



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

***TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON OXIDACIÓN AVANZADA
(OZONACIÓN) Y BIORREMEDIACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DEL
COLORANTE BENCIDINA "ROJO CONGO".***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

BÁRBARA CAROLINA HERNÁNDEZ VELÁZQUEZ

Directora de Tesis: Dra. Luz María Lazcano Arriola

MÉXICO, CDMX, OCTUBRE 2023.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profesor: Dr. Durán Moreno Alfonso
VOCAL:	Profesor: Dra. Lazcano Arriola Luz María
SECRETARIO:	Profesor: Dr. García Reynoso José Agustín
1er. SUPLENTE:	Profesor: Dr. Sánchez Mendoza Ernesto
2° SUPLENTE:	Profesor: M. en C. Manríquez Tolsá Úrsula

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Protección Ambiental, Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Química de la UNAM, Ciudad Universitaria. Ciudad de México, México.

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Lazcano Arriola Luz María _____

SUSTENTANTE:

Bárbara Carolina Hernández Velázquez _____

ÍNDICE

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	I
ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	III
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
CAPÍTULO 2.....	1
MARCO TEÓRICO	1
2.1 EL AGUA	1
2.1.1 EL AGUA EN MÉXICO	1
2.2 PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO.....	2
2.2.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA	3
2.2.2 ¿POR QUÉ SE CONTAMINA TAN RÁPIDO EL AGUA?	6
2.2.3 EXPLOSIÓN DEMOGRÁFICA Y DESIGUALDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA.	7
2.3 EL AGUA EN LA INDUSTRIA TEXTIL.....	8
LOS DAÑOS QUE CAUSA ESTA INDUSTRIA AL AMBIENTE SON:	9
2.3.1 CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE PRENDAS DE VESTIR EN MÉXICO.	9
2.4 ¿QUÉ SON LAS AGUAS RESIDUALES?	10
2.4.1 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES	10
2.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL	11
2.5 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN MÉXICO.....	11
2.5.1 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO.....	12
2.5.2 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO QUÍMICO Y FÍSICOQUÍMICO	13
2.5.3 TIPOS DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)	14
2.6 PROCESO DE OZONACIÓN.....	15
2.7 LOS COLORANTES.....	17
2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES TEXTILES.....	18
2.7.2 COLORANTES TIPO AZO.....	19
2.7.3 CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES AZO	20
2.7.4 MÉTODO DE OBTENCIÓN DE COLORANTES AZOICOS	21
2.7.5 BENCIDINA (ROJO CONGO)	22
2.8 PROCESOS DE BIOREMEDIACIÓN CON MICROALGAS	23
2.8.1 MICROALGAS EMPLEADAS EN LOS PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN	24
2.8.2 Microalga Chlorella vulgaris.	24
CAPÍTULO 3.....	29
METODOLOGÍA.....	29
CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	29
La metodología del trabajo experimental consistió en las siguientes etapas:.....	29

I.	<i>DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN Y LONGITUD DE ONDA PARA EL COLORANTE ROJO CONGO.</i>	29
II.	<i>TRATAMIENTO QUÍMICO.</i>	31
a)	Ozonación directa: Ozono molecular	31
b)	Ozonación indirecta: radical hidroxilo.	34
•	Cantidad de ozono suministrado	35
III.	<i>TRATAMIENTO BIOLÓGICO.</i>	36
CAPÍTULO 4.		42
RESULTADOS		42
4.1	<i>DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN Y LONGITUD DE ONDA PARA EL COLORANTE ROJO CONGO.</i>	42
4.1.1	Influencia de la concentración y el pH en el cálculo de longitud de onda.	43
4.1.2	Elección de longitud de onda correcto	43
4.2.	<i>TRATAMIENTO QUÍMICO</i>	46
4.2.1.	Producción de Ozono molecular y Radicales Hidroxilo	49
4.2.2.1.	Temperatura	56
4.2.3	Primer experimento	56
4.2.4	Segundo experimento	60
4.2.5	Tercer experimento	62
4.2.6	Cuarto experimento	64
4.2.7	Quinto experimento	66
4.2.8	Sexto experimento	67
4.3	<i>NORMATIVIDAD PARA COLORANTES</i>	70
4.4	<i>OTROS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE OZONACIÓN</i>	71
4.4.1	TIEMPO DE ALMACENAMIENTO	71
4.5	<i>CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE OZONACIÓN</i>	72
4.6	<i>CUANTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL RADICAL HIDROXILO.</i>	74
4.7	<i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO.</i>	77
4.8	<i>BIORREMEDIACION</i>	81
4.8.1	Curva de crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	81
4.8.2	Remoción del colorante con microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	85
MODELO CINÉTICO DE LA MICROALGA <i>CHLORELLA VULGARIS</i>		100
CAPÍTULO 5.		103
CONCLUSIONES		103
CAPÍTULO 6.		104
RECOMENDACIONES		104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		105

