanteninas de coloración amarilla (Figura 1.4), (Flores, <i>et al.</i>, 2019).</p>	<p>Rojizo y amarillo</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Figura 1.3 Estructura química de las betacianinas</p> <p>Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Stintzing y Carle, 2004 y Slimen <i>et. al.</i> 2017.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Figura 1.4 Estructura química de las betaxantinas</p> <p>Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Stintzing y Carle, 2004 y Slimen <i>et. al.</i> 2017.</p> </div>
----------------------------------	--	--------------------------	---

Continuación Tabla 1. Tipos de colorantes naturales

<p>Antocianinas</p>	<p>Este tipo de colorantes tienen la capacidad de separarse en formas de agliconas y azúcares por hidrólisis, contribuyen a la pigmentación de las plantas. Código de identificación: E-163, (Flavoides.org, 2020).</p>	<p>De rojo a violeta.</p>	<p>Existen seis antocianinas comúnmente en la pigmentación: cianidina (cy), delphinidina (dp), malvidina (mv), pelargonidina (pg), peonidina (pn) y petunidina (pt), son todas C3, C5, C7 y C4' derivados hidroxilados</p>  <p>Figura 1.5 Estructura química de las antocianinas (la R1 y R2 pueden ser -H, -OH, CH₃, R₄ pueden ser -H o glicósido y R₃ glicósido) Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Cerón Montes, 2010.</p>
<p>Clorofilas</p>	<p>Se obtienen de un aislamiento de las hojas de las plantas y de algunos organismos procariontes. Código de identificación: E-140-141. Fórmula química: C₅₅H₇₂O₅N₄Mg, (Hañari, 2018).</p>	<p>Verde</p>	 <p>Figura 1.6 Estructura química de las clorofilas Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Manrique, 2003.</p>

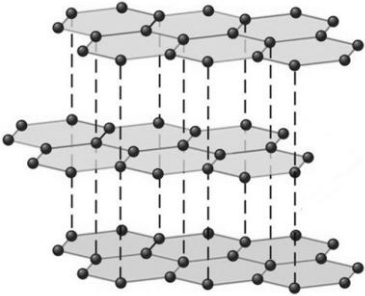
--	--	--	--

Continuación Tabla 1. Tipos de colorantes naturales

<p>Carotenoides</p>	<p>Son solubles en lípidos Cumplen la función de la fotosíntesis y dan el color a las flores y frutos. Código de identificación: E-160 Existen siete tipos de grupos funcionales (Figura 1.7) en los carotenoides y se caracterizan por tener una cadena larga de 8 unidades de isopreno (C₄₀), (Chung, 2017).</p>	<p>Naranja, amarillo o rojizo.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>B-apo-8'-carotenal</p>  <p>Crocetina</p>  <p>Peridina</p>  <p>Decapronoxantina</p> </div> <p>Figura 1.7 Ejemplos de estructuras químicas de grupos funcionales de los carotenoides Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Meléndez, 2007.</p>
<p>Xantofilas</p>	<p>Este tipo de colorante es derivado de los carotenoides y se obtiene principalmente del Cempasúchil debido a que contiene luteína una de las moléculas principales de las xantofilas. Poseen propiedades antimutagénicas y anticarcinogénicas. Código de identificación:</p>	<p>Amarillo y Naranja</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Figura 1.8 Estructura química de las xantofilas Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Meléndez, 2007.</p>

	E-161, (Ramírez de León <i>et al.</i> , 2013, Flavoides.org, 2020).		
--	---	--	--

Continuación Tabla 1. Tipos de colorantes naturales

Carbón vegetal	Este colorante se obtiene de la combustión completa de materia vegetal a través de la carbonización. El compuesto se caracteriza por ser un líquido viscoso e hidrosoluble. Código de identificación: E-153, (flavorix.com, 2020).	Negro	 <p>Figura 1.9 Estructura química del Carbón vegetal colorante E.153 Fuente: García Bello, 2019</p>
----------------	--	-------	---

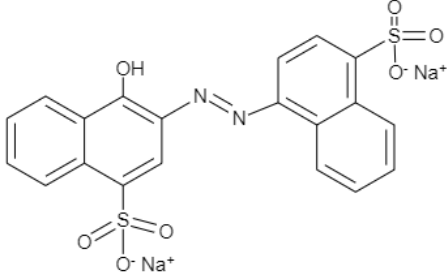
1.1.1.2 Colorantes Sintéticos

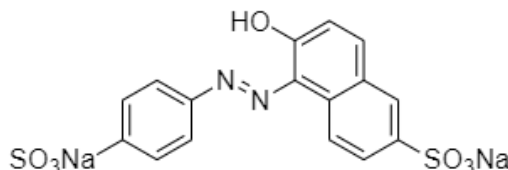
Este tipo de colorantes se fabrican antropogénicamente a través de procesos químicos. Son ampliamente usados debido a que proveen un color más intenso, mayor estabilidad y uniformidad en los productos en comparación con los colorantes naturales y por lo tanto se requieren menores cantidades para lograr un buen tinte (Ribaya, *et al.*, 2017)

Los colorantes artificiales son sustancias con fórmulas muy diferentes entre sí, por lo que es difícil encontrar una clasificación adecuada, sin embargo, es posible catalogarlos de acuerdo con su estructura química como: azoicos, xanténicos, quinoleínicos, trifenilmetánicos, indigoides, ftalocianínicos, etc.

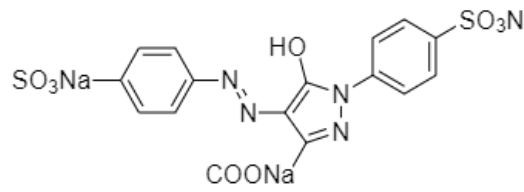
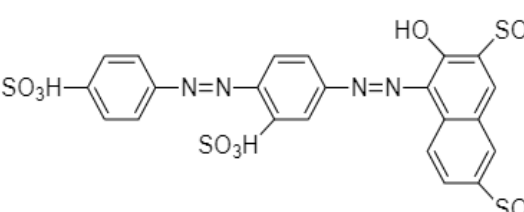
Actualmente se han considerado a los colorantes azoicos, caracterizados por tener un grupo cromóforo (-N=N-), como los más utilizados en la industria, ya que las ventas mundiales son del 31.5% debido a que la gama de colores es extensa, cabe mencionar que el amarillo, rojo y naranja son los de mayor demanda en dicho sector (Yslas, 2018). En la Tabla 2, se muestran los colorantes sintéticos más utilizados en la industria en México.

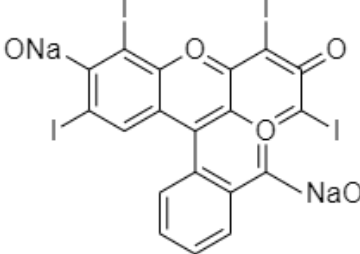
Tabla 2. Colorantes artificiales con mayor uso en México
Fuente: Mamani Martínez, *et al.*, 2015

Nombre	Clave de identificación	Color	Estructura química
Rojo carmín	E-122	Azorrubina, Rojo	 <p>Figura 1.10 Estructura química del rojo carmín Fuente: Elaboración propia, 2022, En base a: Barrera, <i>et al.</i>, 2020.</p>

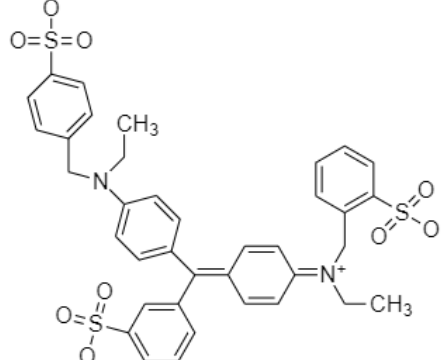
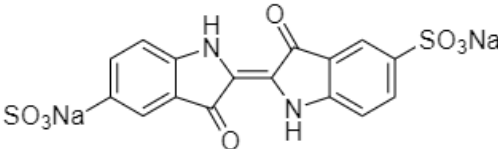
Amarillo sunset	E-110	Amarillo 6	 <p>Figura 1.11 Estructura química del amarillo sunset. Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Ensuncho, <i>et. al.</i>, 2015</p>
-----------------	-------	------------	--

Continuación Tabla 2. Colorantes artificiales con mayor uso en México

Tartrazina	E-102	Amarillo 5	 <p>Figura 1.12 Estructura química de la tartrazina Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Restrepo, 2007.</p>
Rojo Ponceau	E-124	Rojo 6	 <p>Figura 1.13 Estructura química de Ponceau R4 Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Baena, 2020.</p>

Eritrosina	E-127	Rojo 14	 <p>Figura 1.14 Estructura química de la eritrosina Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Merino, 2018.</p>
------------	-------	---------	---

Continuación Tabla 2. Colorantes artificiales con mayor uso en México

Azul brillante	E-133	Azul 1	 <p>Figura 1.15 Estructura química del azul brillante FCP Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Torres, 2018.</p>
Azul indigotina	E-132	Azul 2	 <p>Figura 1.16 Estructura química del azul indigotina Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a:</p>

			Marcano, 2018.
--	--	--	----------------

1.1.1.2.1 Contaminación por colorantes artificiales

La contaminación del agua por colorantes artificiales se extiende a nivel mundial; pues se producen aproximadamente 8×10^5 t/año destinadas a la industria textil y alimenticia (Palmieri *et al.*, 2005; Wong y Yu, 1999). La descarga de este tipo de efluentes en los mantos freáticos ha traído considerables daños a la flora y la fauna terrestre debido a su elevada toxicidad y gran resistencia a la biodegradabilidad, además de causar serios problemas en la vida acuática y cambios drásticos en el ambiente. El color en los efluentes industriales pocas veces es considerado como una forma de contaminación a pesar de los daños que provoca (Rodríguez *et al.*, 2003). En las aguas residuales, esta característica es altamente visible y altera la estética natural. Además de afectar parámetros como transparencia y solubilidad, el color en el agua impide el paso tanto de la luz como del oxígeno, con lo cual no favorece el desarrollo de microorganismos y su auto depuración o tratamiento biológico (Kim *et al.*, 2002).

1.2 Rojo Carmín

Cerca del 70% de la producción de colorantes artificiales en el mundo corresponden a los compuestos azoicos, los cuales tienen la particularidad de ser cromóforos. Químicamente, se caracterizan por la presencia del grupo azo ($-N=N-$) con enlace a anillos de benceno (C_6H_6) así como grupos oxhidrilo ($-OH$) y sulfito ácido ($-SO_3H$) (Solís, *et al.*, 2012; Brillas y Martínez, 2015). Los colorantes más comunes en la industria alimenticia son la tartrazina, la azorrubina y el rojo allura, entre otros. El rojo carmín se clasifica como una azorrubina sintética, cuya estructura química se muestra en la Figura 1.17. Tiene un espectro de absorción a 206, 234, 284, 334, 521 y 563 nm por espectrometría UV-vis (López, *et al.*, 2016).

Este tipo de colorante es usado principalmente en la industria alimenticia y farmacéutica para conseguir colores de rojo a marrón.

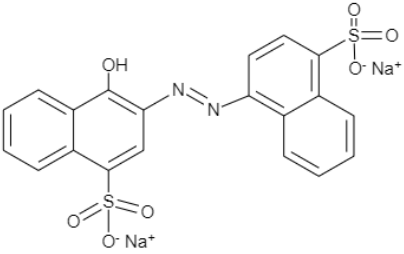
Rojo Carmín azoico		
	Fórmula química	$C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$
	Índice de color	Carmoisina ácido rojo 14
	Nombre químico	Saldisódica 4-hidroxi-2-[(E)-4(-sulfonato-1-neftilo-diazenilo) neftalina-1-ulfonato
	Número de índice de color	14720
	Longitud de onda máx. (nm)	526
	Peso molecular (g/mol)	458, 459

Figura 1.17 Estructura química del rojo carmín
En base a: Barrera, *et al.*, 2020

1.2.1 Propiedades fisicoquímicas

Una de las principales características fisicoquímicas del rojo carmín se refiere a su alta solubilidad en agua y glicerina, también, presenta estabilidad ante los ácidos y a la luz; además se ha demostrado particularmente resistente a los tratamientos térmicos. Por otro lado, son susceptibles a los agentes oxidantes debido a que químicamente son fácilmente reducidos por agentes reductores fuertes. En las Tablas 3 y 4 se muestran las propiedades físicas y químicas de dicho colorante.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del Rojo Carmín
(Parra, *et al.*, 2008)

Punto de ebullición	98 °C
Punto de fusión	No reportado
Densidad relativa	1.10 g/mL (20 °C)
Viscosidad	100-40 mP.s (20 °C)
Solubilidad en agua	22g/100 mL a 25 °C

pH de una solución al 1%	4.5 a 7.5
--------------------------	-----------

1.2.2 Efectos ambientales

En general, los colorantes artificiales o sintéticos son los que más producen contaminación al ambiente ya que estos son diseñados para ser resistentes, por lo tanto, su degradación se vuelve más lenta en comparación con los naturales, por lo que implican un desafío en el empleo de tecnologías adecuadas para su remoción, dada su compleja estructura química, toxicidad y poca o nula biodegradabilidad.

Sin importar su extenso uso, hay estudios que indican que dichos compuestos como el colorante rojo carmín tienen efectos negativos en la salud humana ya que pueden causar alergias además de ser mutagénicos y carcinógenos (Stevens, *et al.*, 2013; Basu y Kumar, 2015; Rovina, *et al.*, 2017). Asimismo, es tóxico (Hoosonl, *et al.*, 1975) y poco biodegradable cuando está presente en aguas residuales que provienen de las industrias textil (Nambela, 2020), alimenticia y farmacéutica fundamentalmente. La toxicidad aumenta con el incremento de los anillos de benceno en su estructura, sin embargo, su carcinogenicidad depende directamente de la estructura molecular y del mecanismo degradativo. Los principales productos derivados de este proceso son diversas aminas aromáticas que, a su vez, también poseen características cancerígenas ya que muchos colorantes azoicos tienen sustancias intermediarias de degradación o ruptura, como la bencidina (cuyo principal órgano blanco es la vejiga urinaria humana). Otro producto de biodegradación, la p-fenilendiamina es un poderoso alérgeno de contacto. Aunado a lo anterior, los colorantes de este tipo pueden alterar los marcadores bioquímicos de ciertos procesos metabólicos (Chung, 2016; Gičević, *et al.*, 2019; Gebhardt, *et al.*, 2020),

1.2.3 Técnicas convencionales de degradación de colorantes azoicos

Entre las tecnologías enfocadas a la remoción de estos compuestos, se encuentran los procesos electroquímicos complementados con métodos espectroscópicos para la oxidación directa del grupo azo en colorantes como Carmoisina, Amarillo 6, Rojo allura y el Rojo Ponceau 4R (el último de estructura similar al rojo carmín), las cuales son muy efectivas (Sierra-Rosales, *et al.*, 2018). Aunado a esto, las tecnologías consisten en procesos de oxidación avanzada (donde prevalece la electrocoagulación con distintas condiciones operativas) (Liu, 2010; Hossain, 2013; Murcia, 2018; Sierra-Rosales, *et al.*, 2018; Ganiyua, *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020), fotocatalisis (Sajjad, 2010) o métodos que emplean nanopartículas irradiadas (De-León Condés, *et al.*, 2020). Sin embargo, se han alcanzado eficiencias más favorables cuando además de utilizar estos métodos de degradación, se emplea la luz solar, tal como lo demuestran las siguientes investigaciones:

- Yslas (2018) estudió el efecto de la luz solar y el peróxido de hidrógeno en la reacción de degradación para decolorar una solución de carmoisina, utilizando un nuevo catalizador de CuO-CoO soportado en una matriz de aluminosilicato-zeolita. Los resultados muestran que la cinética de degradación de carmoisina tiene diferentes órdenes de reacción en función del agente que se utiliza para degradar la molécula. Para los casos donde no interviene la luz solar, el orden de reacción es cero. Por otro lado, reporta que el porcentaje de degradación depende del tipo de agente de que se utiliza. En este sentido, los resultados que obtuvo fueron: si se utiliza el catalizador sin peróxido de hidrógeno en ausencia de luz solar se alcanza una degradación de 8.4 %, con peróxido de hidrógeno y catalizador sin luz solar 21.3 %, solo con la presencia de luz solar fue del 69 %, con luz solar y catalizador del 91 %, pero si se utiliza la luz solar, el peróxido de hidrógeno y el catalizador se alcanza una degradación del 95.6 %.

-
- Arroyave, *et al.*, (2012) realizaron la degradación y mineralización del colorante Rojo Ponceau empleando el reactivo de Fenton utilizando tecnología de oxidación avanzada y una concentración inicial de 100 mg/L del colorante, la cual se mantuvo a pH = 3.0. La degradación se determinó mediante el empleo de espectrofotometría UV/Visible a una longitud de onda de 505 nm. Por otro lado, la mineralización se determinó por la aparición de sulfatos como subproducto de la degradación a 420 nm. En esta investigación la degradación y mineralización de dicho colorante empleando diferentes combinaciones de oxidación con el reactivo de Fenton; mostró un porcentaje de 97,8 y 86,2 %, respectivamente.
 - Por otro lado, Fonseca, *et al.*, (2012) evaluaron la degradación de colorantes tipo azo con un proceso de fotocátalisis heterogénea utilizando energía solar mediante el uso de ZnO nanoestructurado soportado. Se utilizaron 3 mg/L naranja ácido 7 (NA7), 4 mg/L azul ácido (AA113) y 4 mg/L rojo ácido (RA151). Reportaron que las películas de ZnO:Al presentaron actividad fotocatalítica al ser expuestas a radiación solar mediante el uso de un reactor del tipo Colector Parabólico Compuesto (CPC) y se obtuvieron porcentajes de decoloración superiores al 70 % para los colorantes NA7 y AA113, y del 55% para el RA151 en 5 horas de exposición a la luz solar. También se presentó la degradación de los compuestos azoicos al romperse el enlace y generar sub-productos más biodegradables como el anhídrido ftálico, ácido láctico y acético que evidenciaron con pruebas de cromatografía líquida HPLC.
 - López (2011), estudió la degradación del colorante azo amarillo ácido 36, usando el proceso fotoelectro-fenton una planta piloto solar y electro-oxidación, donde realizó pruebas a escala, con el uso de electrodos de diamante dopados con boro (DDB) como cátodos para la electro-formación

de H_2O_2 e incursionando en el uso de un (CPC) aprovechando la luz solar. En dicha investigación se reportó la regeneración de los iones Fe^{2+} mediante la radiación solar, alcanzando adicionalmente un 60 % de mineralización del AA36; en el mismo estudio, se identificaron algunos ácidos orgánicos como el fumárico, fórmico y oxálico. En cuanto a la degradación del colorante, el proceso fotoelectro-Fenton/solar presentó una eficiencia de 90 % en la disminución de la concentración comparado con el 60 % obtenido en la electro-oxidación.

- Manrique, *et al.*, (2017), emplearon el método de fotocatalisis con TiO_2 en suspensión usando luz artificial y solar con el objetivo de tratar aguas contaminadas con colorantes. Se reportó que con el sistema de luz artificial la remoción alcanza un 50 y 30 % del color y la DQO respectivamente. Por otro lado, con luz solar en 3h de tratamiento, removi6 100 % del color y 80 % de la DQO.
- Tinoco, *et al.*, (2011) efectuaron un estudio acerca de tratamientos de efluentes textiles con per6xido de ox6geno, di6xido de titanio y luz ultravioleta solar, como catalizador, observando que el tiempo 6ptimo de degradaci6n (100 % del color) fue de 2 h y una concentraci6n de TiO_2 de 50 ppm. Adem6s, confirmaron que el TiO_2 sirve como fotocatalizador para la degradaci6n de efluentes textiles, con luz ultravioleta solar de baja energ6a.

1.3 Destilaci6n solar

La radiaci6n solar es energ6a electromagn6tica considerada como uno de los recursos naturales m6s abundante, disponible e incluso inagotable, sin embargo, solo una fracci6n de esta llega a la Tierra en forma suficiente para sustentar la vida y mantener una temperatura estable en el planeta (Ram6rez, 2020).

La utilización de la energía solar es vital para lograr la sostenibilidad y reducción del uso de energías convencionales. Ésta, tiene el mayor potencial entre todas las fuentes energéticas renovables, tanto, que una pequeña cantidad cubriría la demanda energética mundial total (Rajesh *et al.*, 2012; Kumar y Kim, 2016, 2017). Otro aspecto importante, es que su conversión directa no tiene efectos contaminantes sobre el ambiente (Rajesh *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2014, 2017; Kumar y Kim, 2016; Nadda *et al.*, 2017).

De manera general, existen tres formas para aprovechar la energía proveniente del sol: 1) reacciones fotoquímicas (el caso de la fotosíntesis); 2) generación fotoeléctrica, basada en el efecto fotovoltaico para la producción de energía eléctrica, en este tipo destaca el uso de captadores solares planos (De la Rosa, *et al.*, 1991; Kalogirou, 2014; Cengel y Boles, 2015).; y 3) procesos fototérmicos, en los cuales la energía es captada y convertida a calor útil mediante dispositivos como captadores planos, concentradores o heliostatos y lentes: con cualquiera de ellos el objetivo es la obtención de altas temperaturas (Kalogirou, 2014; Cengel y Boles, 2015).

Dentro de los procesos fototérmicos existe una aplicación de relevancia, la cual se refiere a la fabricación de alambiques o destiladores solares: dispositivos simples cuya principal utilidad es la desalinización en áreas con escasez de agua potable (Durkaieswaran y Murugavel, 2015). Casos de éxito se identifican a partir de 1874, cuando Charles Wilson diseñó y dirigió la instalación en el desierto de Atacama (Chile) para la Salitrera Lastenia Salinas. Esta central era capaz de proporcionar un promedio de 22,500 L de agua/día con una superficie de captación mayor a los 4000 m²; la cual se mantuvo en operación hasta 1907. Desde entonces infraestructuras de este tipo se han desarrollado en diversas zonas del mundo con escasez de agua, pero con acceso al mar como Israel, Canarias (España) y otras islas áridas del mediterráneo. La destiladora solar de mayor tamaño del mundo es la instalada en Patmos (Grecia) que cuenta con una superficie superior a los 8000

m² (Recuperado de: <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>. Consulta: mayo 2022).

Los destiladores solares, pueden construirse con una amplia variedad de materiales, de lo cual depende su durabilidad y eficiencia, además de aplicarse para la obtención de unos pocos litros hasta varios m³ de agua por día. Poseen además otras ventajas, como facilidad de fabricación, necesidad mínima de mano de obra y operación prácticamente libre de mantenimiento (Durkaieswaran y Murugavel, 2015).

Los destiladores solares varían fundamentalmente en la geometría y características del diseño; la eficiencia depende además de la incidencia de radiación y la temperatura ambiente (Manikandan, *et al.*, 2013), pero todos se fundamentan en la evaporación natural seguida por un enfriamiento y subsecuente condensación del líquido; básicamente el proceso reproduce de manera acelerada y en menor escala el ciclo natural del agua.

1.3.1 Tipos de Destiladores Solares

a) Destilador solar de una sola vertiente

Un destilador solar de una sola cuenca se caracteriza por ser el dispositivo más sencillo en diseño, y puede fabricarse con una variedad de materiales, tales como, madera, metales, plástico y vidrios. Por otro lado, el mantenimiento que se le otorga es muy económico y no se requiere mano de obra especializada (Kabeel *et al.*, 2015). Sin embargo, es considerado como el de menor eficiencia en la familia

de los destiladores solares. En la Figura 1.18, se muestra un esquema elemental del proceso de separación mediante destilación solar en un alambique solar de una sola cuenca:

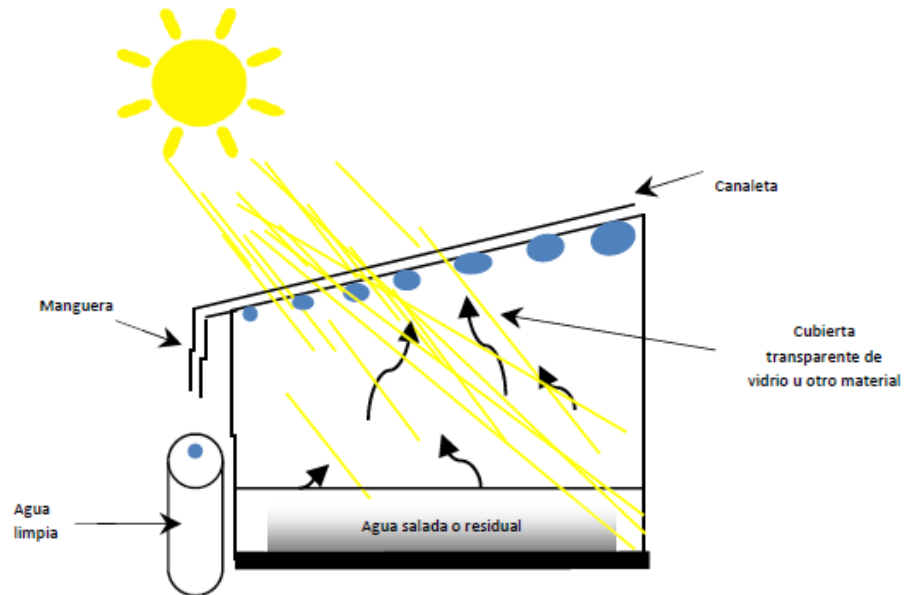


Figura 1.18 Esquema de un destilador solar básico de una sola vertiente

Fuente: Elaboración Propia, 2022

En términos generales, la destilación solar es un proceso heliotérmico en el cual se calienta una masa de agua, contenida en un recipiente cerrado con una cubierta, por efecto de la radiación solar (Muñoz, 2019). Como puede observarse en la Figura 1.23, el dispositivo consiste en un receptáculo de fondo oscuro (para elevar la temperatura interior) que contiene el agua a destilar, sobre el que se coloca una superficie transparente para permitir el paso de la radiación solar generando así un efecto invernadero con saturación de humedad. El vapor de agua asciende por convección (quedando contaminantes y sales en el fondo del dispositivo) hasta la tapa (cuya temperatura es mucho menor por el contacto con el ambiente externo) donde se condensa el agua formando pequeñas gotas. La superficie transparente está dispuesta de manera adecuada para favorecer que el

condensado aumente en cantidad y de esta manera pueda fluir hacia un contenedor donde se recoge el destilado; cabe mencionar que dicha agua destilada queda libre de sustancias contaminantes. El proceso se mantiene en tanto exista radiación proveniente del sol y agua suficiente. Aunque, existen otros parámetros ambientales que afectan a la productividad del agua destilada como la velocidad del viento, la temperatura ambiente, la diferencia de temperatura del vidrio, el área de superficie libre de agua, el área de placa de absorción, la temperatura del agua de entrada, ángulo del vidrio y la profundidad del agua, éstos pueden ser manejados realizando variaciones en los diseños de los destiladores solares (Torres, *et al.*, 2016).

b) Destiladores solares de dos vertientes

Este tipo de destilador tiene un diseño más complejo, sin embargo, la eficiencia de este aumenta debido a que tiene el techo de vidrio generalmente de 5 mm de espesor con doble inclinación colocadas a 45° respecto a la horizontal (Rubio Cerda E., 2005), y no hay placas verticales que proyecten sombras en el interior de la caja la cual es de baja altura y es donde se almacena el agua a destilar (ver Figura 1.19), lo que permite aumentar la temperatura interna. Finalmente, el líquido destilado se extrae por medio de una válvula a la salida del dispositivo (Molina, 2020)

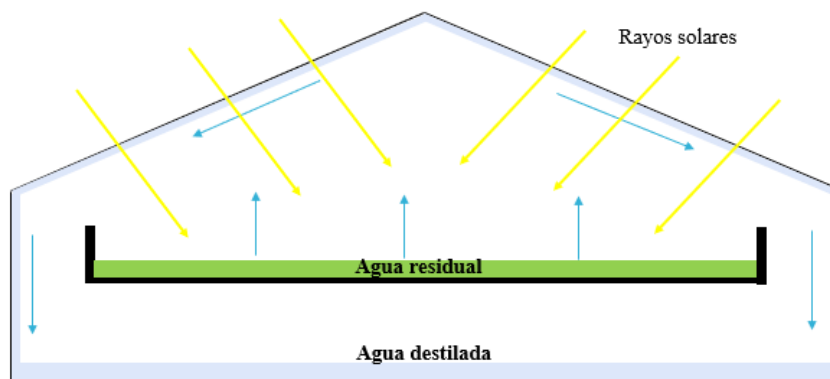


Figura 1.19. Esquema de un destilador solar de dos vertientes

Fuente: Elaboración propia, 2022

b) Destilador solar de invernadero

Este tipo de destilador tiene una apariencia física similar al de dos vertientes, sin embargo, el modelo es más amplio ya que considera la unión de 2 o más módulos de destilación (ver Figura 1.20). Este dispositivo cuenta con una bandeja inferior, generalmente de color negro y baja profundidad la cual sirve como almacenador del agua a destilar y colector de calor, también cuenta con dos receptáculos de vidrio situados en las paredes y en el techo a 20° de inclinación (Pocaterra, 2002).

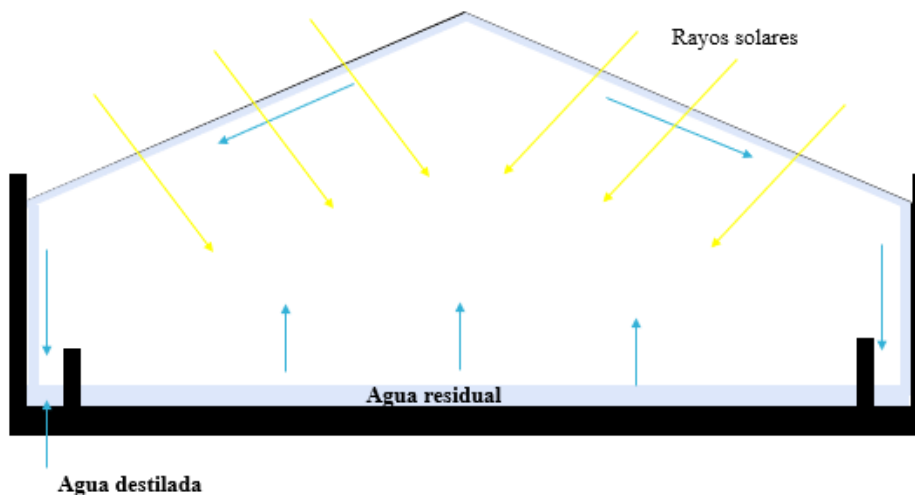


Figura 1.20. Esquema de un destilador solar de invernadero

Fuente: Elaboración propia, 2022 En base a: Pocaterra, 2002.

c) Destilador solar de cascada

Este tipo de destilador se basa en una estructura tipo escalonada en la cual, cada escalón es una bandeja en la cual se colecta el agua para destilar, cabe destacar que el número de escalones varía conforme al diseño, sin embargo, al igual que los destiladores descritos anteriormente consta de un receptáculo de vidrio el cual cubre todos los escalones. A pesar de que su fundamentación es la misma de evaporar y condensar el agua, el propósito de este diseño es dejar correr el agua en forma de cascada por lo que, al ocurrir la destilación, la salmuera o algún residuo sólido es dirigida a la salida del dispositivo por medio de un desagüe, tal como se observa en la Figura 1.21 (Caro, 2020).

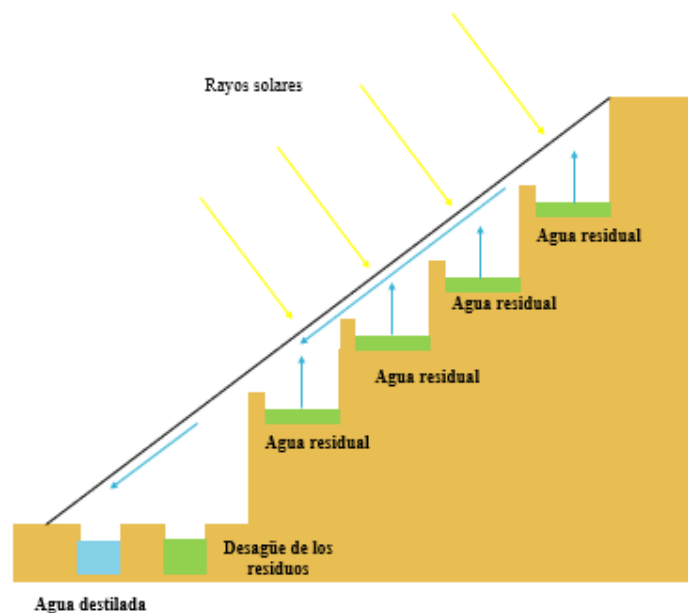


Figura 1.21. Esquema de un destilador solar de cascada

Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: López Guzmán, 2012.

e) Destilador solar esférico de barredera

Este destilador solar tiene un diseño complejo, debido a la forma esférica del receptáculo de vidrio. Dicho dispositivo tiene el objetivo de captar mayor cantidad

de energía solar, para esto, cuenta con una barredera al interior dirigida por un motor la cual permite que haya menor reflectancia de la radiación y por lo tanto la energía calorífica aumente en el interior de este. Por otro lado, la bandeja que contiene el agua a destilar se mantiene en el centro de la esfera (Caro, 2020).

Al ocurrir la evaporación, las gotas condensadas se pegan en el vidrio esférico, las cuales caen por gravedad al final de dicho receptáculo y son capturadas por un desagüe localizado en la parte inferior, tal como lo muestra la Figura 1.22.

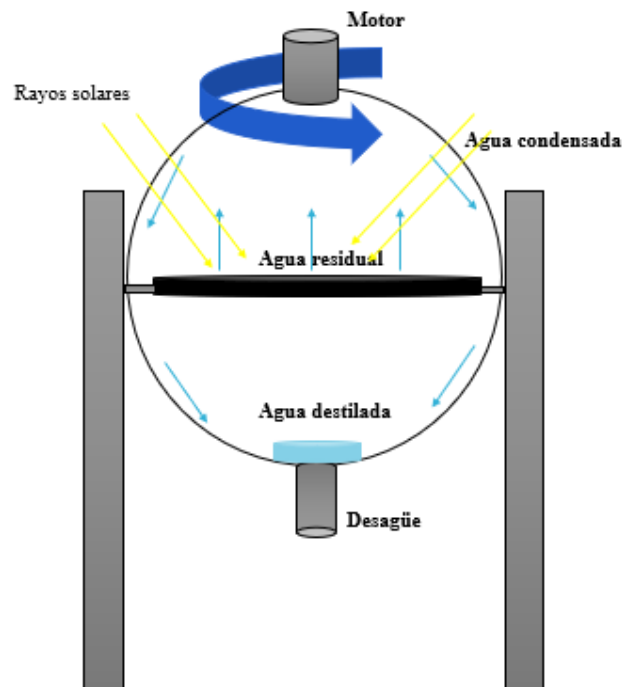


Figura 1.22. Esquema de un destilador solar esférico de barredera

Fuente: Elaboración propia, 2022 En base a: Sitiosolar, 2020.

f) Destilador solar multietapa

Actualmente se considera el diseño de destilador solar más eficiente, sin embargo, presenta mayor complejidad y económicamente requiere inversión considerable

debido a que dentro de su estructura presenta captadores solares complejos, concentradores parabólicos, tubos de vacío, e incluso sistemas de placa plana de alta eficiencia, (Caro, 2020), con el objetivo de alcanzar mayor temperatura y lograr que el agua a destilar alcance el punto de ebullición (ver Figura 1.23). Por otro lado, se utiliza algún refrigerante para ayudar a la condensación del agua y se almacena el calor en algunos depósitos.

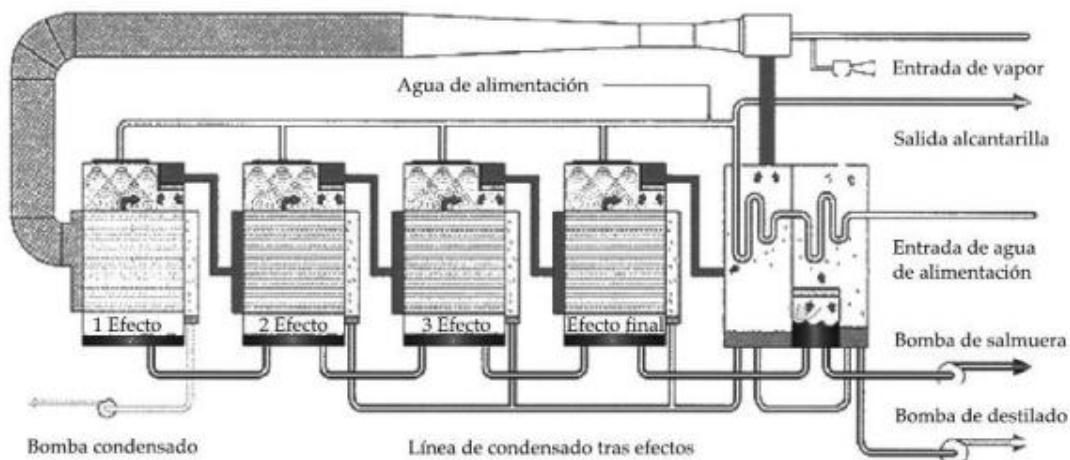


Figura 1.23 Destilador solar multietapa y sus procesos

Fuente: CETENMA, 2008

Aunque se trata de un método simple, existen parámetros de diseño que deben considerarse ya que inciden en la eficiencia del proceso de separación, como el tipo y capacidad térmica del equipo, el volumen a tratar o el tiempo que se tarde en alcanzar la temperatura de ebullición (Manikandan, *et al.*, 2013). Algunas investigaciones al respecto se mencionan a continuación:

- Durkaieswaran y Murugavel (2015) hacen una revisión de diferentes tipos de destiladores solares; los datos recabados marcan eficiencias en el rango de 30 a 45 %, y con una productividad de agua recuperada de más de 5 L/m²/día.

- Ibrahim, *et al.*, (2015), investigaron un sistema de desalinización solar que funciona a presión subatmosférica. La disminución de la presión de evaporación del agua salina permite una gran reducción de la energía requerida para operar el sistema. Este consistió en una cuenca solar conectada a un condensador externo refrigerado por aire que utiliza una bomba para desarrollar la condición de vacío. Los resultados experimentales se presentaron para diferentes estaciones del año logrando una eficiencia máxima del 40 % así como una mejora del 16,2 y 29,7 % en productividad y eficiencia térmica, respectivamente, en comparación con la destilación solar convencional.

- Matrawy *et al.*, (2015) evaluaron la productividad de un alambique solar al modificarlo con una superficie corrugada evaluando la disminución de la pérdida de calor, con el uso de un material poroso. Aquí emplearon tela negra en forma ondulada que se sumergió en agua para que ésta fuera absorbida llegando a la saturación por efecto capilar. También se utilizaron reflectores inclinados para aumentar la incidencia de radiación solar y encontraron una mejora de aproximadamente el 34 % en la eficiencia para el dispositivo propuesto en comparación con el de vertiente simple con un ángulo de inclinación óptimo de aproximadamente 30° para el reflector con respecto a la vertical.

- Sathyamurthy, *et al.*, (2015) diseñaron y fabricaron un nuevo modelo de destilador solar portátil que fue probado durante el verano en la provincia de Chennai, India para lo que emplearon un material de cambio de fase (PCM) que dividía un alambique de una sola pendiente en dos cámaras: una de evaporación y otra para la condensación. Con esa adecuación se alcanza una eficiencia máxima del 14% y un rendimiento acumulado mayor al 52 %, ya que el dispositivo continúa produciendo agua dulce después de la puesta de sol donde más del 34 % de la producción total corresponde a este momento.

- Omara, *et al.*, (2016) investigaron los parámetros de rendimiento de un alambique solar corrugado (CrSS) contra el convencional (CSS) para la desalinización de agua en la Universidad Kafrelsheikh, Egipto, (empleando tecnología innovadora consistente en el uso de un material de doble capa y reflectores juntos dentro del primer dispositivo. Los autores analizaron también la influencia de la profundidad del agua salina (1, 2 y 3 cm) en el rendimiento; los resultados indicaron una mejora en la productividad y eficiencia totales del CrSS. Durante los experimentos, las productividades de CrSS con mecha y reflectores son aproximadamente 145.5 % más altas que la del CSS, a una profundidad de salmuera de 1 cm. Obteniendo una eficiencia/día del 59 y 33 % para el CrSS vs CSS, respectivamente.

- Rajaseenivasan, *et al.*, (2016) analizaron teórica y experimentalmente el desarrollo de un destilador solar de vidrio (para la separación de agua salobre) con suministro integrado de agua precalentada separado en dos secciones: inferior (precalentador) y superior (evaporador) mediante una placa del mismo material. La sección de precalentador contiene cinco vasos rectangulares huecos como aletas que mejoran la velocidad de transferencia de calor, en las cuales se colocan los componentes de almacenamiento de energía (carbón, arena y chatarra). El rendimiento del sistema se analiza variando el precalentador, la profundidad del agua (2, 4, 6 y 8 cm) y el efecto de los compuestos filtrantes. Los resultados indican que el aumento en la profundidad del agua en la sección del precalentamiento reduce la eficiencia diurna, pero mejora considerablemente la nocturna. En este mismo sentido, el carbón vegetal aumenta la producción total de destilado del sistema hasta 3.61 kg/día.

- Panchal y Patel (2017) analizaron a partir de varios estudios, la desalinización solar como una alternativa factible para superar la problemática de disposición de agua dulce causada por la creciente demanda poblacional actual.

Este artículo de revisión se enfoca sobre todo al diseño y parámetros climáticos que afectan el rendimiento de un alambique solar.

- Arunkumar, *et al.*, (2019) trabajaron sobre cuatro sistemas de destilación solar de una sola vertiente idénticos (área 0.50 m²) para la desalinización de agua con espuma impregnada de carbono (CIF) usando un aislamiento de plástico de burbujas para mejorar la productividad del agua dulce. El rendimiento se evaluó en las mismas condiciones climáticas de Chennai, India (13.08 N de latitud, 80.27 E longitud). Las distribuciones de temperatura en los absorbentes flotantes se analizaron mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). Los resultados de los dispositivos con material plástico aislante se compararon con un alambique solar convencional (CSS) con aserrín y se realizaron pruebas de calidad del agua, las cuales se contrastaron con muestras de agua de lluvia. En conclusión, las productividades fueron 1.9 L/m²/día, 2.3 L/m²/día, 3.1 L/m²/día y 2.2 L/m²/día, respectivamente.

- Modi, *et al.*; (2019), evaluaron el rendimiento de los alambiques solares de doble cuenca de pendiente única con el uso de una pequeña pila de materiales de mecha (telas de yute y algodón negro). Para el estudio, se desarrollaron dos dispositivos y los experimentos se llevaron a cabo también para dos profundidades de agua diferentes (0.01 y 0.02 m) en Valsad, Gujarat India (20.61 ° N, 72.91 ° E). En los resultados se observa una mejora en el rendimiento de 18.03 y 21.46 % a las profundidades de agua respectivas para el alambique con yute en comparación con el de tela de algodón negro.

- Tukenmez, *et al.*, (2020) desarrollaron una planta de energía integral basada en un colector parabólico y siete subsistemas: 1) para obtención-almacenamiento de hidrógeno comprimido 2) ciclo del colector solar para generar energía térmica a partir de la solar, 3) ciclo de destilación para obtener agua dulce de agua marina, 4) ciclo de Kalina para convertir la energía térmica en mecánica,

5) ciclo de Rankine aplicado al reciclaje y generación de electricidad a partir de los desechos orgánicos, 6) ciclo de enfriamiento del eyector para salida y 7) subsistema de secado. El análisis de las eficiencias (energética y total) mediante el software EES obtenido fue del 59.34 y 56.51 %, respectivamente.

- Zhang, *et al.*, (2020) realizaron un estudio comparativo de abril a noviembre en la ciudad de Fuzhou en China, sobre el rendimiento anual entre un sistema de calentamiento solar de agua (en modo continuo y discontinuo) con termosifón de circuito cerrado (LT-SWH) comparándolo con el de calentamiento solar de agua convencional (SWH). Los resultados indican que en el último dispositivo se presenta una mayor relación de pérdida de calor durante la noche con un valor anual promedio de 15.07 % correspondiente al 6.15 % para el LT-SWH, sin embargo, durante el día en éste se incrementa debido al intercambio de calor secundario.

*“En México, de 1972 a 1976, la oficina de aguas salinas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos construyó un gran número de pequeños destiladores de caseta (0.8 m² cada uno) para varios lugares remotos, que duraron pocos años”. A fines de 1975, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se formó el primer grupo dedicado a la investigación sobre las aplicaciones de la energía solar entre las que se destacó su uso para la desalinización de agua marina o salobre. En 1980, fue desarrollado el proyecto “Sonntlan” a 300 km al norte de La Paz, Baja California Sur, que incluyó un destilador solar de múltiple etapa (Porta, *et al.*, 1998).*

“Durante la segunda mitad de la década de los ochenta, se dedicó una gran cantidad de esfuerzo a la comprensión básica de la destilación solar, en varios proyectos realizados en el estado de Baja California Sur, en especial en el Instituto Tecnológico de La Paz y en el CIBNOR. La instalación de destilación solar más grande en México se encontraba en Puerto Lobos, Sonora, formada por 480 m² de DS con una producción de 1500 L/día. En el año 2016 surgió interés de la SEMAR, por conocer cuál sería el comportamiento de los DS de caseta a lo largo

de un año, ya que se tiene el plan de instalar plantas de destilación solar en varias islas del país” (Muñoz, 2019).

A partir de estos antecedentes, en el actual trabajo de investigación se utilizó un destilador simple, debido a la facilidad de manufactura, la variedad de materiales con los cuales se puede construir y por lo tanto mejor viabilidad económica.

1.3.2 Descontaminación de aguas residuales por medio de la destilación solar

La destilación solar ha demostrado ser una técnica favorable sobre todo en procesos de desalinización; con su aplicación se produce agua ultrapura que supera en calidad a las técnicas comerciales para la obtención de agua embotellada. A continuación, se exponen investigaciones que se han realizado acerca de la descontaminación a partir de la destilación solar.

- En el 2020, Jiménez García realizó un estudio de purificación de agua local para el consumo humano a partir de un destilador solar de alta eficiencia para entornos domésticos rurales áridos. Dicho investigador utilizó un destilador de dos cuencas y reportó una producción de agua de 2 L/día/m² con una radiación mínima de 100 Wh/m² y de 5 L/día/m² con una radiación máxima 8000 Wh/m². Por otro lado, la calidad de agua mostró los siguientes valores para los parámetros mencionados: Oxígeno disuelto 9.3 mg/L, Ph 7.91, Conductividad eléctrica 7.8 uS/cm, Coliformes fecales 0, Dureza total 144mg/L, color 1.7, turbiedad 0,9 NTU, nitritos 0 mg/L y nitratos 5 mg/L. El estudio concluye que la destilación solar pudo transformar agua con altos contenidos de sales no apta para consumo

humano en agua con características adecuadas para consumo humano dado que los parámetros analizados para el agua destilada se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de las normativas TULSMA e INEN 1108 de Ecuador.

- Sabando Álvarez en 2017, realizó un trabajo de investigación sobre el diseño y construcción de un destilador solar para aguas residuales en la ciudad de Riobamba en Ecuador con el objetivo de reutilizarla en actividades agrícolas. Para esto, empleó el diseño de un destilador solar de dos pendientes de acero inoxidable a 30° de inclinación y trató tres tipos de agua residual: doméstica, industrial y doméstica-industrial. En sus resultados reportó que las eficiencias del destilador varían conforme al tipo de agua residual, obteniendo para la doméstica 94.28 y 99.31 % en la industrial de disminución de contaminantes por lo cual concluye que la destilación solar es un método eficiente para tratar aguas residuales y recomienda utilizar volúmenes bajos con la finalidad de lograr mayor eficiencia en el tiempo de la destilación y un lavado al destilador previo al proceso. Por otro lado, la calidad del agua cumplió con la normativa para uso agrícola.
- En el 2009, Santos Jaimes realizó un estudio de diseño, construcción y caracterización de un destilador solar de caseta con el objetivo de mejorar la calidad del agua de consumo humano en zonas donde no se cuenta con ningún método de desinfección. Para esto, observó la variación de la eficiencia térmica del sistema en función del nivel de agua dentro del colector-evaporador utilizando agua proveniente de las quebradas Mensuli y Palmichala del Municipio de Floridablanca. Concluye que el nivel de agua afecta de forma inversa la eficiencia térmica del equipo y su variación es de forma polinomial de tercer grado. También determina que la eficiencia

máxima alcanzada fue del 44.4 % cuando el nivel de agua dentro del dispositivo solar es de 1 cm y este valor disminuye de forma exponencial hasta un valor de 8.7 % cuando es de 6 cm. Por otro lado, la desinfección de agua destilada se determina en una reducción del 99.95 % de los coliformes fecales y totales presentes en la muestra.

- Alvarado Camacho en 2019, estudió un nuevo prototipo de destilador solar tipo caja adicionando reflectores solares e instalado en el estado de Zacatecas para la purificación de aguas, en el cual evaluó el desempeño térmico, eficiencia, poder de cocción y capacidad de purificación. Reportó valores de 125 °C dentro del equipo, 160 °C en la charola y 114 °C en el agua a destilar que se alcanzan dentro de los 30 min de exposición a la radiación solar de 250 W/m² en promedio, para un volumen de 1.5 L. Respecto a la calidad del agua, reporta que los valores de conductividad disminuyen de 546.3 µs/cm a 17.4 µs/cm en el destilado, estando por encima del límite inferior del agua potable de acuerdo con los valores recomendados por laboratorios Lentech. Así mismo, el destilador alcanzó un 37 % de eficiencia con poder de cocción del 52.90 % y capacidad de purificación entre los 250 y 350 mL en 6 h de exposición al sol.
- En el 2020, Chávez Sánchez y colaboradores realizaron un análisis de la remoción de colorantes Rojo 28, Rojo 81, Azul 21, Azul 198 y Negro B5 por medio de un destilador solar tipo caseta. Reportaron una eficiencia del 50 % en el destilador, ya que, a partir de 3 L iniciales de muestra, obtuvieron 1.5 L de agua tratada (esto en los meses más calurosos del año y en zonas donde las condiciones climatológicas sean propensas a temperaturas altas). Por otro lado, reportan una remoción del colorante en el agua destilada de hasta un 99 % con un aumento en la calidad, ya que los resultados de la caracterización muestran que la turbidez se redujo en un 70 % alcanzando 0.7 NTU y 5 unidades de pH como valor promedio.

- En el 2020, Feliz Bustinza y colaboradores realizaron un estudio para evaluar y construir un prototipo de destilador solar con el objetivo de purificar aguas salobres para consumo humano. El área del prototipo del destilador solar estimado fue de 0.15 m^2 , construido en acero inoxidable con una cubierta de vidrio transparente de 3 mm de espesor y un ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio de 17° . Reportaron que la cantidad de agua purificada depende de las condiciones climatológicas, en específico de la radiación solar; también indican que se obtiene un promedio de 326.88 mL/día con un máximo de 452 mL/día y un mínimo de 208 mL/día, alcanzando una eficiencia térmica del 35 %. Por otro lado, reportan que se cumplen con los parámetros establecidos de calidad del agua potable, mostrando valores de cloruros reducidos de 387 mg/L a 25 mg/L y de 6500 mg/L a 33 mg/L de dureza total en el agua purificada.
- Pérez Venegas *et al.* en el 2015, realizaron un análisis del comportamiento de un prototipo de destilador solar en la ciudad de Cartagena, Colombia, con el objetivo de determinar su eficiencia en la desalinización de agua de mar, la cual fue extraída en las playas de Bocagrande bajo las condiciones ambientales de dicha ciudad. Este destilador solar fue monitoreado durante cinco semanas, y se obtuvieron resultados de disminución de salinidad de 35.9 a <1.0 , disminución de pH de 8.10 UpH a 7.5; un aumento de color de 5 a 7 UC, reducción en la turbiedad de 5.25 UNT a 1.74 UNT así como en la conductividad de 54.3 mS/cm a 493 $\mu\text{S/cm}$. Por otro lado, se reportó un promedio de 214.89 mL/día de producción de agua a temperatura media y radiaciones solares máximas y mínimas de 34°C , 700 W/m^2 y 684 W/m^2 necesarias para la evaporación.

1.4 Interacción colorante tipo azoico - luz solar

Como se ha descrito anteriormente el uso principal de la destilación solar se destina a procesos de desalinización, sin embargo, el auge de este tipo de energía renovable se encuentra en utilizarla para tratamiento de aguas residuales. En el caso particular de los colorantes sintéticos derivados de la azorrubina, no existen muchas investigaciones que se enfoquen a su remoción en aguas contaminadas, ya que al ser de uso común en industria alimenticia y farmacéutica no se consideran compuestos protagonistas en la toxicidad o peligrosidad. Los estudios para eliminación de éstos se han encaminado a aquellos empleados en la industria textil para teñir prendas de color azul como la mezcilla; tal es el caso de la indigotina, índigo carmín o el colorante Azul brillante FDF. Sin embargo, a pesar de que se utilizan diferentes métodos fisicoquímicos para su eliminación, como se ha descrito previamente en el punto 1.1.1.2.1, se ha demostrado que a pesar de que son métodos eficientes, se vuelven más favorables cuando interviene la luz solar.

Dichos compuestos se ven favorecidos en su degradación al exponerse a este tipo de energía, debido a que el estado electrónico excitado se forma cuando un fotón es absorbido por su grupo funcional cromóforo, por lo tanto, sus propiedades químicas difieren debido a una distribución de carga electrónica disímil con enlaces más débiles. Por otro lado, se ha demostrado que la radiación ultravioleta causa la ruptura de enlaces químicos en una estructura lo que da inicio a la degradación de dicho material, a este tipo de reacción se le conoce como fotooxidación ya que una sustancia oxidable absorbe la luz de modo que reacciona con el oxígeno molecular (Ordóñez, 2006)

Actualmente, se describen dos procesos para la fotooxidación:

1. Fotólisis, “es la descomposición química de los cuerpos por efecto de la radiación ultravioleta” (Ordóñez, 2006) Aquí es donde se forman radicales libres debido a los rompimientos moleculares.

2. Anti-oxidación: Los radicales libres formados anteriormente interactúan con el oxígeno formando radicales de peróxido lo que lleva al deterioro del material.

La degradación de cualquier compuesto orgánico se debe principalmente a un “ataque de radicales libres” que se logra al absorber luz ultravioleta, a esto se le conoce como iniciación. Posteriormente comienza una propagación de estos; finalmente, se le conoce como terminación a la combinación de dos radicales libres. A continuación, en la Figura 1.24 se muestran los pasos para la degradación de un compuesto orgánico al exponerse a la luz ultravioleta.

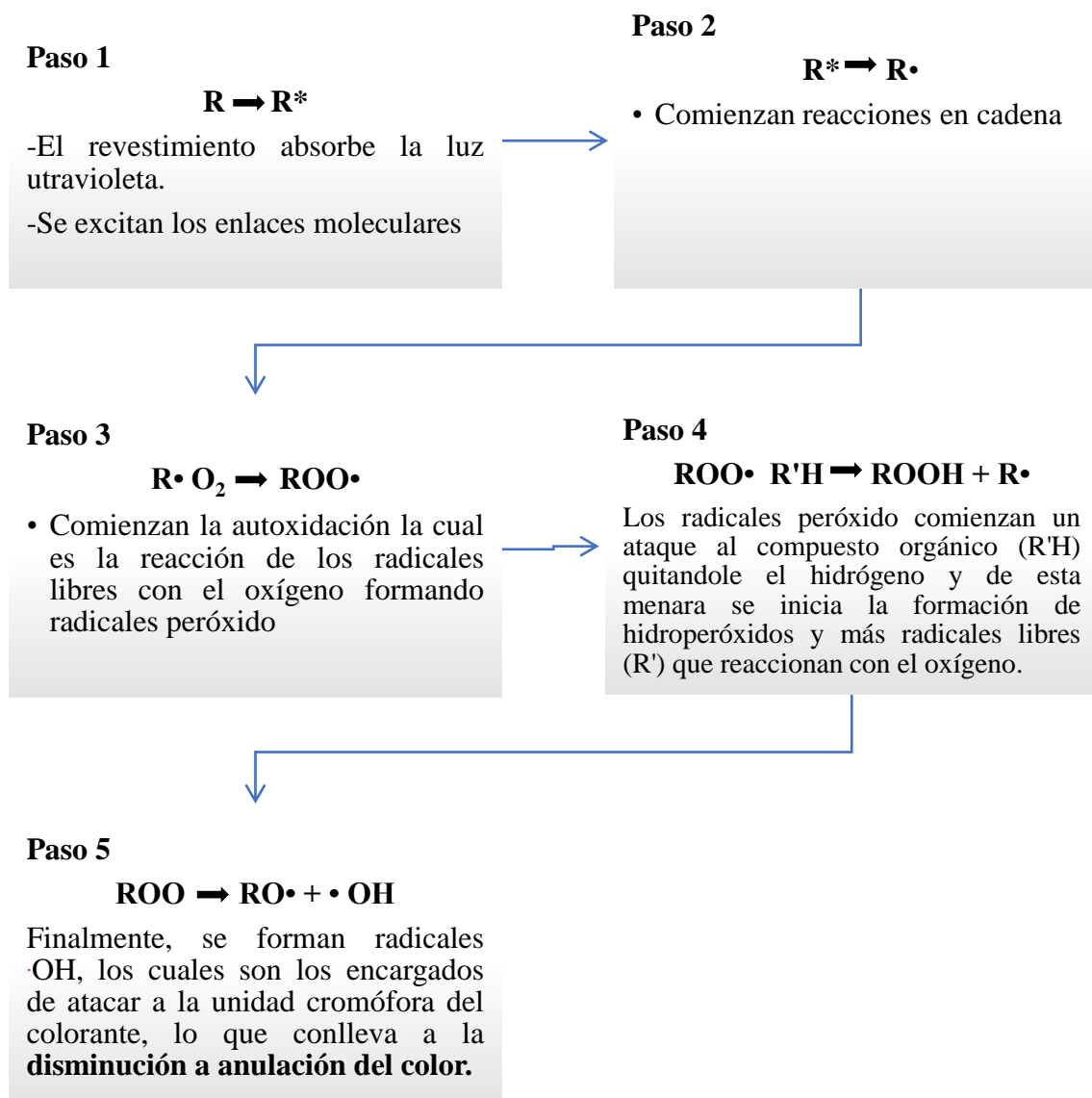


Figura 1.24 Degradación de un colorante al exponerse a una luz ultravioleta

Fuente: Elaboración propia, 2022

1.4.1 Fotocatalizadores

Un fotocatalizador permite realizar una reacción fotoquímica con catálisis con el objetivo de alcanzar o acelerar una reacción química, en otras palabras, estos convierten a la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador,

los cuales son materiales semiconductores. Durante este proceso se llevan a cabo reacciones de tipo redox.

El fundamento es la activación de la superficie de un fotocatalizador por medio de la radiación y formación de portadores electrón-hueco. Al aportar la energía necesaria al material semiconductor por medio de fotones para excitar a los electrones, estos se mueven de la banda de valencia a la banda de conducción (Figura 1.25), dejando huecos los cuales se encargan de oxidar moléculas donantes y reaccionar con las moléculas del agua a fin de producir radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) los cuales son responsables de la degradación de contaminantes.

Por otro lado, los electrones que se encuentran en la banda de conducción reaccionan con el oxígeno disuelto para formar iones superóxido, los cuales inducen a las reacciones tipo redox, donde se forma peróxido de hidrógeno y posteriormente agua

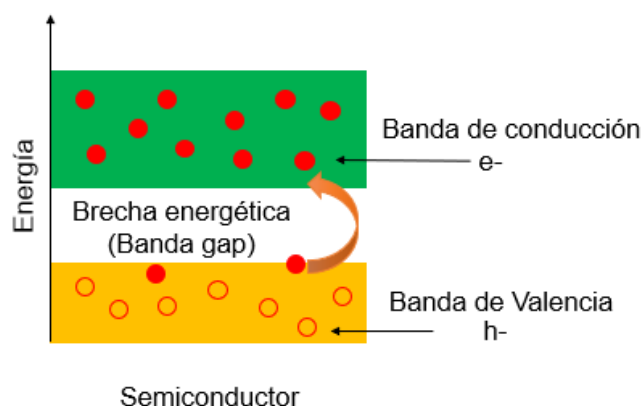


Figura 1.25 Teoría de las bandas para un material semiconductor
Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Rodríguez, *et. al.* 2021.

1.4.1.1 Óxido de zinc

Actualmente existe gran variedad de semiconductores en diversas formas como en placa o polvo. El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor de tipo n y se

localiza en la familia II-VI. Este material ha adquirido gran interés en proyectos de descontaminación ambiental debido a que tiene una alta capacidad oxidativa y de degradación. Es altamente puro, posee buena estabilidad química y nula toxicidad. Además, consta de un ancho de banda óptico de 3.35 eV por lo tanto tiene alta actividad óptica por lo que se utiliza en diversas aplicaciones tecnológicas como en celdas solares o foto-catalíticas.

En este proyecto se utilizó una placa galvanizada comercial con tratamiento térmico para generar ZnO con el objetivo de foto-degradar al colorante rojo carmín, donde se lleva a cabo un proceso de oxidación avanzada previamente mencionado (Figura 1.26). Así mismo se realizó el estudio con la placa sin tratamiento.

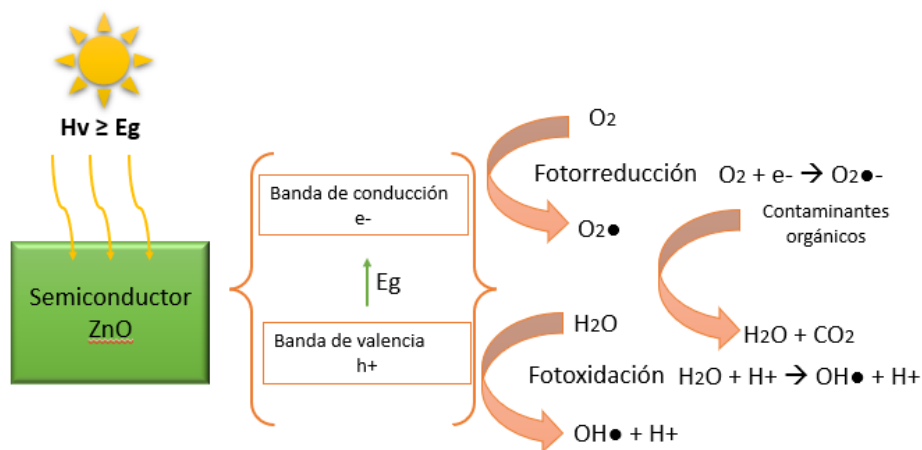


Figura 1.26 Esquema del proceso general para la foto-degradación de contaminantes orgánicos por medio de catalizador semiconductor
Fuente: Elaboración propia, 2022. En base a: Rodríguez, *et. al.* 2021.

- Cruz Martínez, (2021), realizó la síntesis de ZnO por microondas a 50 y 30 potencias para utilizarlo como fotocatalizador y determino que las partículas

se formaron en un tiempo de 20 minutos y su morfología y reacción dependen directamente de la temperatura. Por otro lado, la caracterización EDS mostró rastros de Ca por lo que pudieron deducir que el ZnO no era completamente puro y se apreciaba en su actividad foto-catalítica. También reportaron que mostró buena cinética de reacción para el azul de metileno (50 potencias) y Rodamina (30 potencias).

- Corzo Lucioni (2011), estudió el comportamiento cinético de degradación utilizando ZnO en polvo como fotocatalizador y foto-inducida con luz solar para remover el colorante rodamina B, con agitación constante. Reportó que existe un límite en la concentración de rodamina B, así como también en la concentración de ZnO, para que no se altere o modifique el valor de la constante aparente de velocidad, por lo tanto, determinó que las concentraciones de colorante y fotocatalizador óptimas para lograr un estudio exitoso son 20 mg/L y 0,3 g/100 mL, respectivamente, obteniendo un valor de la constante aparente de velocidad de degradación del colorante rodamina B de $0,1 \text{ min}^{-1}$.
- Gallegos, *et. al.* (2016), realizaron la síntesis de ZnO recuperado de pilas alcalinas agotadas [de pilas alcalinas (aZnO) y de O) y de una mezcla de pilas alcalinas y de Zn/C Zn/C agotadas (mZnO)] mediante precipitación de Zn^{2+} con Na_2CO_3 y posterior calcinación a $500 \text{ }^\circ\text{C}$, previo a un proceso biohidrometalúrgico y determinaron su efectividad como fotocatalizador empleando azul de metileno (a 10 ppm) como contaminante, los datos obtenidos arrojaron valores de degradación de azul de metileno cercanos al 60%, después de 2 h de irradiación con lámparas que emiten en la región del UVB.
- Chávez Sánchez, (2018), realizó el estudio de la actividad foto-catalítica de colorantes en nanopartículas de cobre (Cu) a 2.5, 5 y 7.5 % soportados en

ZnO, obtenidos por el método de impregnación a volumen incipiente, quien reportó 98 % de remoción para el azul de metileno (Am) en 30 min y 98 % naranja de metilo (Nm) en 90 min utilizando Cu a 5 %; mientras que para 2.5 y 7.5 % no reportó degradación.

1.5 Técnicas de caracterización para la determinación de foto-degradación de los colorantes

1.5.1 Espectrofotometría UV- Vis

La espectrofotometría UV-Vis es una técnica utilizada para análisis cualitativos y cuantitativos a fin de determinar la presencia y las cantidades de ciertas sustancias respectivamente. Se basa en absorber el máximo de luz a determinada longitud de onda, donde se da una relación entre la sustancia y su espectro UV-VIS. Es decir, cuando la luz incide en un objeto, este puede absorber dicho haz ya que se da una excitación electrónica, y el resto de la luz se transmite o bien, atraviesa el objeto.

En estos dispositivos, la transmitancia se mide con la división del espectro de intensidad de la luz transmitida a través del blanco (I) entre el espectro de intensidad de la luz transmitida a través de la muestra (I_0)

$$T = I / I_0 \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Aunado a esto, la absorbancia (A) o densidad óptica (DO), se establece como la cantidad de luz absorbida por el objeto y puede expresarse como:

$$A = -\log (T) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

La región UV está comprendida en un rango de longitud de onda de 195 a 400 nm, y generalmente la fuente de radiación ultravioleta en estos dispositivos es generada por una lámpara de deuterio.

En la región visible se puede apreciar el color de una solución y corresponde a longitudes de onda que transmite y no absorbe, está comprendida en el rango de los 400 a los 700 nm y la fuente de generación suele ser una lámpara de tungsteno la cual no proporciona energía por debajo de los 320 nm.

A continuación, se muestra una tabla de las longitudes de onda de los colores:

Tabla 4. Longitudes de onda de diferentes tipos de radiación electromagnética
(Fuente: Díaz *et al*, 2020)

Longitud de onda	Color que se absorbe	Color que se transmite
390-435	Violeta	Amarillo verdoso
435-490	Azul	Amarillo
490-580	Verde	Rojo
580-595	Amarillo	Azul
595-650	Naranja	Azul verdoso
650-780	Rojo	Verde azulado

El rojo carmín utilizado en esta investigación comprende una longitud de onda de 501-507 nm.

1.5.2 Espectroscopía infrarroja

El principio fundamental de la espectroscopía infrarroja se establece en excitar las moléculas al momento que se hace incidir un haz de luz infrarrojo sobre ellas, ya que estas absorben la radiación lo cual provoca una vibración intramolecular que aumenta de intensidad; a partir de esto, se generan señales con frecuencias correspondientes a la vibración de un enlace específico (la frecuencia inicial es igual a la de la radiación infrarroja), esto quiere decir, que cada material absorbe una o varias longitudes de onda específicas según sea su especie y sus características.

Cabe destacar, que la región del infrarrojo cercano está comprendida entre los 4000 y 14000 cm^{-1} mientras que en el infrarrojo lejano son frecuencias menores a los 650 cm^{-1} .

Por otro lado, el ATR (Attenuated Total Reflection) es una técnica de muestreo, que se encuentra incluida en el espectroscopio infrarrojo, se basa fundamentalmente en un alto de índice de refracción a cierto ángulo que se produce cuando el haz de infrarrojo entra en un cristal ATR (transmisor ópticamente denso). Este, crea una ola evanescente de (0.5 – 5 μm) la cual se extiende por toda la superficie y parte interna del cristal (donde se encuentra contenida la muestra a caracterizar); aunado a esto, es importante que la reflectancia interna tenga un índice de reflectancia significativamente mayor, además de tener un buen contacto entre la muestra y el cristal.

La identificación de frecuencias de las bandas de absorción de los grupos funcionales en la estructura química del colorante rojo carmín se analizó utilizando el FT-IR Brunker, modelo TENSOR 27 en el intervalo de absorción de 4000 a 400 cm^{-1} y se ha reportado que el número de onda infrarroja para este compuesto se encuentra en un rango de 1367.24 a 1411.25 cm^{-1} .

JUSTIFICACIÓN

Las acciones realizadas para recuperar la calidad del agua se basan en procesos físicos, químicos y biológicos, todos presentan pros y contras, sin embargo, siempre se aplican con la finalidad de aminorar los efectos adversos originados en la salud humana y el ambiente, por contaminantes de diversa naturaleza presentes en cuerpos hídricos, lo que en países del tercer mundo constituye una de las principales causas de morbi-mortalidad de la población.

En el mismo sentido, el uso de energía solar es una solución posible para la descontaminación de aguas residuales en regiones de alta insolación, como México. De acuerdo con información del Atlas Global Solar, el país se encuentra entre los principales con mayor radiación a nivel global, con 5.5 kWh/m² en promedio, debido a su ubicación dentro del cinturón solar (García, 2019. Recuperado de: <https://www2.deloitte.com/>. En: agosto 2020).

De acuerdo con los antecedentes planteados en este proyecto de investigación, los destiladores solares se han aplicado principalmente para la desalinización de agua marina con la subsecuente obtención de agua dulce. Sin embargo, su aplicación y utilidad para la degradación de contaminantes (específicamente colorantes como el rojo carmín cuyos efectos tóxicos a la salud y el ambiente están claramente identificados) empleando un captador que aumente la velocidad de transferencia de energía térmica y por ende la temperatura, no ha sido ampliamente estudiada.

Es así como, la tecnología mediante dispositivos destiladores que aprovechan la energía radiante aplicada al tratamiento de aguas contaminadas (Tanveer, 2013), posee ventajas técnicas, económicas y ambientales sobre otros procesos que demandan alto consumo energético, además del bajo o nulo costo de operación y mantenimiento. Concomitantemente, sus eficiencias son altas, gracias a la

capacidad de dichos equipos para calentar fluidos a una temperatura de hasta 400 °C (en casos muy favorables) con producciones de agua dulce que alcanzan hasta 0.6 L/h.m² de superficie expuesta al sol e irradiancia de 1 kWh⁻¹ (Sivakumar y Sundaram, 2013).

Por otro lado, La presencia tanto de colorantes como contaminantes frecuentes del agua, reviste particular importancia, ya que éstos son ampliamente utilizados en una gran variedad de industrias, principalmente textil, alimenticia, farmacéutica, curtiduría, vidriera y la relacionada con procesos de manufactura de plásticos (Gebhardt et al., 2020; Lutamyo et al., 2020). Los impactos ambientales que se generan cuando dichas sustancias están presentes en cuerpos de agua, implican un desafío en el empleo de tecnologías adecuadas para su remoción, dada su compleja estructura química, toxicidad y poca o nula biodegradabilidad.

En general, éstos compuestos son fotosensibles, por lo que al exponerse a la luz solar experimentan una degradación disminuyendo consecuentemente la intensidad del color en el agua, el cual es uno de los principales parámetros organolépticos que deben abatirse para lograr la calidad adecuada según el uso al que se destine. Al respecto cabe señalar que los estudios efectuados, se han llevado a cabo a temperatura ambiente, sin evaluar a profundidad el efecto de una mayor transferencia de energía térmica que aumente la temperatura y velocidad de fotodegradación de los colorantes azoicos; Yslas (2018) reporta que el colorante sufre una degradación del 69 % en 120 min a condiciones y temperaturas ambientales. Así, se propone un sistema de calentamiento y destilación solar para acelerar el proceso térmico con el objetivo de obtener una mayor cinética de degradación de dichos colorantes.

En este sentido, el presente proyecto de investigación representa una importante oportunidad de incursión en esta área ofreciendo una alternativa sustentable para mejorar la calidad del agua y al mismo tiempo la mitigación de emisiones que contribuyen al calentamiento global, ya que se aprovecha la radiación solar para la degradación de colorantes.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el porcentaje de degradación del rojo carmín mediante la implementación de un proceso en flujo continuo basado en un sistema acoplado de calentamiento y destilación solar, para mejorar la calidad del agua contaminada por dicho colorante.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño y fabricación del sistema acoplado de flujo continuo de calentamiento y destilación solar para el tratamiento de aguas que contengan al colorante rojo carmín.
- Determinar los parámetros de operación para el sistema acoplado de calentamiento y destilación solar por medio de la evaluación de temperatura alcanzada en el calentador y el destilador solar utilizando una disolución de colorante y agua destilada de laboratorio.
- Determinar la calidad del agua residual antes y después del tratamiento, mediante la determinación de los parámetros: color, pH, conductividad, turbidez, contenido de carbono orgánico total, sólidos disueltos totales, concentración de aniones-cationes y DQO.
- Evaluar el porcentaje de degradación del colorante en disolución acuosa mediante el empleo del método analítico espectrofotometría UV-Vis y espectroscopía infrarroja (IR).

HIPÓTESIS

Empleando un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar, es posible degradar hasta un 90%, el rojo carmín y mejorar la calidad del agua contaminada por dicho colorante.

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y métodos

2.1.1 Materiales, equipo y reactivos

- Lámina de Aluminio H14 3003 C-12 1219 x 3048 mm
- Vidrio sin distorsión óptica 420 x 460 mm
- Colorante rojo carmín (6-hidroxi-5- [(2-metoxi-5-metil-4-sulfofenil)azo]-2-naftalenosulfonato de disodio)
- Agua destilada
- Agua desionizada
- Espátulas
- Vasos de precipitado de 50 a 1000 mL
- Matraces volumétricos 1000 mL
- Probeta 100 mL
- Pipeta 2 mL
- Viales marca HACH rango 20 a 1500 mg/L DQO
- 1 m de manguera flexible para agua de 1/2"
- Llave para agua 1/2"
- 4 reducciones de 1 a 1/2"
- 1 válvula check de 1/2"
- CPVC 1/2"
- 500 mm de PVC 1"
- Botes de 1 L
- Balanza Analítica
- Flujómetro horizontal marca Shengze Pump & Valve con turbina electrónica
- Conductímetro mS y ppt, marca Hanna, modelo HI99301
- Potenciómetro Milwaukee m102

- Espectrofotómetro rango UV y Visible VE-5100UV
- Espectrofotómetro HACH DR/4000U
- Digestor para viales de DQO
- Crisoles de 50 mL
- Horno marca Felisa FE-291 AD
- Mufla marca Felisa FE-361
- Espectroscopio fotoelectrónico de rayos X, JEOL JPS-9200
- Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6510LV
- Espectrómetro IR-ATR Bruker TENSOR 21.

2.2 Metodología

2.2.1 Preparación del agua residual sintética con colorante rojo carmín

Se preparó una disolución de agua destilada con colorante rojo carmín a una concentración de 25 ppm, para lo cual se pesaron 625 mg de colorante y se agregaron a 250 L de agua destilada de laboratorio (Figura 2.1), con el objetivo de utilizarla como agua residual sintética y someterla a un tratamiento de purificación y foto-degradación del tinte a partir de un sistema de calentamiento-destilación solar utilizando fotocatalizadores de óxido de zinc (ZnO).

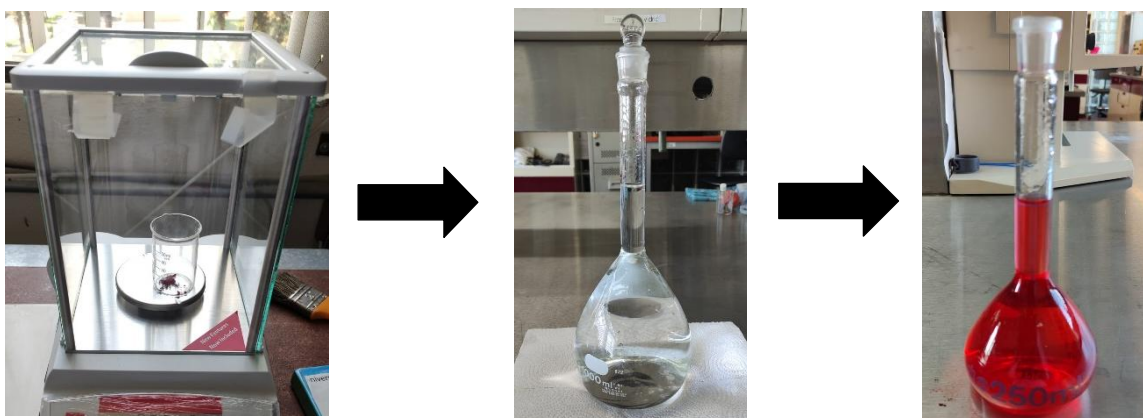


Figura 2.1 Preparación de la disolución de colorante rojo carmín a una concentración de 25 ppm para el proceso de destilación

Fuente: Imagen propia, 2022

A continuación, se describe el proceso de diseño y construcción del destilador solar, así como del sistema acoplado al calentador solar.

2.2.2 Construcción del destilador solar de una sola pendiente

Se diseñó el destilador solar de una sola pendiente por medio del programa AutoCAD con las medidas mostradas en la Figura 2.2 (dicho dispositivo tiene una capacidad máxima de 10 L). Para soportar el intemperismo, la base y paredes del destilador se construyeron con aluminio anodizado (obtenido de la empresa La Paloma Compañía de Metales S. A. de C. V.) y se aislaron con fomi. El destilador consta también de un receptáculo de vidrio flotado de superficie lisa y plana, sin distorsión óptica (Figura 2.3), comprado en una vidriería independiente en la ciudad de Toluca, México; así mismo, dispone de una entrada para el agua residual constituida por un tubo PVC de ¼" y una canaleta de 1" del mismo material. Esta, sirve como colector del agua tratada, la cual es dirigida a la salida del destilador por medio de una manguera, donde se recibe en garrafones de 1 L. Dentro de los parámetros de diseño se consideró una pendiente de 20° para lograr mayor captación de radiación solar y por lo tanto mayor temperatura en la ciudad de Toluca, debido a que dicho lugar se encuentra en una latitud de 19° 17' 29".

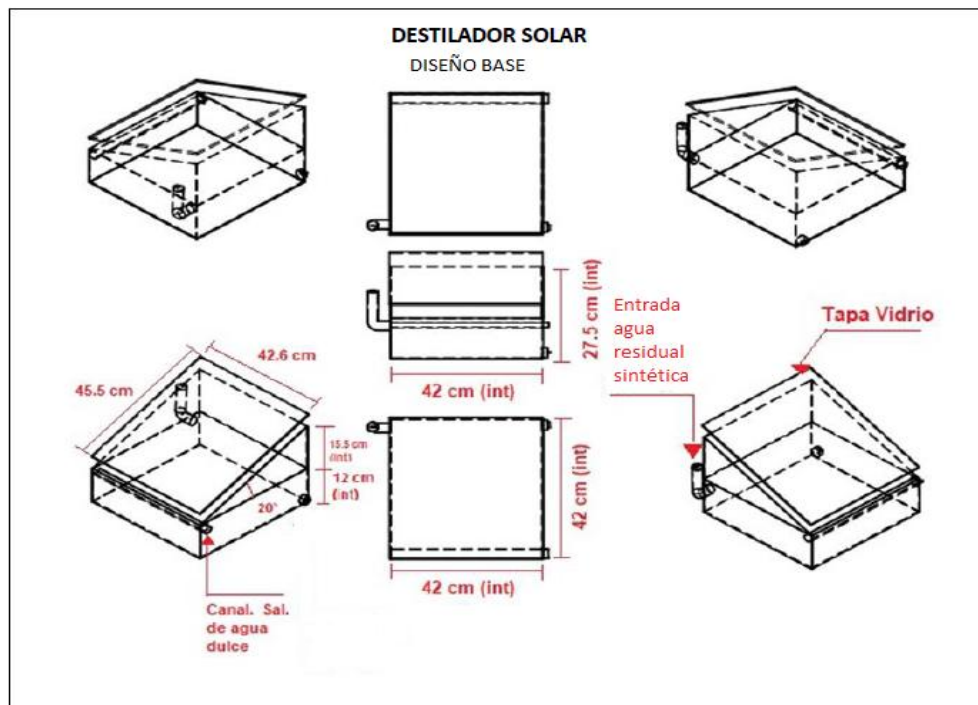


Figura 2.2. Plano estructural del destilador solar de una sola pendiente.
Fuente: Elaboración propia, 2020



Figura 2.3. Ensamble del destilador solar de una sola pendiente
Fuente: Imagen propia, 2020

2.2.3 Evaluación de temperatura y eficiencia

2.2.3.1 En el destilador

Se realizaron diferentes evaluaciones de temperatura en temporada de invierno y primavera en el sistema de destilación solar utilizando agua destilada de laboratorio y disoluciones de colorante rojo carmín a 25 ppm con el objetivo de establecer las condiciones óptimas que permitieran obtener mayor cantidad de agua.

Para la primera evaluación en invierno, se colocaron 1000 mL agua destilada de laboratorio dentro del destilador solar (ver Figura 2.4) a las 9:00 am a una temperatura inicial de 14.2 °C, posteriormente se realizaron tomas de temperatura cada media hora durante 1 día solar (8 h), momento en el cual se midió el agua colectada por medio de una probeta para determinar la eficiencia del destilador. Realizando el mismo procedimiento se colocó una disolución de colorante, para determinar dicho parámetro.

Posteriormente, se realizaron las mismas evaluaciones de temperatura y eficiencia siguiendo el método implementado en temporada de primavera.

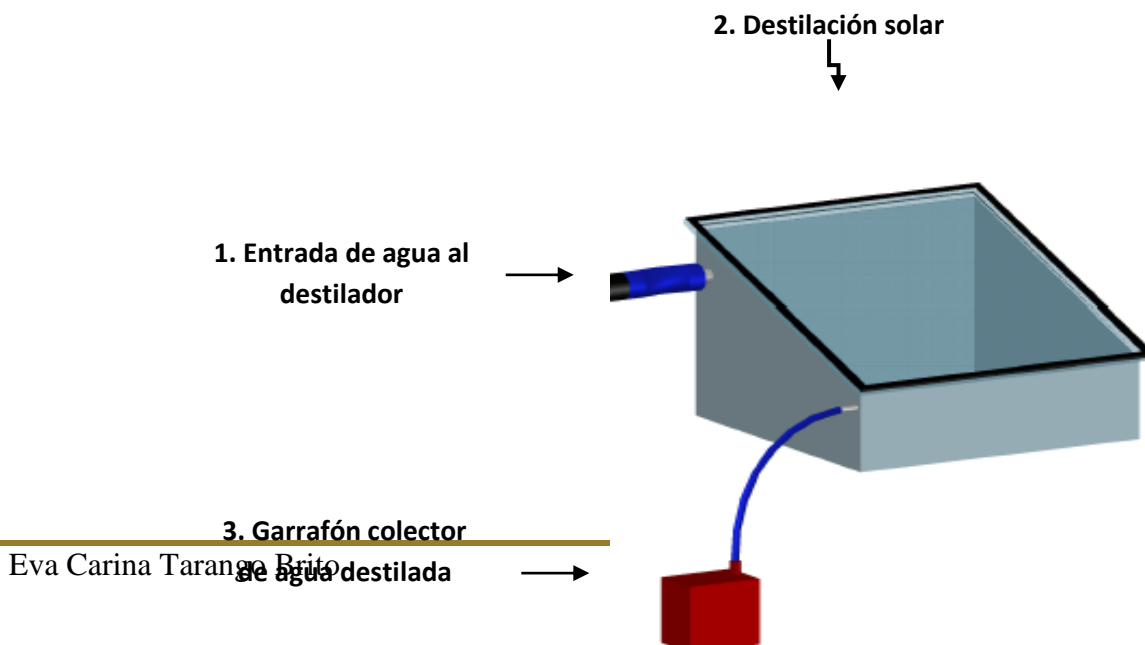


Figura 2.4. Destilador solar simple o de una sola pendiente

Fuente: Elaboración propia, 2022

2.2.3.2 En el calentador solar parabólico

Una vez determinada la eficiencia en el destilador solar, se llevó a cabo la determinación de la temperatura y eficiencia en el sistema acoplado presuponiendo que la cantidad de agua obtenida sería mayor debido al precalentamiento y por lo tanto la eficiencia del destilador aumentaría. Lo anterior se probó mediante evaluaciones de temperatura en el calentador solar parabólico, diseñado y construido previamente por Ramírez, 2020 (ver Figura 2.5), introduciendo 1000 mL de agua destilada a las 9:00 am a una temperatura inicial de 14.3 °C. Posteriormente, se realizaron tomas de temperatura cada media hora con el propósito de alcanzar una temperatura superior a los 80 °C. También, se realizaron valoraciones de dicho parámetro, siguiendo el mismo procedimiento utilizando una disolución de rojo carmín a 25 ppm.

Cabe destacar que ambas evaluaciones se realizaron en temporada de invierno y primavera.



Figura 2.5. Calentador solar parabólico previamente diseñado y construido
Fuente: Ramírez, 2020

2.2.3.3 En el sistema acoplado de calentamiento - destilación solar

Finalmente, una vez determinadas las temperaturas que se pueden alcanzar en ambos dispositivos por separado, se procedió a acoplar el sistema de calentamiento y destilación solar por medio de un canal de manguera conectada con coples de 1" para transferir el agua tal como se muestra en la Figura 2.6, con el propósito de evaluar si dicho parámetro aumentaba en el destilador solar y de esa manera determinar si la cantidad de agua obtenida al final del proceso mejoraba gracias al precalentamiento en el calentador solar parabólico en comparación con el destilador solar simple.

En este sentido, se introdujeron 1000 mL de agua destilada de laboratorio en el calentador solar a las 9:00 am. A las 12:00 pm, se transfirió el agua precalentada al destilador solar donde el tiempo de retención fue de 5 h. Antes de la puesta del sol y al final del proceso se midió el agua colectada en una probeta, para compararla con la obtenida anteriormente en el destilador solar simple. Por otro lado, siguiendo el mismo procedimiento, se realizó la evaluación con una disolución de rojo carmín a 25 ppm. Dichos experimentos se realizaron en los períodos de invierno y primavera.

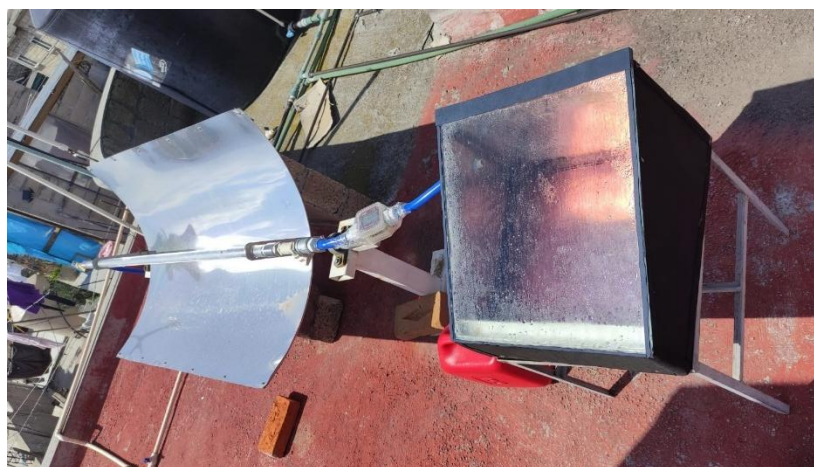


Figura 2.6. Sistema acoplado de calentamiento- destilación solar

Fuente: Imagen propia, 2022

2.2.4 Optimización de parámetros

Una vez determinadas las temperaturas y la cantidad de agua obtenida de ambos procesos (destilador solar simple o de una sola pendiente y el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar), se procedió a la optimización de los parámetros iniciales de operación para el sistema acoplado (calentamiento-

destilación solar), con el objetivo de obtener mayor cantidad de agua destilada y por lo tanto, mejorar la eficiencia. Para tal efecto, se realizaron cuatro mediciones a las mismas condiciones de temperatura, variando el volumen de agua inicial ($V_0 = 1000, 750, 500$ y 250 mL).

En primera instancia, se introdujeron 1000 mL de agua destilada de laboratorio al calentador solar parabólico a una temperatura inicial (T_0) de 14.0 °C, precalentándose hasta 81 °C. Una vez alcanzada esta temperatura (a las 12:00 pm), se envió el agua al destilador solar, donde al final del proceso se midió la cantidad obtenida (V_f). Siguiendo el mismo procedimiento, se colocaron 750, 500 y 250 mL, bajo idénticas condiciones de operación. Estos experimentos se realizaron en temporada de primavera e invierno.

En las mismas épocas del año e iguales condiciones, también se llevaron a cabo determinaciones con una disolución de rojo carmín (concentración 25 ppm) utilizando 1000, 750, 500 y 250 mL.

2.2.5 Estudio de la fotodegradación del colorante rojo carmín a partir del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar.

Una vez obtenidos los parámetros óptimos del sistema acoplado, se procedió a realizar un tratamiento con el objetivo de determinar la foto-degradación de este colorante azoico. Para lograr lo anterior, se armó el dispositivo tal como se describió en la sección 2.2.3.3, modificándolo mediante el uso de una placa galvanizada; en este sentido, se efectuaron dos experimentos:

a). Con placa galvanizada sometida a tratamiento térmico efectuado a una temperatura de 500 °C por 2 h en una mufla marca Felisa, modelo FE-361. Lo anterior con la finalidad de producir óxido de zinc, ya que se ha comprobado en estudios previos que éste tiene propiedades fotocatalizadoras (Ballesteros Balabuena, *et. al.* 2020).

b). Con placa galvanizada sin tratamiento térmico, con el objetivo de determinar si el recubrimiento de zinc por sí sólo tiene potencial para emplearse como fotocatalizador y acelerar la degradación del colorante.

Ambas placas fueron caracterizadas mediante XPS modelo JEOL JPS y MEB modelo JEOL JSM-6510LV.

El procedimiento consistió en ingresar al calentador solar, una disolución de 250 mL de rojo carmín a una $T_0 = 14.3$ °C hasta que alcanzó los 80 °C; lo anterior sucedió a las 11:00 h. Posteriormente se trasladó al destilador, donde se realizaron los dos experimentos mencionados. En este caso, se tomaron muestras del agua residual sintética contenida en el dispositivo cada media hora durante un lapso de 2 h, para su posterior caracterización mediante un espectrofotómetro UV-VIS VE-5100UV y un espectrómetro IR-ATR Bruker TENSOR 21.

Enseguida, se procedió a realizar la evaluación de la calidad de agua residual y destilada captada al final de dicho tratamiento, con el objetivo de determinar su posible uso para actividades antropogénicas.

2.2.6 Evaluación de la calidad del agua

Se llevó a cabo mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos tomando como base la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 la cual “establece los límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”: la NOM-003-SEMARNAT-1997: la cual “establece los límites máximos permisibles con contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público” y la NOM-001-SEMARNAT-2021 que “establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación”.

2.2.6.1 pH

Se determinó siguiendo el fundamento de la norma NMX-AA-008-SCFI-2016: “Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”, utilizando un potenciómetro marca Milwaukee m102, el cual se calibró a valores de 4.01 y 7.01. Posteriormente se efectuó la medición en el agua sintética inicial (25 ppm de colorante rojo carmín), agua destilada y en el residuo colectado al final del proceso.

2.2.6.2 Conductividad

Realizado de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma NMX-AA-093-SCFI-2000: “Determinación de la conductividad electrolítica”, por medio de un conductímetro marca Hanna modelo HI99301, el cual mide conductividad y sales totales disueltas hasta 20 mS/cm. El equipo se calibró con un patrón de 12.88 mS/cm efectuando, las determinaciones para las mismas soluciones descritas en el punto anterior.

2.2.6.3 DQO

Este parámetro se efectuó de acuerdo con el fundamento establecido en la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011 (“Método de tubo sellado a pequeña escala”. En primer lugar, se precalentó la placa de calentamiento a 150 °C, después se agitaron los tubos sellados o viales HACH (rango 20 a 1500 mg/L) hasta homogeneizar el contenido, procediendo de la misma manera con las muestras a analizar, es decir, la del agua inicial a 25 ppm de colorante rojo carmín, el agua destilada tratada y agua residual colectada al final del proceso. Posteriormente, se tomó un volumen de 2 mL de cada una de ellas que se colocó en los viales, tapando firmemente y se mezcló el contenido invirtiendo suavemente el tubo varias veces. Después los tubos se llevaron a la placa digestora ya precalentada durante 2 h. Una vez transcurrido el tiempo, éstos se retiraron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para finalmente ser leídos en el espectrofotómetro UV-Vis marca HACH DR/4000U.

2.2.6.4 Turbiedad

Dicho parámetro se evaluó siguiendo el fundamento de la norma NMX-AA-038-SCFI-2001: “Análisis de agua - determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”, para lo cual, las muestras se agitaron vigorosamente a fin de homogeneizarlas y se colocaron cada una en una celda, para ser leídas en el espectrofotómetro HACH DR/4000U el cual contiene el programa establecido para determinar este parámetro.

2.2.6.5 Sólidos totales

Se determinaron a partir del fundamento establecido en la NMX-AA-034-SCFI-2015: “Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”. En primer lugar, se llevaron tres crisoles a un horno marca Felisa, modelo FE-291 AD durante 20 min a 103-105 °C; después se enfriaron en un desecador durante 20 min y se pesaron en una balanza analítica. Se repitió el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia ≤ 0.0005 g en dos pesadas consecutivas (tomando en cuenta el último valor de peso registrado considerado como P_1). Posteriormente se colocaron 50 mL de cada una de las muestras a analizar y se llevaron al horno para su evaporación a una temperatura de entre 100 y 105 °C. Después, se enfriaron en el desecador otros 20 min y finalmente se pesaron en una balanza analítica (P_2). Se realizaron los cálculos a partir de la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{P_1 - P_2}{Vol.de muestra} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

ST= Sólidos totales [mg/L]

P_1 = Peso constante del crisol [mg]

P_2 = Peso del residuo seco más el peso del crisol [mg]

Vol. = Volumen de la muestra [L]

2.2.6.6. Espectrofotometría UV-VIS

Se realizaron las lecturas de las dos muestras de agua antes mencionada con el objetivo de determinar la ausencia del colorante rojo carmín por medio del espectrofotómetro UV-VIS marca VELAB modelo VE-5100UV.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

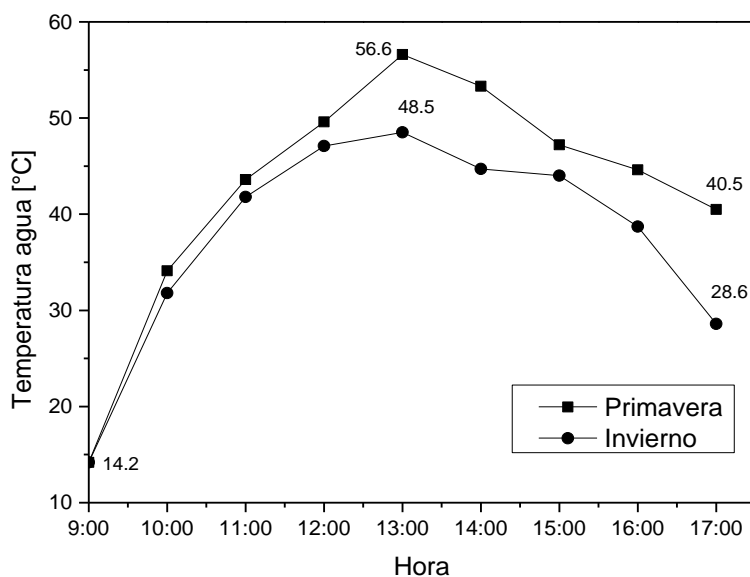
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación de temperatura y eficiencia

3.1.1 En el destilador solar

En la Gráfica 1 se muestran los datos obtenidos en el tratamiento de destilación utilizando agua destilada de laboratorio, donde se puede observar que en temporada de primavera la temperatura aumenta con el transcurso del tiempo, alcanzando un valor máximo de 56.6 ± 2 °C a las 13:00 pm. En seguida, se observa un descenso, hasta llegar a los 40.5 ± 2 °C al final del proceso, momento en el cual se colectó y midió el volumen destilado en una probeta, obteniéndose 157 mL a partir de una muestra de 1000 mL. Por otro lado, en temporada de invierno, la temperatura tiene la misma tendencia, sin embargo, se alcanza una temperatura máxima menor (48.5 ± 2 °C) con una subsecuente disminución hasta llegar a 28.6 ± 2 °C a las 17:00 pm. En este caso, la cantidad de agua destilada final obtenida fue de 115 mL.

Por lo tanto, en condiciones climáticas muy favorables (primavera) la eficiencia obtenida es mayor que en invierno (15.7 y 11.5 % respectivamente). Cabe notar que dicho parámetro tiene un incremento del 4.2 % en clima cálido en comparación con el clima frío de la ciudad de Toluca.

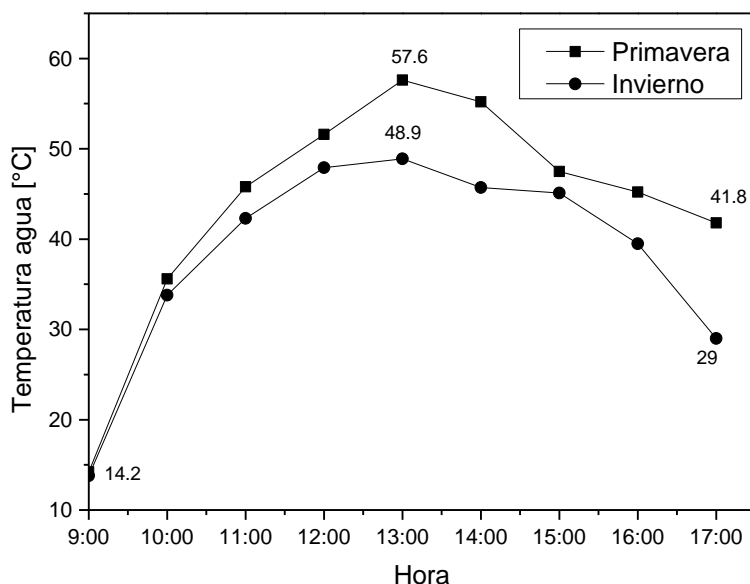


Gráfica 1. Determinación de temperatura en el destilador solar con agua destilada
Fuente. Elaboración propia, 2022

En la Gráfica 2, se muestran los datos obtenidos a partir del tratamiento utilizando una disolución de rojo carmín a 25 ppm. En primer lugar, se puede observar que en temporada de primavera la temperatura aumenta con el transcurso del tiempo, alcanzando una temperatura máxima de 57.6 ± 2 °C a las 13:00 pm. En seguida, se observa un descenso, hasta llegar a un valor de 41.8 ± 2 °C al final del proceso, momento en el cual se midió la cantidad destilada que se colectó, obteniéndose 161 mL a partir de una muestra de 1000 mL. Por otro lado, en temporada de invierno la temperatura muestra el mismo comportamiento, sin embargo, se alcanza una temperatura máxima de 48.9 ± 2 °C, y en seguida una disminución hasta llegar a 29 ± 2 °C a las 17:00 pm. En este caso, la cantidad de agua destilada final obtenida fue de 120 mL.

Así que, en condiciones climáticas muy favorables en temporada de primavera el porcentaje de eficiencia alcanzada fue del 16.1 % y en invierno de 12 %. Por lo

tanto, hay un incremento de eficacia de hasta 4.1 % en clima cálido en comparación con clima frío en la ciudad de Toluca.



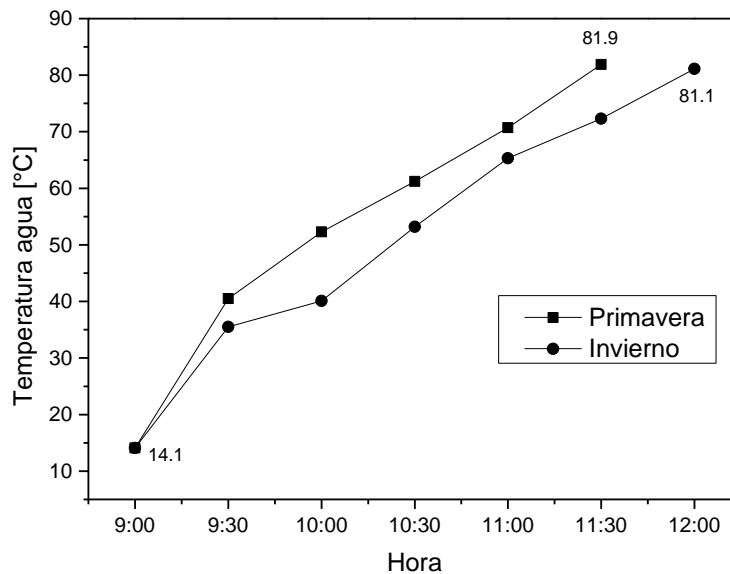
Gráfica 2. Determinación de temperatura en el destilador solar con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm
Fuente. Elaboración propia, 2022

En general, hay una mejora significativa en el proceso de destilación en la época de primavera. También, las características del agua utilizada para realizar el proceso de destilación influyen, ya que, se puede observar que con una disolución de rojo carmín a 25 ppm se favorece la eficiencia hasta un 0.5 % en primavera en comparación con el 0.4 % obtenido en invierno.

3.1.2 En el calentador solar parabólico

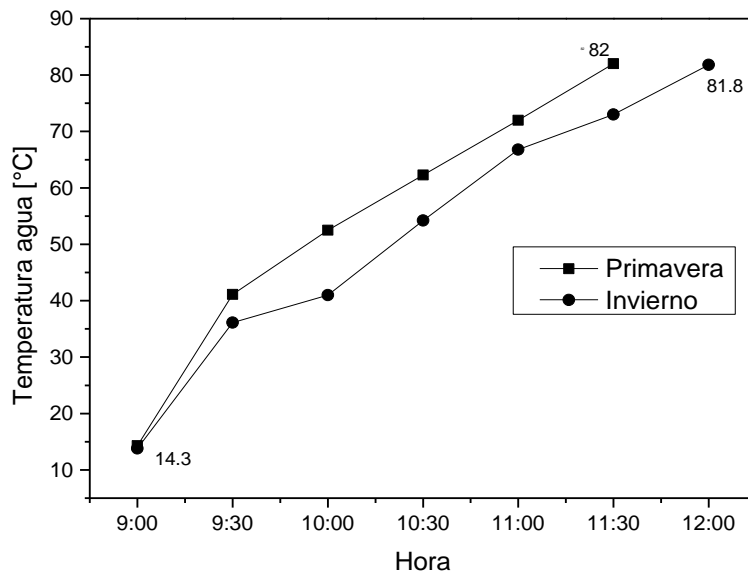
En la Gráfica 3 se muestra la variación de temperatura del agua destilada de laboratorio. Es importante notar que este parámetro aumenta significativamente en la primavera, ya que alcanza un máximo de 81.9 ± 2 °C a las 11:30 am en menor tiempo de exposición al sol en comparación con el experimento realizado en

temporada de invierno, donde la temperatura máxima fue de 81.1 ± 2 °C a las 12:00 pm.



Gráfica 3. Determinación de temperatura en el calentador solar parabólico con agua destilada de laboratorio
Fuente. Elaboración propia, 2022

Por otro lado, la Gráfica 4 muestra los datos obtenidos del experimento realizado con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm en la que se nota una tendencia similar a los resultados de la Gráfica 3, no obstante, hubo un incremento de temperatura del 0.12 % en comparación con el realizado con agua destilada de laboratorio.

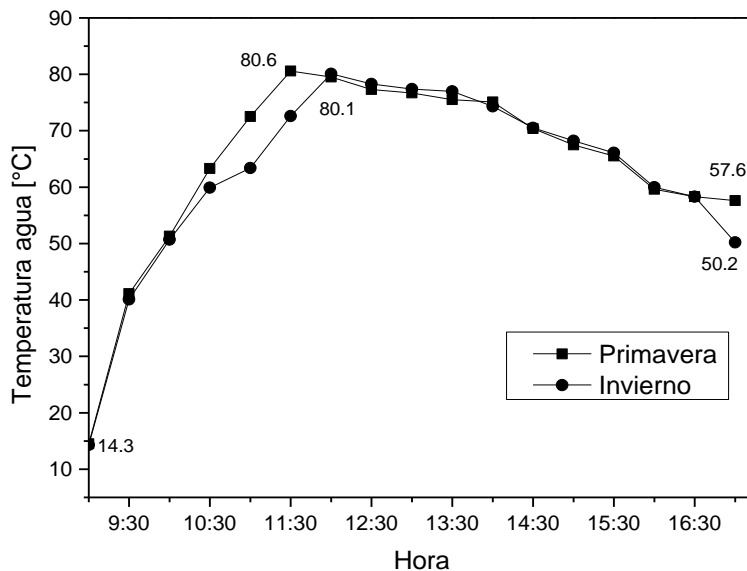


Gráfica 4. Determinación de temperatura en el calentador solar parabólico con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm
Fuente. Elaboración propia, 2022

3.1.3 En el sistema acoplado de calentamiento y destilación solar

En la Gráfica 5 se muestran los datos obtenidos utilizando agua destilada de laboratorio. Es posible ver que la temperatura del agua en ambas temporadas con precalentamiento, se mantuvo por encima del valor alcanzado con el destilador solar simple. Aunado a esto, en temporada primaveral para el agua destilada de laboratorio se obtuvieron 292 mL al final del proceso a partir de 1000 mL de agua inicial y una eficiencia de 29.2 %. Como puede observarse se mejoró el proceso en un 13.5 % comparado con la destilación de agua sin precalentamiento.

Sin embargo, para la temporada invernal se obtuvieron 250 mL, la cual tuvo una mejora del 14.5 % en comparación con el total de agua obtenida en el destilador solar simple.

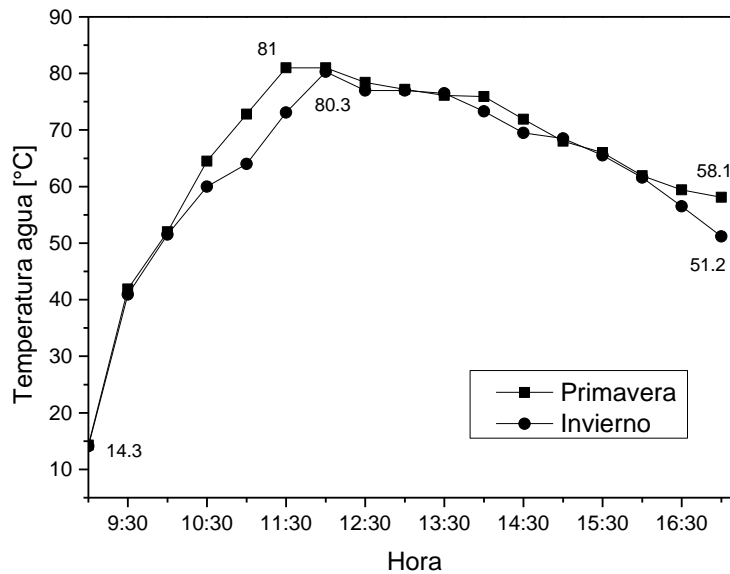


Gráfica 5. Determinación de temperatura en el destilador solar utilizando agua destilada de laboratorio a partir de un precalentamiento de agua por medio de un calentador solar parabólico

Fuente. Elaboración propia, 2022

Por otro lado, en la Gráfica 6 se presentan los datos capturados utilizando una disolución de rojo carmín a 25 ppm. Se aprecia un aumento en la temperatura máxima alcanzada de hasta 0.5 % en comparación con el proceso realizado con agua destilada de laboratorio. En este caso, el agua destilada tratada al final del proceso en temporada primaveral fue de 297 mL y en invierno de 255 mL, mejorando un 13.6 y 13.5 % respectivamente en comparación con los resultados reportados en el proceso de destilación simple.

En general, se puede asumir que el tratamiento de agua a partir de un sistema acoplado de calentamiento y destilación solar aumenta su eficiencia hasta un 0.5 % utilizando una disolución de colorante debido a la presencia de sales.



Gráfica 6. Determinación de temperatura en el destilador solar con una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm a partir de un precalentamiento de agua por medio de un calentador solar parabólico
Fuente. Elaboración propia, 2022

3.2 Optimización de los parámetros de operación del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar.

Con el procedimiento descrito anteriormente, fue posible obtener los parámetros óptimos en el destilador para tener la máxima eficiencia de 87.2 % en el proceso durante las dos épocas del año estudiadas en este proyecto: temperatura inicial (T_0) 14.0 °C (al ingreso del calentador solar parabólico), volumen inicial (V_0) 250 mL y tiempo de residencia (t_r) 5 h. Los datos para los cuatro ensayos descritos se presentan en las Tablas 1 y 2:

Tabla 5. Eficiencia en el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar, variando el volumen de agua destilada de laboratorio inicial.

Fuente. Elaboración propia, 2022

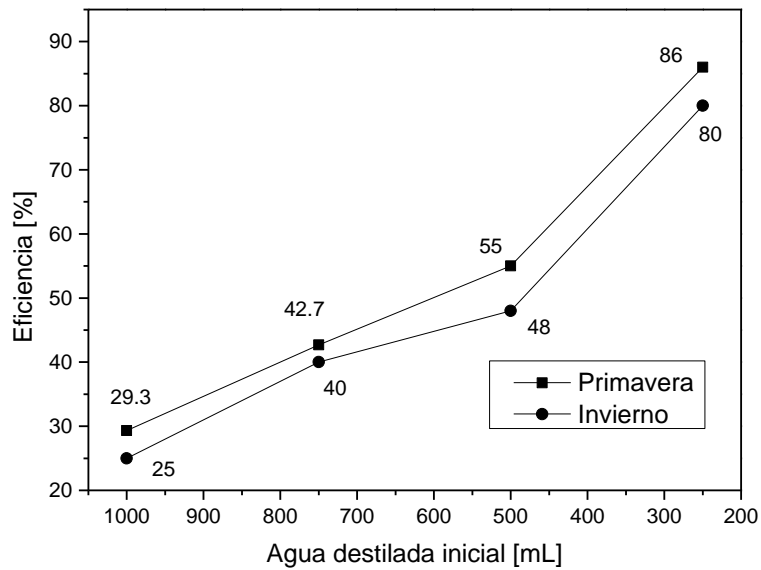
Temporada	V ₀ (mL)	V _f (mL)	Eficiencia (%)
Primavera	1000	292	29.2
	750	320	42.6
	500	275	55.0
	250	215	86.0
Invierno	1000	250	25.0
	750	300	40.0
	500	240	48.0
	250	200	80.0

Tabla 6. Eficiencia en el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar, variando el volumen de una disolución de rojo carmín a 25 ppm.

Fuente. Elaboración propia, 2022

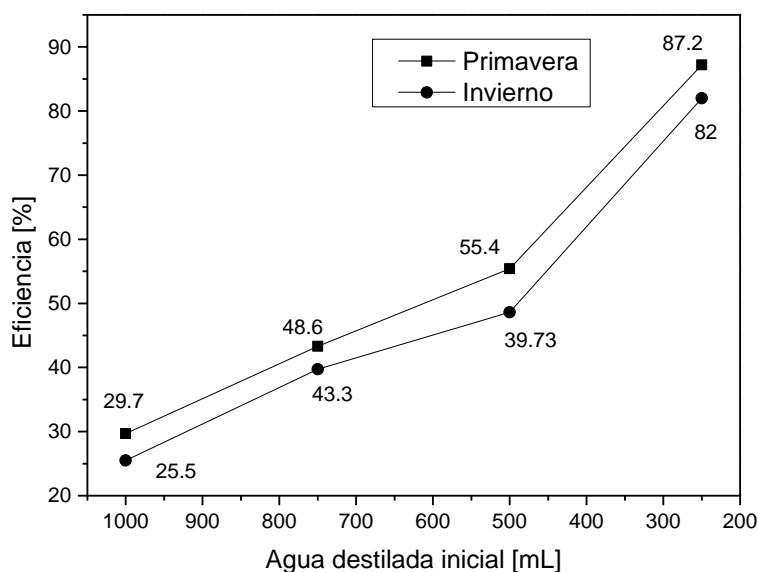
Temporada	V ₀ (mL)	V _f (mL)	Eficiencia (%)
Primavera	1000	297	29.7
	750	325	43.3
	500	277	55.4
	250	218	87.2
Invierno	1000	255	25.5
	750	298	39.7
	500	243	48.6
	250	205	82.0

Por lo tanto, el volumen de agua inicial es inversamente proporcional a la eficiencia del sistema (a menor V_0 , mayor eficiencia), de acuerdo con lo reportado en las Gráficas 7 y 8.



Gráfica 7. Evaluación de la eficiencia en un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar variando el volumen inicial de agua destilada de laboratorio en el proceso.

Fuente: Elaboración propia, 2022



Gráfica 8. Evaluación de la eficiencia en un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar variando el volumen inicial de una disolución de colorante rojo carmín a 25 ppm.

Fuente: Elaboración propia, 2022

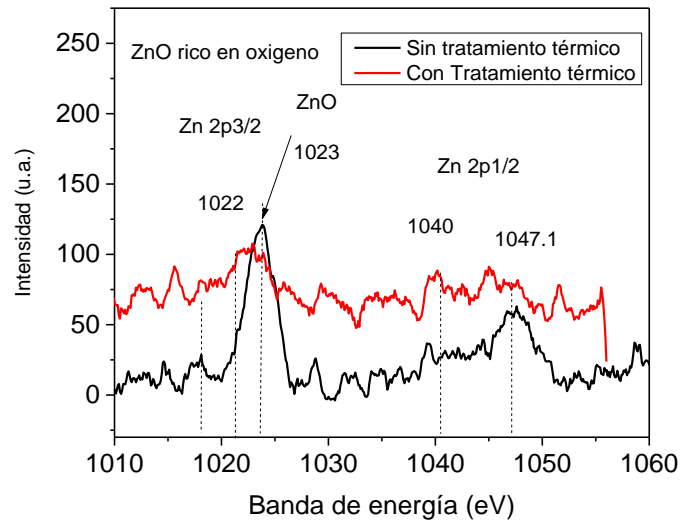
3.3 Caracterización de la placa galvanizada.

3.3.1 Análisis por XPS

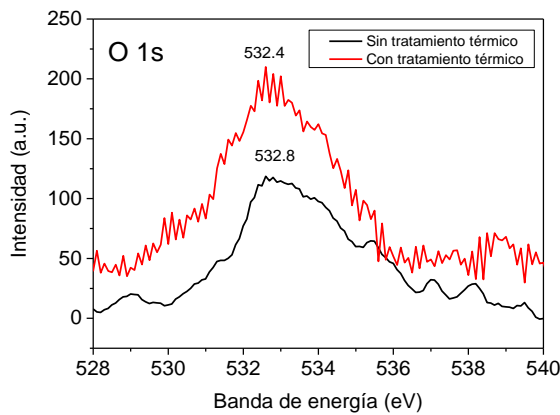
Los espectros XPS de la lámina galvanizada sin tratar y tratada térmicamente se muestran en la gráfica 9 (a-b-c), para la región Zn 2p, la región C1s y la región O 1s, respectivamente. La región Zn 2p se muestra en la gráfica 9. El principal hallazgo en esta región es que la muestra tratada muestra un ligero cambio de 2013 eV a energías de enlace más bajas como 1020 eV después del tratamiento, lo que se asoció con un mayor grado de oxidación del entorno químico de Zn, algunos autores refieren este desplazamiento como ZnO rico en oxígeno.

En la Gráfica 10 (a-b) los espectros de la región C1s están deconvolucionados, en el a) de la muestra sin tratamiento se pueden ver cuatro picos principales ubicados en 284.4, 285.4, 286.8, 288.8 eV, donde el pico centrado cerca de 285 eV se atribuye al carbono adventicio en la muestra, todas las regiones se ajustaron con esta posición; b) muestra el espectro de la muestra tratada, donde se observan los mismos picos deconvolucionados, con un ligero desplazamiento hacia energías de enlace más bajas, también se observa un pequeño cambio en la proporción de picos, aumentando el carbono adventicio como resultado del tratamiento de la muestra y eliminación de pequeñas impurezas orgánicas sobre la muestra.

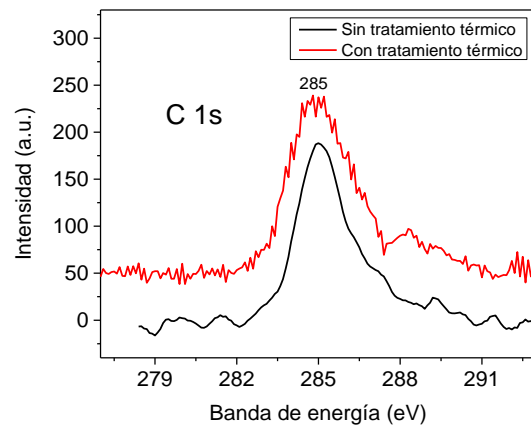
En la gráfica 11 (a-b) los espectros de la región O1s están deconvolucionados en cuatro señales con picos de 530.6, 532.6, 534.2 y 535.4 eV en ambas láminas, los principales cambios se observan en la proporción de picos deconvolucionados, siendo lo más importante el aumento en la proporción de los picos ubicados en 532.6 y 534.2 eV, después del tratamiento, lo que puede explicarse como resultado de un mayor grado en el estado de oxidación de la muestra.



(a)

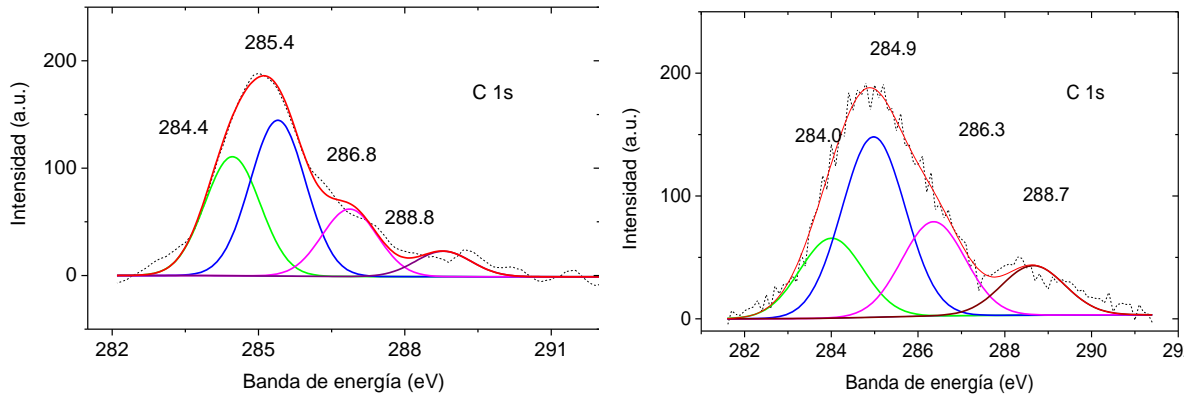


(b)



(c)

Gráfica 9. Espectro general de XPS para la placa galvanizada con y sin tratamiento térmico. (a) Carbono (C), (b) Oxígeno (O), (c) Zinc (Zn). Fuente: Elaboración propia, 2022. Gráficas realizadas con Origin pro 8.0

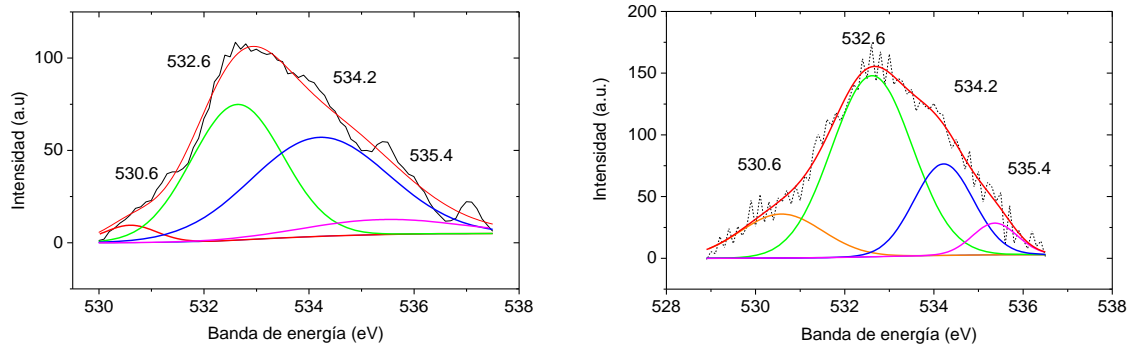


a) Sin tratamiento térmico

b) Con tratamiento térmico

Gráfica 10. Región deconvolucionada de C 1s para la lámina galvanizada a) sin tratamiento térmico y b) con tratamiento térmico

Fuente: Elaboración propia, 2022



a) Sin tratamiento térmico

b) Con tratamiento térmico

Gráfica 11. Región deconvolucionada de O 1s para la lámina galvanizada a) sin tratamiento térmico y b) con tratamiento térmico

Fuente: Elaboración propia, 2022

3.3.2 Análisis por MEB

La Figura 3.1 muestra el análisis morfológico por medio de microscopía electrónica de barrido MEB (3.1a) y el análisis EDS (3.1b) correspondiente a la lámina galvanizada sin tratamiento térmico. En la Figura (3.1a) se observa la superficie del recubrimiento de Zn, además se aprecian zonas lisas y algunas con líneas de defecto que de acuerdo con lo reportado por Ballesteros Balabuena, *et. al.* 2020 se refiere a los límites de grano. Por otro lado, en la Figura (3.1b) se registró la presencia de Al y Fe el cual es el elemento utilizado como sustrato y Zn para el recubrimiento galvánico; también se observa C y O los cuales proceden de moléculas adsorbidas procedentes del ambiente en la superficie de la placa. Este análisis corresponde con lo reportado en el trabajo de investigación de Ballesteros Balabuena, *et. al.* 2020.

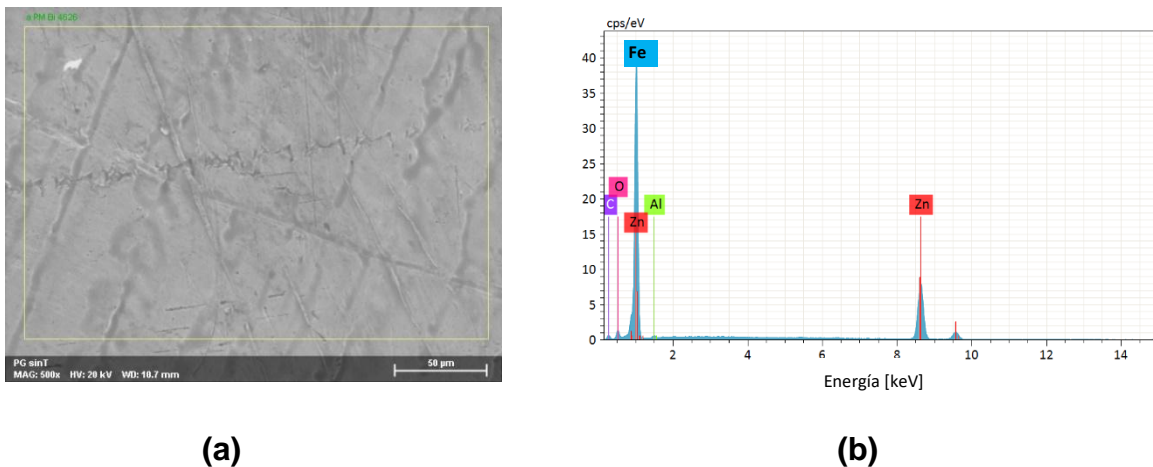


Figura 3.1. (a) Espectro EDS, (b) Micrografía SEM, de la lámina galvanizada sin tratamiento térmico

Fuente: Elaboración propia, 2022

La Figura 3.2 muestra el análisis morfológico por medio de MEB (3.2a) y el análisis EDS (3.2b) correspondiente a la lámina galvanizada con tratamiento térmico a 500 °C. En la Figura (3.2a) se observa aglomeración y dispersión de las partículas de ZnO sobre la superficie de la placa. Por otro lado, en la Figura (3.2b) se registró la presencia de los elementos utilizados como sustrato; también se aprecian C y O absorbidos por la placa a partir del tratamiento al cual fue sometida, este análisis corresponde con lo que reportaron Ballesteros Balabuena, *et. al.* 2020.

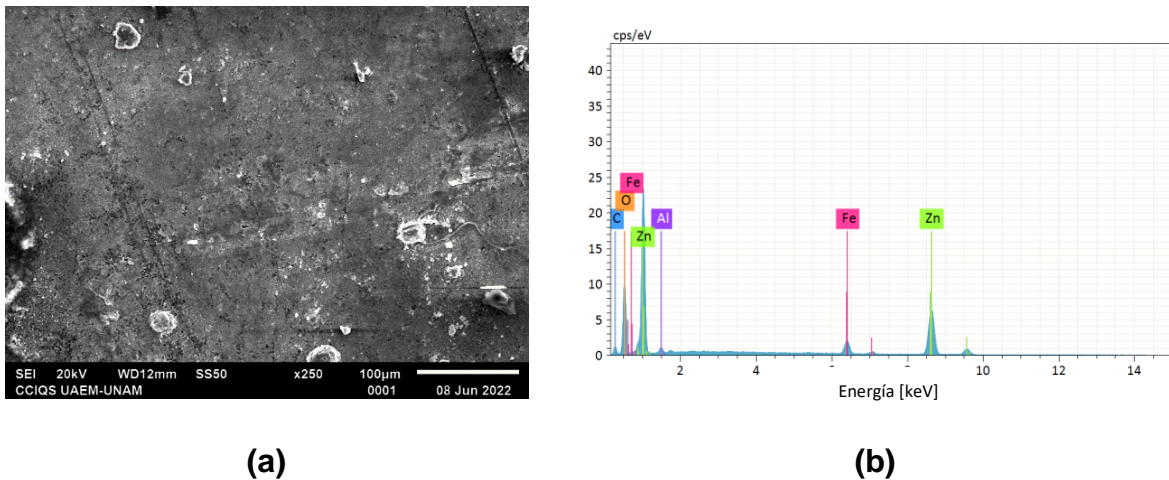


Figura 3.2. (a) Espectro EDS, (b) Micrografía MEB de la lámina galvanizada con tratamiento térmico

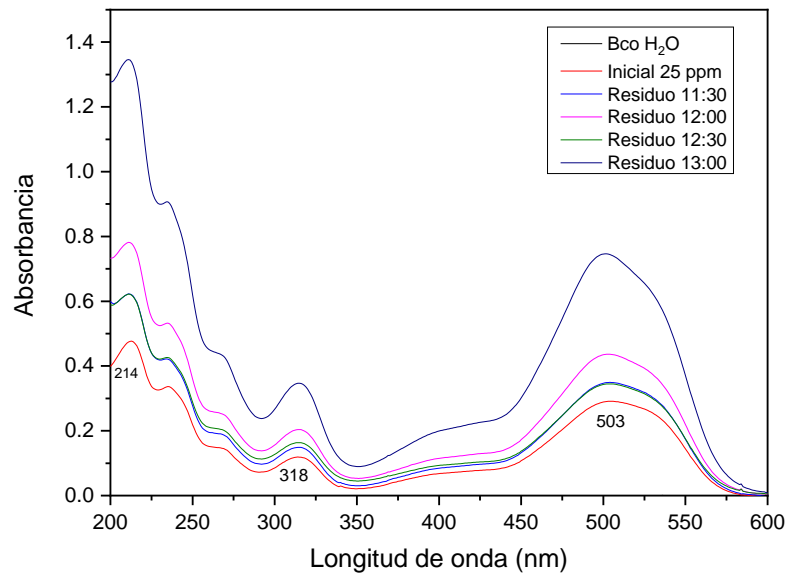
Fuente: Elaboración propia, 2022

3.4 Análisis de la foto-degradación del colorante rojo carmín en solución acuosa tratada a partir del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar.

En primer lugar, se realizó un análisis del tratamiento de la disolución de colorante rojo carmín, con el objetivo de reportar si existe o no foto-degradación sin fotocatalizador. Los resultados se muestran a continuación:

- **Tratamiento realizado sin modificación.**

Como se puede observar en la Gráfica 12, el colorante rojo carmín, absorbe en una longitud de onda de 504 nm. Se puede notar que la absorción de las muestras de agua residual aumenta con el transcurso del tiempo, debido a que tiende a aumentar la concentración del colorante, ya que se establece que existe una separación de la disolución del agua respecto al compuesto cuando se realiza la destilación. Por otro lado, el pico característico del grupo cromóforo $-N=N-$ se observa en la misma la longitud de onda de la muestra inicial; además los anillos aromáticos que aparecen en el rango de 200 a 350 nm no muestran cambio alguno, por lo tanto, se establece que no existe degradación del compuesto, lo que además se evidencia a simple vista, debido a que la disolución permanece inalterada (Figura 3.3).



Gráfica 12. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar sin placa galvanizada.

Fuente: Elaboración propia, 2022

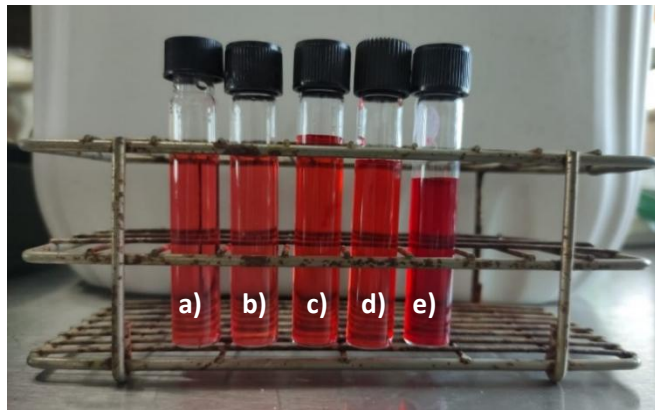
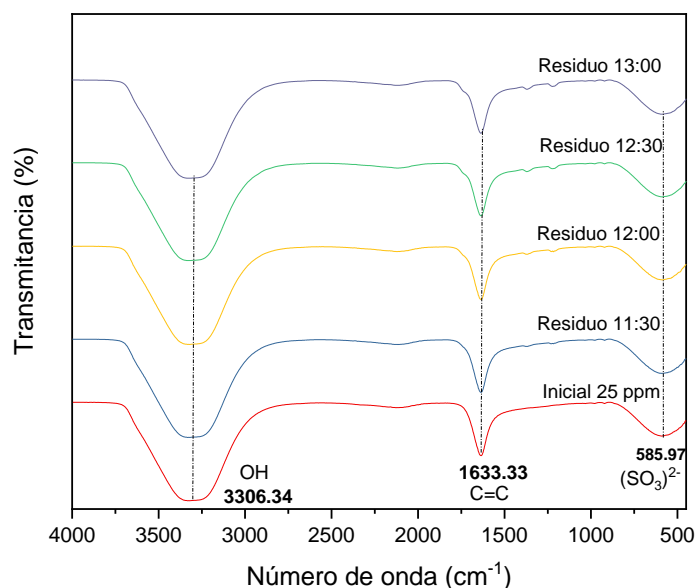


Figura 3.3. Muestras colectadas de agua residual con colorante rojo carmín a 25ppm bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar sin placa galvanizada.

[a) Disolución base, b) Residuo después de 30 min, c) Residuo después de 60 min, d) Residuo después de 90 min, e) Residuo después de 120 min]

Fuente: Imagen propia, 2022.

El análisis estructural del agua residual sintética del colorante rojo carmín obtenida después del tratamiento bajo el sistema acoplado sin fotocatalizador se presenta en la Gráfica 13. Se observa una banda de absorción fuerte en 3306.34 cm^{-1} que corresponde al grupo -OH asociado. En otros trabajos se ha reportado que este absorbe en una región de $3250\text{-}3450\text{ cm}^{-1}$. También se nota un estiramiento medio en 1633.33 , el cual corresponde al enlace C=C conjugado proveniente de los grupos benceno del compuesto reportado en tablas (ver Anexo 1) en un rango de $1640\text{-}1610\text{ cm}^{-1}$. Así mismo, se percibe un pico en 585.97 cm^{-1} el cual pertenece al grupo funcional $(\text{SO}_3)^{2-}$.



Gráfica 13. Espectroscopía IR-ATR del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar sin placa galvanizada.

Fuente: Elaboración propia, 2022

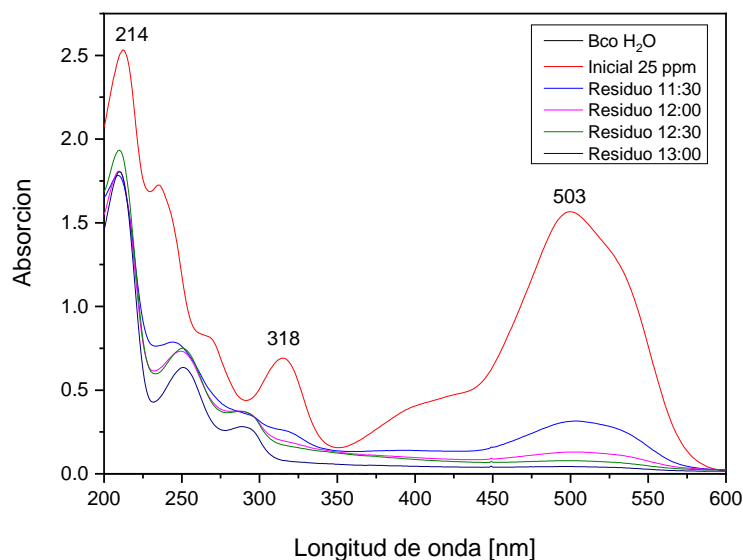
3.4.1 Tratamiento realizado con una modificación de placa galvanizada con tratamiento térmico.

3.4.1.1 Espectrofotometría UV-VIS

En la Gráfica 14 se observa el pico original de la absorbancia del rojo carmín en la región del visible a 504 nm al tiempo inicial del tratamiento por destilación solar, y con la base de placa galvanizada tratada térmicamente. Estas señales están asociadas a los grupos cromóforos de $-N=N-$. Aunado a esto, se observan picos característicos en la región 200 y 320 nm, que corresponden a los anillos aromáticos de los colorantes (Feng et al., 2000).

En el mismo sentido se puede percibir que media hora después de iniciado el tratamiento, dicho pico se minimiza, hasta que al transcurrir 30 min más, desaparece por completo, indicando la ruptura total del enlace. Esto se puede observar a simple vista por la pérdida de color en la disolución (Figura 3.4). Por otro lado, se visualizan nuevos picos en un rango de 200 a 300 nm, lo que evidencia la formación de aminas aromáticas y grupos sulfonatos que absorben en dicha región y que son productos de degradación del colorante según lo demostrado por Sinha *et al.*, 2018 y Pinheiro *et al.*, 2004.

Se realizó una curva de calibración no registrada en este documento (absorbancia a 503 nm vs concentración del colorante rojo carmín) para establecer la concentración final de la disolución tratada y de esta manera determinar el porcentaje de foto-degradación. En este sentido se registró que después de 120 min de tratamiento la concentración baja de 25 a 1.76 ppm, con un porcentaje de foto-degradación del colorante rojo carmín del 93 %.



Gráfica 14. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-distilación solar modificado con placa galvanizada con tratamiento térmico.
Fuente: Elaboración propia, 2022

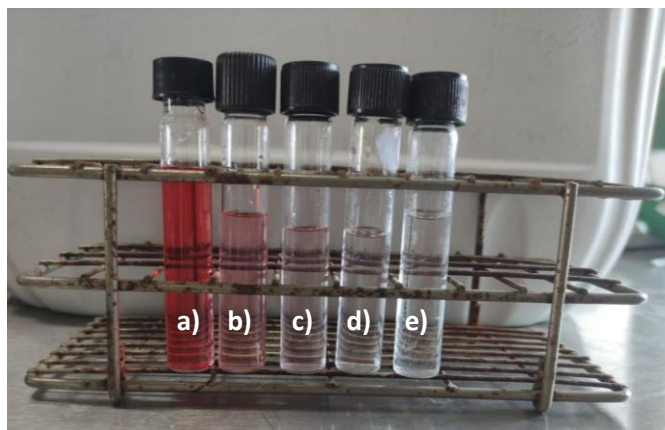
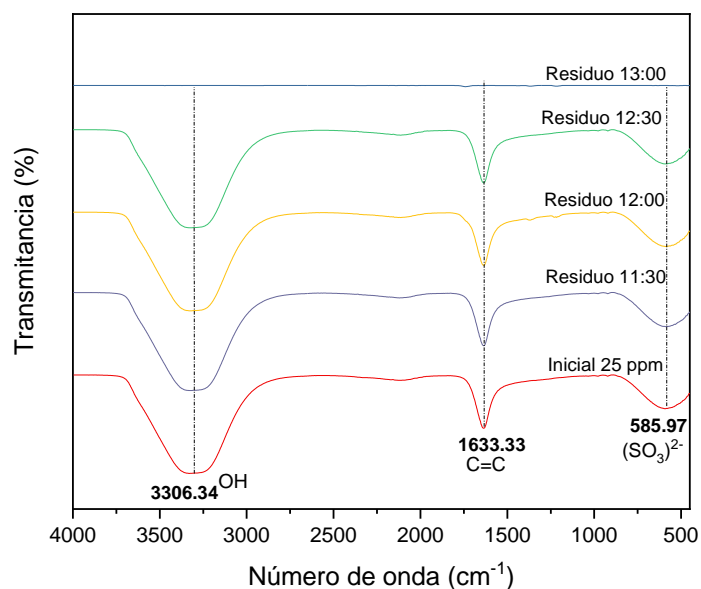


Figura 3.4. Cinética de fotodegradación del agua residual con colorante rojo carmín a 25ppm bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-distilación solar modificado con placa galvanizada con tratamiento térmico. [a) Disolución base, b) Residuo después de 30 min, c) Residuo después de 60 min, d) Residuo después de 90 min, e) Residuo después de 120 min]
Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.4.1.2 Espectroscopía IR-ATR

El análisis estructural del agua residual sintética del colorante rojo carmín obtenida después del tratamiento bajo el sistema acoplado modificado con una placa galvanizada con tratamiento térmico (como fotocatalizador) se presenta en la Gráfica 15. Se puede observar una banda de absorción fuerte en 3306.34 cm^{-1} correspondiente al grupo OH asociado en la muestra inicial, así como en las tomadas a las 11:30, 12:00, 12:30, posteriormente a las 13:00 dicho enlace se rompe. Por otro lado, se obtuvo un estiramiento medio en 1633.33 , en las mismas muestras antes mencionadas perteneciente al enlace C=C derivado del benceno, el cual, en la muestra final se fracciona. Así mismo, se nota un pico de absorción en 585.97 cm^{-1} del enlace $(\text{SO}_3)^{2-}$, dicho enlace se pierde en la muestra final tomada durante el tratamiento.



Gráfica 15. Espectroscopía IR-ATR del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con placa galvanizada tratada térmicamente.

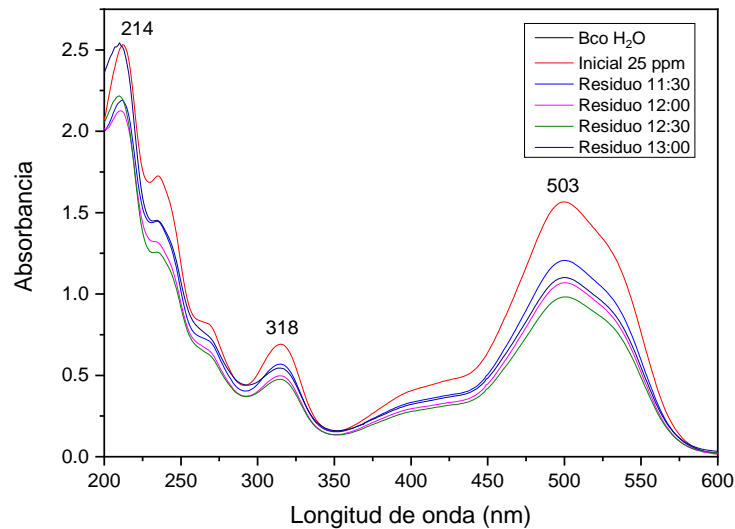
Fuente: Elaboración propia, 2022

3.4.2 Tratamiento realizado con una modificación de placa galvanizada sin tratamiento térmico.

3.4.2.1 Espectrofotometría UV-Visible

En la Gráfica 16, igual que en la anterior, se observa el pico característico del rojo carmín al inicio del tratamiento en el destilador solar después de modificar el dispositivo con una base de placa galvanizada sin tratamiento térmico. En este caso, se puede notar que con el transcurso del tiempo la absorción tiende a minimizarse, lo que sugeriría que existe un mínimo porcentaje de degradación en el colorante, sin embargo, no existen diferencias en el rango de 240-350 nm y tampoco en el pico característico del grupo cromóforo $-N=N-$. Por lo tanto, no se llega a una degradación del azoico rojo carmín utilizando este procedimiento (Figura 3.5).

Una vez realizada la curva de calibración a una absorbancia de 503 nm vs concentración del colorante rojo carmín, se estableció que la concentración baja de 25 a 18.55 ppm por lo que la foto-degradación del colorante rojo carmín fue del 25.8 %.



Gráfica 16. Espectrofotometría UV-Vis del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar con placa galvanizada sin tratamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia, 2022

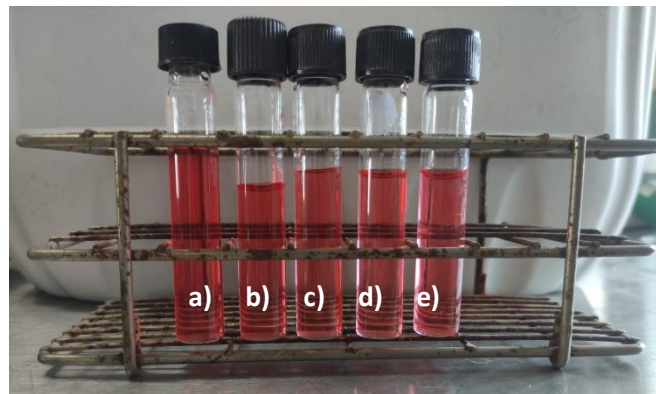


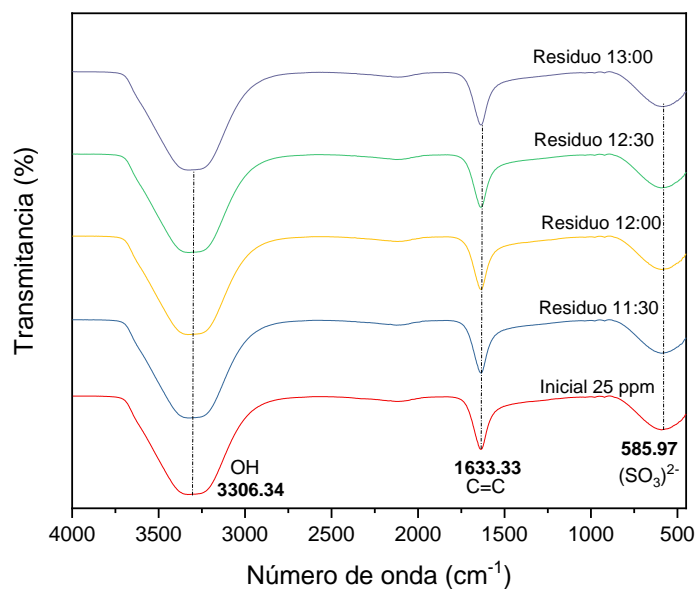
Figura 3.5. Muestras colectadas de agua residual con colorante rojo carmín a 25ppm bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con placa galvanizada sin tratamiento térmico.

[a) Disolución base, b) Residuo después de 30 min, c) Residuo después de 60 min, d) Residuo después de 90 min, e) Residuo después de 120 min]

Fuente: Imagen propia, 2022.

3.4.2.2 Espectroscopía IR-ATR

El análisis estructural del agua residual sintética del colorante rojo carmín obtenida después del tratamiento bajo el sistema acoplado modificado mediante una placa galvanizada sin tratamiento térmico (como fotocatalizador) se presenta en la Gráfica 17. Se puede notar una banda de absorción fuerte en 3306.34 cm^{-1} que corresponde al grupo OH asociado. También, se observa un estiramiento medio en 1633.33 y 585.97 cm^{-1} el cual corresponde al enlace C=C conjugado, a partir de los grupos de benceno del compuesto y al grupo funcional $(\text{SO}_3)^{2-}$ respectivamente.



Gráfica 17. Espectroscopía IR-ATR del agua residual sintética de colorante rojo carmín, bajo un tratamiento de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar con placa galvanizada sin tratamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia, 2022

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó que el proceso por el cual se llega a la foto-degradación del colorante rojo carmín fue aquél donde se empleó la placa galvanizada sometida a tratamiento térmico. Para lo cual, se realizó la evaluación de calidad de agua residual y destilada tratada obtenida al final del experimento. Los resultados se muestran a continuación.

3.5 Evaluación de la calidad del agua

3.5.1 pH

Se puede observar en la Tabla 7 que la muestra inicial, así como el agua destilada colectada en el tratamiento, presentan un pH ligeramente ácido. Por otro lado, el agua residual final se encuentra en un valor neutro. Sin embargo, ambas muestras evaluadas se encuentran en el límite máximo permisible que se establece en la norma NOM-127-SSA1-1994, donde el pH debe estar en un rango de 6.5 a 8.5. Así mismo, el agua inicial presenta un valor fuera de lo permitido.

Tabla 7. Resultados obtenidos de la evaluación del pH

H ₂ O	pH
Agua inicial (Colorante a 25 ppm)	6.31
Agua residual al final del proceso	7.06
Agua destilada obtenida al final del proceso	6.60

3.5.2 Conductividad

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 8, donde se puede observar que la conductividad electrolítica es igual en el agua inicial como en el agua destilada obtenida. En tanto el agua residual al final del proceso presenta un valor mayor, por lo tanto, se establece que existe mayor concentración de sales en esta. Sin embargo, los tres diferentes tipos de agua analizadas se encuentran dentro del límite máximo permisible establecidos en las normas antes mencionadas (1.5 mS/cm).

Tabla 8. Resultados obtenidos de la evaluación de la conductividad

H ₂ O	Conductividad [mS/cm]
Agua inicial (Colorante a 25 ppm)	0.03
Agua residual al final del proceso	0.12
Agua destilada obtenida al final del proceso	0.03

3.5.3 DQO

En la Tabla 9, se muestran los datos obtenidos en la evaluación de la demanda química de oxígeno. En este caso es posible determinar que la muestra inicial tiene un valor menor que el agua residual y destilada obtenida al final del proceso. Sin embargo, los tres tipos de agua se encuentran dentro del límite máximo permisible (250 mg/L).

Tabla 9. Resultados obtenidos de la evaluación de la DQO

H ₂ O	DQO [mg/L]
Agua inicial (Colorante a 25 ppm)	37.00
Agua residual tratada al final del proceso	47.00
Agua destilada tratada al final del proceso	0.98

3.5.4 Turbiedad

En la Tabla 10, se muestran los resultados obtenidos en el análisis de este parámetro fisicoquímico en el agua destilada y residual obtenida al final del proceso. Se puede observar que la muestra inicial no presenta turbiedad. Por otro lado, el agua residual tratada es la que presenta mayor valor de turbidez. En tanto para el agua destilada tratada el valor cumple con los límites máximos permisibles establecidos en la norma NOM-127-SSA1-1994, la cual establece un valor de 5 UNT.

Tabla 10. Resultados obtenidos de la evaluación de la turbiedad

H ₂ O	Turbiedad [UNT]
Agua inicial (Colorante a 25 ppm)	0
Agua residual tratada al final del proceso	33
Agua destilada tratada al final del proceso	5

3.5.5 Sólidos totales

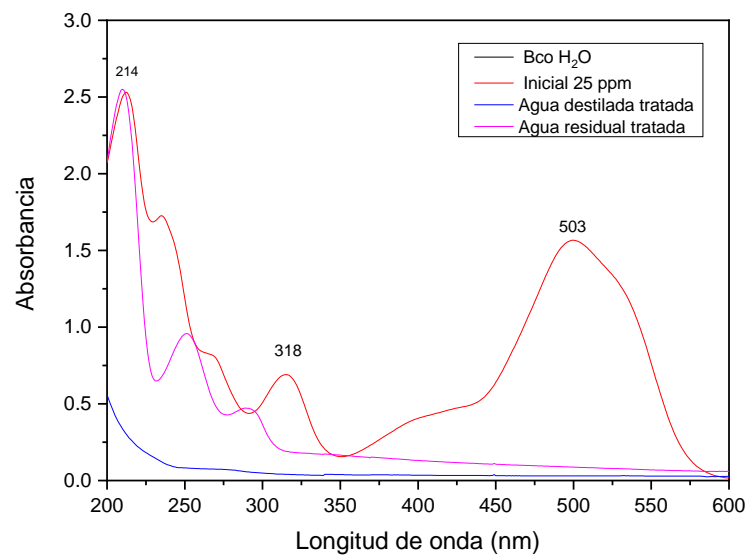
Se muestran los valores obtenidos de sólidos totales en la Tabla 11, donde se observa que el agua residual final presenta mayor cantidad de estos en comparación con la muestra inicial y el agua destilada tratada. Sin embargo, los tres tipos de agua se encuentran dentro del límite máximo permisible que es de 100 mg/L, según lo establecido en la norma NOM-067-ECOL-1994.

Tabla 11. Resultados obtenidos de la evaluación de los sólidos totales

H ₂ O	Sólidos totales [mg/L]
Agua inicial (Colorante a 25 ppm)	0.016
Agua residual tratada al final del proceso	0.076
Agua destilada tratada al final del proceso	0.012

3.5.6 Espectrofotometría UV-VIS

En la Gráfica 18, se puede observar que la muestra inicial de una disolución de colorante a 25 ppm presenta el pico característico al -N=N- del rojo carmín a 504 nm, sin embargo, las muestras tomadas del agua destilada y agua residual al final del proceso no exhiben dicho estiramiento. Por lo tanto, una vez realizado el tratamiento, dichas muestras de agua no presentan colorante. Por otro lado, como se mencionó anteriormente en el agua residual final se observa en un rango de 300 a 200 nm la presencia de aminas aromáticas y grupos sulfonatos.



Gráfica 18. Espectrofotometría UV-VIS del agua residual y destilada tratada final por medio de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar con placa galvanizada con tratamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia, 2022

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

-Durante el proceso de destilación solar simple se reporta mayor eficiencia utilizando agua con colorante a una concentración de 25 ppm en temporada primaveral. La temperatura de máxima alcanzada fue de 57.6 °C obteniéndose una eficiencia del 16.1 %.

-En el sistema acoplado de calentamiento-destilación solar se obtuvo mejor eficiencia en temporada primaveral utilizando la disolución de rojo carmín a 25 ppm ya que gracias al precalentamiento ($T = 81^{\circ}\text{C}$) la temperatura en el destilador se mantiene. En este caso la eficiencia fue del 29 %.

-La eficiencia de la destilación solar mejora con el acoplamiento al calentador hasta un 13%.

-Las condiciones óptimas de operación del sistema acoplado de calentamiento-destilación solar fueron: $V_0 = 250 \text{ mL}$ a $T_0 = 14.0^{\circ}\text{C}$ (al ingreso del calentador solar parabólico), precalentamiento en dicho dispositivo: hasta $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y eficiencia = 87%.

-Se obtuvo mayor porcentaje (93 % en 2 h) de fotodegradación del colorante en el sistema acoplado modificado mediante una placa galvanizada con tratamiento térmico.

-La fotodegradación alcanzó un 26 % a partir del sistema acoplado modificado con una placa galvanizada sin tratamiento térmico.

-En todos los parámetros fisicoquímicos determinados (pH, conductividad, DQO, turbiedad y ST), el agua destilada tratada, cumple con las características establecidas por las normas de calidad referidas para cada análisis.

-El agua residual mejora su calidad, ya que hay degradación del colorante y cumple con los LMP en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos evaluados a excepción de la turbiedad.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la hipótesis planteada se cumple cuando se realiza el tratamiento a partir de un sistema acoplado de calentamiento-destilación solar modificado con una placa galvanizada tratada térmicamente.

ANEXOS

ANEXO 1

Técnicas de caracterización para la placa galvanizada

- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Este dispositivo se encuentra estructurado por un cátodo de tungsteno el cual tiene la función de generar un haz de electrones acelerados de entre 200 V y 30 kV a través de una columna en vacío de alrededor de 1×10^{-4} Pa y por diferentes lentes electromagnéticos encargados de focalizar y reducir el diámetro del haz desde unos 25×10^3 - 50×10^3 nm hasta unos 10 nm, para llevar a cabo un barrido superficial, el cual permite la observación y caracterización de materiales inorgánicos y orgánicos a nivel microscópico. Se caracteriza principalmente por generar imágenes de alta resolución (100 Å) y apariencia tridimensional debido a la excelente profundidad de campo.

Su fundamentación se basa en proyectar un haz de electrones de alta energía sobre la muestra, esta genera a su vez dos tipos de señales llamados electrones secundarios y los electrones retro-dispersados, donde cada una de las señales muestra información diferente dado a los procesos de generación. Los electrones secundarios tienen la finalidad de ser transmitidos por señales eléctricas y ser detectados mediante un dispositivo SEI (Secondary Electron Image) y convertirse en una señal digital, la cual se interpreta como intensidad en escala de grises (las zonas con mayor número de electrones son de color blanco) la cual construye una imagen de alta resolución. Por otro lado, los electrones retro-dispersados son detectados por un dispositivo BEI (Backscattered Electron Image) el cual permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie de la muestra. Antes de analizar las muestras es indispensable cubrir con oro la superficie de cada una de ellas para que sea conductora y de esta manera poder observar mejor la morfología de los materiales.

La estructura morfológica de la placa galvanizada con y sin tratamiento térmico se realizó con un microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM-6510LV con voltaje de aceleración a 20 kV y ampliaciones de 500x.

- Espectroscopía Foto-electrónica de Rayos X (XPS)

Es una técnica analítica de superficie para determinar la composición de un material. Su fundamentación se basa en incidir rayos x (de Al o Mg) para excitar a los electrones al tiempo que se mide la energía cinética y el número de estos que escapan de la superficie del material analizado, ya que nos proporcionan información sobre la energía en cada nivel y naturaleza de los diferentes tipos de átomos. En general, se mide la velocidad de los electrones emitidos mediante el espectrofotómetro por medio de la fórmula:

$$EL = h\nu - EK \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

EK: Energía cinética

EL: Energía de ligadura

$h\nu$: Energía del haz

Por lo que, es muy importante trabajar en condiciones de ultra alto vacío (UHV) mediante bombas turbo-moleculares y iónicas apoyadas con vacíos previos de bombas rotatorias de aceite.

Los análisis de fotoelectrones de rayos X (XPS) de este trabajo de investigación se realizaron en un espectrómetro de fotoelectrones JEOL modelo JPS-9200 equipado con una fuente de radiación de rayos X de Al (300 W, 15 kV y 1486 eV). Las muestras no tratadas y tratadas se apoyaron en una cinta adhesiva de carbón conductor y se estudiaron sin ningún tratamiento previo. Las muestras se

colocaron en porta-muestras de acero inoxidable, que permanecieron en una cámara de pre-análisis para desgasificarse a una presión de 10^{-3} mbar. Encuesta

Los espectros de la encuesta se registraron de 0 a 1100 eV a una energía de paso constante de 50 eV, en 900 lm^2 de área de análisis; Se registraron espectros estrechos de las regiones C1s, O1s y Zn 2p en el modo de energía de paso constante a 20 eV, 100 de permanencia y 10 escaneos como mínimo. La corrección de carga se ajustó con la señal de carbón C1s 285 eV. El procesamiento de espectros se llevó a cabo utilizando Specs surf versión 1.8.2 para adquirir espectro y el software Origin v.8.2 para procesar datos. Se sustrajo un fondo de tipo Shirley como línea de base de los espectros y se desconvolucionó la señal usando curvas gaussianas para determinar las energías de enlace de los diferentes niveles del núcleo del elemento. Se utilizó la base de datos NIST para identificar el elemento correspondiente de las energías de unión medidas.

Tabla 12. Absorciones para grupos funcionales representativos
Fuente: Rubinson K.A., Rubinson J.F., "Análisis Instrumental", Ed. Pearson Educación, 2000.

Frecuencias características de grupos orgánicos poliatómicos			
f = fuerte, m = medio, d = débil			
Tipo de vibración		Frecuencia (cm ⁻¹)	Intensidad
C-H	Alcanos (tensión)	3000-2850	f
	-CH ₃ (flexión)	1450 y 1375	m
	-CH ₂ - (flexión)	1465	m
	Alquenos (tensión)	3100-3000	m
	Alquenos (fuera del plano de flexión)	1000-650	f
	Aromáticos (tensión)	3150-3050	f
	Aromáticos (fuera del plano de flexión)	900-690	f
	Alquino (tensión)	ca. 3300	f
	Aldehídos		2900-2800
		2800-2700	d
C-C	Alquenos	No interpretable	
C=C	Alqueno	1680-1600	m-d
	Aromáticos	1600 y 1475	m-d
C≡C	Alquino	2250-2100	m-d
C=O	Aldehído	1740-1720	f
	Cetona	1725-1705	f
	Ácidos carboxílicos	1725-1700	f
	Éster	1750-1730	f
	Amida	1670-1640	f
	Anhídridos	1810 y 1760	f
	Cloruro ácido	1800	f
C-O	Alcoholes, éteres, ésteres ácidos carboxílicos, anhídridos	1300-1000	f
O-H	Alcoholes, fenoles Libre	3650-3600	m
	Alcoholes, enlace H	3500-3200	m
	Ácidos carboxílicos	3400-2400	m
N-H	Aminas y amidas primarias y secundarias (tensión)	3500-3100	m
	Aminas y amidas primarias y secundaria (flexión)	1640-1550	m-f
C-N	Aminas	1350-1000	m-f
C=O	Iminas y oximas	1690-1640	d-f
C≡N	Nitrilos	2260-2240	m
X=C=O	Alenos, cetonas, isocianatos, isotiocianatos	2270-1950	m-f
N=O	Nitro (R-NO ₂)	1550 y 1350	f
S-H	Mercaptanos	2550	d
S=O	Sulfóxidos	1050	f
	Sulfones, cloruros de sulfónidos	1375-1300 y	f
	Sulfatos, sulfoamidas	1200-1140	f
C-X	Fluoruro	1400-1000	f
	Cloruro	800-600	f
	Bromuro, yoduro	<667	f

Continuación Tabla 12. Absorciones para grupos funcionales representativos

Frecuencias características de grupos inorgánicos poliatómicos		
f = fuerte, m = medio, d = débil, a = agudo		
Grupo	Frecuencia (cm ⁻¹)	Intensidad
(BO ₂) ⁻	1300-1350	f
(B ₄ O ₇) ²⁻	975-1000	m
	1050-1080	m
	1330-1370	f
(CO ₃) ²⁻	850-875	m
	1425-1450	f
	2400-2600	d
(HCO ₃) ²⁻	650-665	m
	685-720	m
	820-850	m
	990-1015	m
(SCN) ¹⁻	425-475	2 bandas, a
	750-775	
	2000-2100	
(SiO ₃) ²⁻	470-480	f
	560-585	d
	940-1015	f
Silicatos	940-1050	f
(NO ₂) ¹⁻	830-850	d
	1220-1250	f
	1325-1375	d
(NO ₃) ¹⁻	800-850	m,a
	1350-1375	f
(NH ₄) ⁺	1390-1440	f
	3050-3350	m
(PO ₄) ²⁻	1000-1050	f,f
(HPO ₄) ²⁻	830-900	m
	930-980	m
	1010-1080	f
	2200-2440	d
(H ₂ PO ₄) ¹⁻	900-950	m
	1040-1085	f
(SO ₃) ²⁻	620-670	a
	915-980	f
(SO ₄) ²⁻	585-660	m
	1080-1130	f
(HSO ₄) ²⁻	570-600	f
	850-880	m
	1050-1075	m
	1150-1080	m
(S ₂ O ₃) ²⁻	500-540	f
	660-700	f
	960-1000	f
	1100-1040	f
(S ₂ O ₄) ²⁻	640-675	m
	960-1000	f
	1060-1090	m
	1175-1195	f

Continuación Tabla 12. Absorciones para grupos funcionales representativos

$(S_2O_8)^{2-}$	700-730	f
	1045-1075	f,a
	1270-1300	f
$(SeO_3)^{2-}$	720-740	d
	750-790	d
$(SeO_4)^{2-}$	410-430	f
	760-810	d
	840-860	f
$(ClO_3)^{1-}$	480-530	f,a
	610-640	f,a
	900-975	d,f
$(ClO_4)^{2-}$	610-640	f,a
	1060-1000	f
$(BrO_3)^{1-}$	365-385	f,a
	440-460	f,a
	785-820	f
$(IO_3)^{1-}$	320-400	d,a
	740-780	f
$(VO_3)^{1-}$	775-800	f
	820-840	f
	910-950	f
$(CrO_4)^{2-}$	360-440	d
	795-880	m,f
	905-950	d
$(Cr_2O_7)^{1-}$	340-375	d
	725-760	m
	840-890	m
$(MoO_4)^{2-}$	320-350	d
	820-840	f
	890-930	d
$(WO_4)^{2-}$	780-820	f
$(MnO_4)^{2-}$	890-915	f
$(Fe(CN)_6)^{4-}$	560-600	m
H_2O	1600-1700	m
(agua de cristalización)	3190-3550	m

ANEXO 2

Técnicas de caracterización para determinar la calidad del agua residual y destilada tratada

- pH

La NMX-AA-008-SCFI-2016 “Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” menciona a este parámetro fisicoquímico como muy importante para determinar la calidad del agua, ya que los valores altos o bajos determinan la toxicidad para organismos acuáticos. Su fundamento se basa en la medición del valor de pH a partir de la diferencia de potencial de una celda electroquímica empleando un pHmetro. Este valor depende de la temperatura debido al equilibrio de disuasión. Aunado a esto, este parámetro se define en términos de la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución:

$$\text{pH} = -\log a_{\text{H}} = -\log (m_{\text{H}}\gamma_{\text{H}} / m^0) \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

a_{H} : es la actividad relativa del ión hidrógeno (en base molal)

γ_{H} : es el coeficiente de actividad molal del ión hidrógeno H^+ a la molalidad m_{H} .

m^0 : es la molalidad estándar.

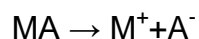
La magnitud pH es considerada como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la disolución.

- Conductividad eléctrica

La NMX-AA-093-SCFI-2000 “determinación de la conductividad electrolítica” define a este parámetro como la capacidad de una solución para transportar corriente eléctrica, esta depende de la presencia de iones. Este parámetro es de gran importancia ya que determina el grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso.

El fundamento se basa en:

La conducción de la corriente eléctrica en agua puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos



Los iones se mueven independientemente y se dirigen a los electrodos de carga opuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico. La cantidad de moléculas que se han disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones, al igual que los conductores metálicos obedecen a la Ley de Ohm, excepto en voltajes muy elevados y corrientes de frecuencia muy alta. Si en una solución electrolítica se colocan dos electrodos de área A separados por una distancia d , y se aplica un campo eléctrico E , la diferencia de potencial V entre los electrodos será proporcional a la distancia d y al campo eléctrico E .

$$V = dE \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

V : es la diferencia de potencial entre los electrodos en volts

E : es el campo eléctrico aplicado en amperes

D : es la distancia de separación entre las placas en cm.

La conductancia específica o conductividad σ es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica y está definida por la relación:

$$\sigma = J/E \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde:

J : es la densidad de corriente

E : es la carga eléctrica.

La densidad de corriente J se define a su vez por la ecuación:

$$J = I/A$$
 Ecuación 1.6

Donde:

I: es la intensidad de corriente

A: es el área

Combinando las ecuaciones (1.4), (1.5), y (1.6) se obtiene que la diferencia de potencial V es:

$$V = Id/A$$
 Ecuación 1.7

Al valor $d/\sigma A$ se le conoce como la resistencia que presenta la disolución al paso de la corriente y se denota por la letra R.

$$R = d/\sigma A$$
 Ecuación 1.8

Por lo que la ecuación (1.7) se transforma en la ley de Ohm.

$$V = IR \sigma$$
 Ecuación 1.9

De la ecuación (1.8) se obtiene que las unidades de la conductancia específica son:

$$\sigma = d/RA = \text{cm}/\text{ohm} \times \text{cm}^2 = 1/\text{ohm} \times \text{cm} = \text{Siemen}/\text{cm}$$

La ecuación anterior permite el cálculo de la conductancia específica de la disolución conociendo su resistencia y las dimensiones de la celda de conductividad. Se define como constante K de la celda de conductividad a la relación existente entre la distancia de los electrodos d, y su área A

$$K=d/A$$
 Ecuación 1.10

Por lo que la fórmula de conductividad está dada por:

$$\sigma = K/R$$
 Ecuación 1.11

Una vez medida la resistencia de la solución o su inverso la conductividad y conociendo la constante de la celda se conoce la conductancia específica de la solución σ .

- DQO

La norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011 “Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”, establece que la demanda química de oxígeno se basa en cuantificar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O . Por lo tanto, a mayor DQO más contaminada se encuentra el agua.

El principio de la determinación se basa en que:

“Las muestras se oxidan mediante digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata y sulfato de mercurio (II). La plata actúa como catalizador para oxidar la materia orgánica más resistente. El mercurio reduce la interferencia causada por la presencia de iones cloruro. La cantidad de dicromato utilizada en la oxidación de la muestra se determina midiendo la absorbancia del Cromo (III) formado a una longitud de onda de (600 ± 20) nm para un intervalo hasta de 1000 mg/L. Las mediciones de la absorbancia se efectúan en el tubo de digestión, que hace las veces de celda, y son convertidas a un valor de DQO-TS. Se puede utilizar una longitud de onda alternativa de (440 ± 20) nm para un intervalo de calibración de hasta una concentración de masa de 150 mg/L. Para un intervalo de calibración menor, de hasta 50 mg/L, se puede utilizar una longitud de onda alternativa de (348 ± 15) nm. A 348 y 440 nm, se mide la absorbancia del Cromo (IV) remanente. Para muestras digeridas turbias y de color atípico, se usa la titulación con sulfato de amonio y hierro (II) estandarizado”.

- Turbiedad

La NMX-AA-038-SCFI-2001 “Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” establece que la turbiedad en agua se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos. La transparencia del agua es muy importante cuando está destinada al consumo del ser humano, a la elaboración de productos destinados al mismo y a otros procesos de manufactura que requieren el empleo de agua con características específicas, razón por la cual, la determinación de la turbiedad es muy útil como indicador de la calidad del agua, y juega un papel muy importante en el desempeño de las plantas de tratamiento de agua, formando como parte del control de los procesos para conocer cómo y cuándo el agua debe ser tratada.

Este método se basa en la comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas y la intensidad de luz dispersada por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones; a mayor dispersión de luz corresponde una mayor turbiedad.

- Sólidos totales

La NMX-AA-034-SCFI-2015 “Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”, establece que los sólidos y sales disueltas pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua, un efluente o un proceso de varias formas, en plantas potabilizadoras por ejemplo el análisis de sólidos disueltos es importante como indicador de la efectividad de procesos de tratamiento del agua.

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sólidos disueltos, así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, mediante la evaporación y calcinación

de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

ANEXO 3

Normatividad relacionada con calidad del agua

Como se ha mencionado previamente, el objetivo principal de la destilación solar es obtener agua de buena calidad separando los contaminantes que contiene (en el caso de esta investigación, retirar el colorante rojo carmín) y poder ser utilizada como agua potable en los hogares o alguna otra actividad antropogénica o bien para consumo humano. Por tal motivo, es necesario cumplir con los lineamientos establecidos en las Normas:

- **Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: La cual “establece los límites máximos permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”**

-Límites permisibles de características bacteriológicas

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.3. Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes deben establecer los agentes biológicos nocivos a la salud a investigar.

Tabla 13. Límites permisibles de características bacteriológicas

Fuente: NOM-127-SSA1-1994

Característica	Límite permisible
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 mL 2 UFC/100 mL
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 mL Cero UFC/100 mL

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 mL (número más probable por 100 mL), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 mL (unidades formadoras de colonias por 100 mL), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

- Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.4.

Tabla 14. Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Fuente: NOM-127-SSA1-1994

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	Unidades de Turbiedad Nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método

- Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.5. Los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

Tabla 15. Límites permisibles de características químicas

Fuente: NOM-127-SSA1-1994

Característica	Límite permisible [mg/L]
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Hidrocarburos aromáticos en microgramos/L:	No reportado
Benceno	10.00
Etilbenceno	300.00
Tolueno	700.00

Continuación Tabla 15. Límites permisibles de características químicas

Xileno (tres isómeros)	500.00
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	1.00
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/L:	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.20
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	1.00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 – D	30.00
Plomo	0.01
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00

Continuación Tabla 15. Límites permisibles de características químicas

Sulfatos (como SO_4^-)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Yodo residual libre	0.2-0.5
Zinc	5.00

Nota 1. Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Nota 2. El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la siguiente tabla de cumplimiento gradual:

Tabla 16. Cumplimiento Gradual

Fuente: NOM-127-SSA1-1994

Límite permisible [mg/L]	Año
0.045	2001
0.040	2002
0.035	2003
0.030	2004
0.025	2005

- Límites permisibles de características radiactivas

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.7 Los límites se expresan en Bq/L (Becquerel por litro).

Tabla 17. Límites permisibles de características radiactivas

Fuente: NOM-127-SSA1-1994

Característica	Límite permisible [Bq/L]
Radiactividad alfa global	0.56
Radiactividad beta global	1.85

- **NOM-003-SEMARNAT-1997:** La cual “establece los límites máximos permisibles con contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”

Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 2.8.

Tabla 18. Límites máximos permisibles de contaminantes

Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997

Tipo de Reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al público con contacto directo	240	≥ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1.000	≤ 5	15	30	30

- **Nom-001-SEMARNAT-2021** la cual “Establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Tabla 19. Límites máximos permisibles establecidos para promedio diario y mensual según corresponda al tipo de cuerpo receptor
Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo									
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico			
										P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	21
										30	36	42	100	120	140	20	24	28	
				100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84	
				25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21	
										NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30	
							15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15	
Huevos de Helminthos (huevo/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1									
<i>Escherichia coli</i> , (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200	
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200	
pH (UpH)	6-9																		
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo									
	436 nm									7,0 m ⁻¹									
	525 nm									5,0 m ⁻¹									
	620 nm									3,0 m ⁻¹									
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																		
<p>N.A: No Aplica P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad * Si Cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DOO. * Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT. * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli. * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales. Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.</p>																			

Tabla 20. Límites máximos permisibles para metales y cianuros
NOM-001-SEMARNAT-2021

Parámetros (miligramos por litro)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
				0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
			0,4	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,05	0,075	0,1	0,1	0,15	0,2	0,05	0,075	0,1
			3	1	1,5	2	2	2,50	3	2	2,5	3	1	1,50	2	1	1,5	2
			6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
			1,5	0,5	0,75	1	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
			0,02	0,005	0,008	0,01	0,01	0,015	0,02	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01
			4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
			0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
			20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo																	

REFERENCIAS

Alvarado Camacho, D. A., Hernández López H., Canizalez Dávalos, L., Martínez Orizco, R. A. (2019). Purificación de aguas mediante el uso de un nuevo prototipo de destilador solar. Universidad Autónoma de Zacatecas, 1-53.

Álvarez Martínez, B., Pérez Vanegas, J. J., Salazar Romero, A., (2015), Análisis del comportamiento de un prototipo de destilador solar en la ciudad de Cartagena, Universidad de Cartagena, Colombia, 1-81.

Arunkumar, T.; Raj, K.; Rufuss, D. D. W.; Denkenberger, D.; Tingting, G.; Xuan, L.; Velraj, R. (2019) A review of efficient high productivity solar stills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 197-220.

Arroyave Rojas, J. A., Rodríguez Gaviria E. M., Barón Artizábal, A., Moreno Salazar, C. C., (2012), Degradación y mineralización del colorante rojo punzó empleando el reactivo de Fenton, *Rev. P+L vol.7 no.1*, 48-58.

Ballesteros Balbuena M., Roa Morales G., Vilchis Nestor A. R., Castrejón Sánchez V. H., Viguera Santiago E., Balderas Hernández P., Barrera Díaz C., Camacho López S., Camacho López M., (2020), Photocatalytic urchic-like and needle-like ZnO nanostructures synthesized by thermal oxidation, *Materials Chemistry and Physics* 244, 1-7.

Baena Baldiris, D., (2020), degradación catalítica y toxicidad de los colorantes rojo ponceau s y naranja de metilo empleando la cepa bacteriana 1ms, Universidad de Cartagena, Facultad de Ciencias Farmacéuticas, pp. 1-70.

Campos Castellanos, E., Síntesis, caracterización y uso de fotocatalizadores de ZnO y MnO a partir de residuos de pilas, (2020), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial, pp. 1-87.

Calero Díaz, S. Zaderenko Partida A. Anta Montalvo, J. Merklings P. *Revista de química de la Universidad Pablo de Olavide*, 2173-090, No 7, pp. 1-161, (2012)

Caro Guzmán, A. (2020). Desarrollo y Evaluación de Destiladores Solares de Agua de Alto Rendimiento. Toluca, México. 1-16

Cengel, Y. & Boles, M. (2015). *Termodinámica*. 8ª ed. McGraw Hill. México

Cerón Montes, A. Purificación de compuestos fenólicos (antocianinas) del maíz azul por adsorción, (2010), Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, pp. 1-69.

CETENMA. (2008). Memoria anual. España.

Chávez Sánchez, C. A., Estudio de la actividad fotocatalítica de colorantes en nanopartículas de cobre en ZnO, Universidad de Sonora, departamento de ingeniería química y metalurgia, p.p. 1-42.

Chávez Sánchez, S., Terres Peña, H., Lizardi Ramos, A., López Callejas, R., Lara Valdivia, A., Vaca Mier, M., (2020), Análisis de la remoción de colorante en agua, aplicando destilación solar. Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química, No. 6, 130, 1-6.

Chung, K. T. (2017). Azo dyes and human health: A review. Journal of Environmental Science and Health. Part C, Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews. 34(4) 2016, 233-261.

Corzo Lucioni A. (2011), Estudio de la degradación fotocatalítica oxidativa de rodamina B con ZnO y luz solar, Laboratorio de Físico Química Aplicada, Instituto de Biotecnología Aplicada, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Rev Soc Quím Perú. 77 (4) 2, pp. 267-274.

Cruz Martínez, K. (2021), Síntesis de ZnO por microondas para aplicarlo como fotocatalizador, Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química, pp. 1-42.

De la Rosa, M., Hervás, M., Serrano, A., & Losada, M. (1991). Fotobioquímica. <https://doi.org/10.0-8400-5444-0>.

De León-Condés, C. Roa-Morales, Martínez-Barrera, G. Menchaca-Campos, C. Bilyeu, B. Balderas Hernández, P. Ureña-Núñez, F. Toledo-Jaldin, H. (2019). Sulfonated and gamma-irradiated waste 29 expanded polystyrene with iron oxide nanoparticles, for removal of indigo carmine dye in textile wastewater. Heliyon 5 (2019) e02071.

Duffie, J., & Beckman, W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes.

Durkaieswaran, P. & Kalidasa Murugavel, K. (2015). Various special designs of single basin passive solar still – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 49, 1048–1060.

Ensuncho, A. E., Robles, J. R., (2015), Carriazo, J.G., Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas, Rev. Soc. Quím. Perú vol.81 no.2, pp. 135-147.

Feliz Bustinza, C., Bueno Lazo, A., (2020), Sistema de destilación solar para purificación de aguas salobres, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú, 1-122. .

Flores Hernández, A. Murillo Amador B. Rueda Puente E. O. Salazar Torres J. C. García Hernández J. L. Troyo Diéguez E. (2006), Reproducción de cochinilla silvestre *Dactylopius opuntiae* (Homóptera: Dactylopiidae), pp. 92-102.

Flores Mancha, M. A. Rentería Monterrubio A. L. Sánchez Vega, R. Chávez Martínez A. (2019), Estructura y estabilidad de las betalaínas, *interciencia*, vol. 44, núm. 6, pp. 318-325.

Gallegos, M. V. Aparicio, F. Carlos L., Mártire, D. O. Peluso, M. A., Thomas, H. J. Sambeth, J. E., (2016), Estudio de la actividad fotocatalítica de ZnO recuperados de pilas agotadas, Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas “Dr. Jorge J. Ronco” (Fac. Cs. Ex. UNLP – CONICET) 47 Nro. 257 (1900) La Plata, Argentina, p.p. 1-2.

Ganiyua, S. O, Laysa R. D. Britoa, E. C.T. de Araújo C, Elisama, V. Dos-Santos.Martínez-Huitle, C. (2019). Solar photovoltaic-battery system as a green energy for driven electrochemical wastewater treatment technologies: Application to elimination of Brilliant Blue FCF dye solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7(1).

Gičević, A. Hindija, L. & Karačić, A. (2019). Toxicity of Azo Dyes in Pharmaceutical Industry. *International Conference on Medical and Biological Engineering, CMBEBIH 2019*. 581-587.

Gómez Hernández, B., Extracción y acetilación de los componentes de la grana cochinilla (*Dactylopius coccus* COSTA), (2018), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, pp. 1-68.

Hañari Zapana A. B. Extracción de colorante a partir de las hojas de espinaca (*Spinacia oleracea*), Escuela profesional de ingeniería química, pp. 1-64, (2018).

Ibrahim-Ayman G.M. Allam-Elsayed, V. Elshamarka, Salman E. (2015). A modified basin type solar still: Experimental performance and economic study. *Energy*. 93, 335-342

Jiménez García, K. E. (2020). Purificación de agua local para consumo humano con un destilador solar de alta eficiencia para entornos domésticos rurales áridos. Latacunga, Ecuador, 1-45.

J.J., Hernández-Laverde, M., Rojas, H., Muñoz, E, Navío, J.A., Hidalgo, M.C. (2018). Study of the effectiveness of the flocculation-photocatalysis in the treatment of wastewater coming from dairy industries. *Journal of Photochemistry and Photobiology A. Chemistry*, 358, 256-264.

Kabeel, A. E., Omara, Z. M., Younes, M. M. (2015). "Techniques used to improve the performance of the stepped solar still-A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 46, pp. 178–188.

Kalogirou, S. (2014). Solar Energy Engineering Processes and Systems. In: *Solar Energy Engineering (Second Edi)*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.00014-5>. En mayo 2020.

Kumar, A., et al. (2014). A review of thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 37, 100–122.

Kumar, A. & Kim, M.-H. (2016). Heat transfer and fluid flow characteristics in air duct with various Vpattern rib roughness on the heated plate: a comparative study. *Energy*. 103, 75–85.

Kumar, A., et al. (2017). Developing heat transfer and pressure loss in an air passage with multi discrete V-blockages. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 84, 266–278.

Kumar, A. & Kim, M.-H., 2017. Solar air-heating system with packed-bed energy-storage systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 72, 215–227.

Liu H., Zhao X. & Qu J. (2010) Electrocoagulation in water treatment. Comninellis, C and Chen, G. (eds) *From: Electrochemistry for the environment*, Chapter 10, Springer

Lopez, A., Laurence Dupont, A., Tello Burgos N., Espejo,T., Blanco R., (2016), Identification of colorant materials after an artificially aged process, *Opt. Pura Apl.* 49 (3) 143-153

López N. A. (2011). Minieralización del colorante azo Amarillo ácido 36 usando el proceso fotoelectron-feton en una planta piloto solar. Facultad de ciencias químicas, nuevo león. 1-51.

Mamani Martínez, G. Y. Huamani Zuñiga I. E. Evaluacion comparativa de los métodos thorpe y francés para la optención de carmín a partir de la cochinilla (*Dactylopius Coccus Costa*) en el distrito de la joya, Universidad Nacional de San Agustín, pp- 1-87, (2015)

Manikandan, V. Shanmugasundaram, K. Shanmugan, S. Janarthanan, B. & Chandrasekaran, J. (2013). Wick typesolarstills: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 20(2013), 322– 335.

Manrique, E. 2003. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz. *Asociación Española de Ecología Terrestre, Ecosistemas* 2003/1, pp. 1-11.

Marcano, D. (2018). Introducción a la Química de los colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela. 254, pp. 1-234.

Marique, L. Castillo E. Osorio E.A. Serna E.A. Torres R. A. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorants mediante fotocatalisis con TiO₂ usando luz artificial y solar. *Producción + limpia* 2, 50-60.

Matrawy, K. K. Alosaimy, A. S. Mahrous, A. F. (2015). Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: Comparative study with a simple basin type. *Energy Conversion and Management*. 105, 1261–1268.

Meléndez Martínez, A. J., Vicario, I. M., Heredia, F. J., Pigmentos carotenoides: consideraciones estructurales y fisicoquímicas, (2007) *ALAN* vol. 57, No. 2, Caracas.

Modi, K. V & Modi, J. G. (2019). Performance of single-slope double-basin solar stills with small pile of wick materials. *Applied Thermal Engineering*. 49, 723–730.

Molina Ramírez, D. A. (2020). Destilador Solar. Tunja Colombia. 1-58

Muñoz, G. F. (2019). Sobre la destilación solar. *Gaceta del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México*. 139, 8-10. Recuperado de: <http://www.ii.unam.mx/esmx/AlmacenDigital/Gaceta/Gaceta-Septiembre-October-2019/Paginas/sobre-la-destilacionsolar.aspx>. En: mayo 2020

Murcia, J.J., Hernández-Laverde, M., Rojas, H., Muñoz, E, Navío, J.A., Hidalgo, M.C. (2018). Study of the effectiveness of the flocculation-photocatalysis in the treatment of wastewater coming from dairy industries. *Journal of Photochemistry and Photobiology A. Chemistry*, 358, 256-264.

Nadda, R., et al. (2017). Developing heat transfer and friction loss in an impingement jets solar air heater with multiple arc protrusion obstacles. *Solar Energy*. 158, 117–131

NMX-AA-008-SCFI-2016 “Análisis de agua. - medición del ph en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - método de prueba”. *Diario Oficial de la Federación. México*

NMX-AA-093-SCFI-2000 “Determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba”. *Diario Oficial de la Federación. México*

NMX-AA-030/2-SCFI-2011 “Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba - parte 2 - determinación del índice de la demanda química de oxígeno – método de tubo sellado a pequeña escala”. *Diario Oficial de la Federación. México*

NMX-AA-038-SCFI-2001 “Análisis de agua – determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba “. *Diario Oficial de la Federación. México*

NMX-AA-034-SCFI-2015 “Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba”. *Diario Oficial de la Federación. México*

NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". *Diario Oficial de la Federación. México*

NOM-001-SEMARNAT-2021 “Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales”. *Diario Oficial de la Federación. México*

NOM-003-SEMARNAT-1997 “Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”. *Diario Oficial de la Federación. México*

Oliveira, M. T.-Garcia, L. F. Siqueira A. C. R. Somerset, V. Gil, E. S.. (2020). Electrocoagulation of the indigo carmine dye using electrodes produced from the

compression of metallurgical filing wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 17, 1657–1662.

Omara, Z. M. Kabeel A. E. Abdullah, A. S. Essa, F. A. (2016). Experimental investigation of corrugated absorber solar still with wick and reflectors. *Desalination*. 381, 111–116.

Ordóñez, G. (2006), Evaluación de la degradación de colorantes asociado a velas de mezcla de parafina, por exposición de la luz ultravioleta y luz blanca visible a una temperatura constante, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1-163.

Paltín Castillo, A. O. (2019). Comparación técnica y económica de un sistema de purificación solar a una vertiente vs dos vertientes. Determinación de la calidad y rendimiento para ser utilizado en pequeñas comunidades que no tienen acceso al líquido vital. Guayaquil, Ecuador. 2-81.

Panchal, H. N & Patel, S. (2017). An extensive review on different design and climatic parameters to increase distillate output of solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 69(2017), 750– 758.

Parra Ortega, P. Estudio comparativo en el uso de colorantes naturales y sintéticos en alimentos, desde el punto de vista funcional y toxicológico, Universidad Austral de Chile, pp. 1-80, (2008)

Pocaterra, L. (2002). Diseño de planta experimental de desalinización solar para abastecer agua potable a zonas rurales. Caracas.

Porta, M.A. Fernández, J.L. Chargoy N. (1998). La Experiencia Mexicana en el Diseño y Operación de Destiladores Solares. *Información Tecnológica*. 9 (4), 261-266.

Quitiaquez Sarsoza, W. G. (2015), Diagnóstico del consumo de energía eléctrica en el proceso de destilación de agua en los laboratorios de ciencias de la vida de la universidad politécnica salesiana, sede Quito, campus girón durante el año 2014. Implementación de un destilador solar térmico. Latacunga, Ecuador. 1-122

Rajaseenivasan, T. Tinnokesh, A. P. Rajesh Kumar, G. & Srithar, K. (2016). Glass basin solar still with integrated preheated water supply – Theoretical and experimental investigation. *Desalination* 398, 214–221.

Rajesh, K., et al. (2012). Predicting energy requirement for cooling the building using artificial neural network. *Technology Innovations in Renewable Energy*. 1, 113–121.

Rajesh, K., et al. (2013). Predicting total conduction losses of the building using artificial neural network. *The International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 1 (1), 1–4.

Ramírez, I. O. (2020). Acondicionamiento térmico doméstico mediante concentración solar por direccionamiento automático este-oeste. Tesis Profesional. Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables. Facultad de Ingeniería. UAEM.

Ramírez de León J. Uresti Marín, R. M. Aldana Madrid, M. L. Loarca Piña. Ma. G. (2013), *Avances de Ciencia y Tecnología alimentaria en México*, Universidad Autónoma de Tamaulipas, pp. 1-663.

Renau Piqueras J., Faura M., (2012), *Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido*, pp 73-92.

Restrepo Gallego, M., (2007), *Sustitución de Colorantes en Alimentos*, revista lasallista de investigación vol. 4 no. 1, pp. 35-39.

Ribaya Mercado, J. Blumberg J. B. Luteína y zeaxantina, (2017), *Función potencial para prevenir enfermedades*, Antioxidants Research Laboratory, Jean Mayer USDA Human Nutrition Research Center on Aging, Tufts University, Boston, MA.

Rodríguez Iza, E. L., *Cultivo mixotrófico de la microalga Coenochloris sp Con fracción soluble de papa (solanum phureja L) para la obtención de pigmentos (caratenoides)*, (2016), Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, pp. 1-56.

Rojas Michea, C. V., *Actividad fotocatalítica de nanoestructuras ZnO y ZnO:M (M: Fe, Cu, Ag)*, (2016), Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, pp. 1-123.

Rovina, K.; Acung, L.A.; Siddiquee, S.; Akanda, J.K.; Shaarani, S.M. (2017). Extraction and analytical methods for determination of Sunset Yellow (E 110)—A review. *Food Analytical Methods*.10, 773–787.

Rubio Cerda, E. (2005). *Estudio experimental de un destilador solar*. La paz B.C.S.

Sabando Álvarez, A. V. (2017). Diseño y construcción de un destilador solar para aguas residuales en la ciudad de Riobamba. Riobamba, Ecuador. 1-82

Sajjad, A. K. L., Shamaila, S., Tian, B., Chen, F. & Zhang, J. (2010). Comparative studies of operational parameters of degradation of azo dyes in visible light by highly efficient WO_x/TiO₂ photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1), 781-791.

Santos ajimes A. (2009). Diseño, Construcción y Caracterización de un destilador solar de caseta. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga. 7-16.

Sathyamurthy, R. El-Agouz, S. A. & Dharmaraj, V. (2015). Experimental analysis of a portable solar still with evaporation and condensation chambers. *Desalination*, 367, 180–185.

Sierra-Rosales, P. Berríos, Ch. Miranda-Rojas, S. Squella, J. (2018). Experimental and theoretical insights into the electrooxidation pathway of azo-colorants on glassy carbon electrode. *Electrochimica Acta*. 290, 556-567.

Slimen IB, Najar T, Abderrabba M (2017) Chemical and antioxidant properties of betalains. *J. Agric. Food Chem.* 65(4): 675-689.

Stevens, L.J.; Kuczhek, T.; Burgess, J.R.; Stochelski, M.A., Arnold, L.E.; Galland, L. (2013). Mechanisms of behavioral, atopic and other reactions to artificial food colors in children. *Nutrition. Reviews*. 71, 268–281.

Stintzing FC, Carle R (2004) Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends Food Sci. Technol.* 15(1): 19-38.

Tinioco, O. R. Medina A. M. Zapata H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Revista de la facultad de ingeniería industrial* 14(2), 9-15.

Torres Galindo, A. L., Vanegas López, G. J., (2018), Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*citrus sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*saccharum officinarum*) y borra de café (*coffea arabica*) para la remoción del colorante azul brillante fcf, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, pp. 1-108.

Torres Martín, D. Mejía Moncayo, C. (2016), Modelado y Simulación de un Destilador Solar. Bogotá, Colombia, 1-6.

Torres Rodríguez, E., Guillén González, Z., Hermosilla Espinosa, R., Arias Cedeño, C. Q., Voguel, C., Almeida Saavedra, M., (2014), Empleo de ultrasonido en la extracción de curcumina a partir de su fuente natural, Revista Cubana de Plantas Medicinales, Vol. 19, No. 1. Pp. 1-9.

Tukenmez, N. Koc, Ozturk, M. (2020). Development and performance analysis of a concentrating collector combined plant for multigeneration purposes. Energy Conversion and Management. 205 (2020), 112415.

Yslas, K. (2018). Estudio del efecto de la luz solar y del peróxido de hidrógeno en la degradación de un colorante usando un catalizador de cobre y cobalto. 1-69

Zhang, T. Yan, Z.W. Wang L.Y, Zheng W.J. & Su, Y.H. (2020). Comparative study on the annual performance between loop thermosyphon solar water heating system and conventional solar water heating system. Solar Energy. 197, 433-442.

Páginas web:

Sitiosolar.com. Portal de energías renovables. Recuperado de: <http://www.sitiosolar.com/losdestiladores-solares/>. Consulta: 17 mayo 2020.

Recuperado de: <https://www.flavonoides.org/xantofilas/>. Consulta: 15 de febrero 2022.

Recuperado de: <http://flavorix.com/producto/colorante-natural-carbon-vegetal-e-153/>, Consulta: 15 de febrero 2022.

Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_de_fotoelectrones_emitidos_por_rayos_X#cite_ref-2, consulta: 25 de mayo 2022.