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1. Formación química de la molécula del agua; unión de las dos moléculas de oxígeno con la molécula de hidrógeno.....	7
Tabla 2.1. Litros de agua gastados por la industria textil.....	10
Figura 2.2. Clasificación de los colorantes de acuerdo con las instituciones.	18
Figura 2.3. Estructura química de la bencidina y del ácido naftilsulfónico.	21
Figura 2.4. Estructura Química del colorante Rojo Congo.	22
Figura 2.5. Microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	25
Tabla 2.2. Parámetros establecidos de 1993 a 1997 para la industria textil.....	27
Tabla 2.3 Parámetros y valores permisibles en Alemania 1996.....	28
Tabla 3.1. Diluciones preparadas para realizar la curva de calibración del colorante rojo Congo.	30
Figura 3.1. Alícuotas de Rojo Congo. a) colorante a pH básico (11), b) colorante a pH ácido (3). .	31
Figura 3.2. Generador de ozono.	32
Figura 3.3. Conexión del equipo para realizar el proceso de ozonación.....	33
Tabla 3.2. Variables planteadas para el proceso con ozono molecular.	34
Tabla 3.3. Variables planteadas para el proceso con radical hidroxilo.	35
Figura 3.4. Reactor tubular vertical. a) ensayo a pH básico, b) ensayo a pH ácido.....	35
Figura 3.5 Orden de los biorreactores para el proceso de Biorremediación.	37
Figura 3.6. Etiqueta de datos utilizados para el primer ensayo de Biorremediación.....	38
Figura 3.7. Colorante rojo Congo al término de la centrifugación, en el fondo se encuentra sedimentada la microalga.	39
Tabla 3.4. Concentraciones modificadas durante los bioensayos con pH ácido.....	39
Figura 3.8. Etiqueta de datos utilizados para el segundo ensayo de Biorremediación.....	40
Figura 3.9. Orden de los biorreactores para el proceso de Biorremediación.	40
Figura 3.10. Sistema de biorreactores para el proceso de Biorremediación incluyendo el biorreactor de Quitosano.....	41
Tabla 4.1. Datos para la curva patrón de colorante Rojo Congo.....	42
Figura 4.1. Curva patrón del colorante Rojo Congo	43
Tabla 4.3. Valores de longitud de onda para el colorante Rojo Congo.....	44
Tabla 4.4. Valores de absorbancia utilizados para realizar la curva de calibración del colorante rojo Congo.....	45
Figura 4.3. Coeficientes de determinación del colorante Rojo Congo para pH ácido, neutro y básico.....	46
Tabla 4.2. Degradación del colorante en el proceso de ozonación con radicales hidroxilo a lo largo de 10 minutos de reacción, con valores diferentes de pH y concentración.....	48
Figura 4.2. Degradación del colorante durante 10 minutos de reacción.....	48
Tabla 4.5. Valores calculados para la producción de ozono y ozono residual durante la oxidación del colorante en los 12 ensayos.....	51
Figura 4.4. Trampa de gas (yoduro) para ozono residual.....	52
Tabla 4.6. Valores reportados del flujo de ozono que pasa por el ozonador.....	53
Tabla 4.7. Valores de pH y porcentaje de remoción obtenidos en los experimentos.....	55
Figura 4.5. Tonalidades del colorante. a) colorante a pH básico, b) colorante a pH neutro, y c) colorante a pH ácido.....	56
Tabla 4.8. Propuesta en el tiempo de contacto en el proceso de ozonación.....	58
Figura 4.6. comparación de los ensayos con ozono molecular (Co= 232 mg/L y Cf= 183 mg/L) y radical hidroxilo (OH°) (Co= 215 mg/L y Cf= 91 mg/L).....	59
Tabla 4.9. valores registrados del primer en ensayo del proceso de ozonación.....	60
Figura 4.6. Segundo ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular (Co= 158.305-mg/L y Cf= 80.351 mg/L) y radical hidroxilo (OH°) (Co= 149.661 mg/L y Cf= 18.799 mg/L).....	61

Tabla 4.10. valores registrados del segundo en ensayo del proceso de ozonación.....	62
Figura 4.7. Tercer ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular (Co= 107.937 mg/L y Cf= 68.052 mg/L) y radical hidroxilo (OH [•]) (Co= 99.546 mg/L y Cf= 13.914 mg/L).....	63
Tabla 4.11. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.....	63
Figura 4.8. Cuarto ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular (Co= 205.408 mg/L y Cf= 120.351 mg/L) y radical hidroxilo (OH [•]) (Co= 179.833 mg/L y Cf= 76.155 mg/L).....	65
Tabla 4.12. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.....	65
Figura 4.9. Quinto ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular-(Co= 113.684 mg/L y Cf= 44.144 mg/L) y radical hidroxilo (Co= 93.856 mg/L y Cf= 9.603 mg/L).....	66
Tabla 4.13. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.....	66
Figura 4.10. Sexto ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular (Co= 98.454 mg/L y Cf= 33.511 mg/L) y radical hidroxilo (Co= 97.994 mg/L y Cf= 5.006 mg/L).....	67
Figura 4.11. Eliminación del 94% del colorante. a) colorante al principio de la reacción, b) colorante al final de la reacción.....	68
Tabla 4.14. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.....	68
Tabla 4.15. Concentración y porcentajes de remoción en la eliminación del colorante.	70
Figura 4.12. Cinética de la reacción de colorante rojo Congo en el segundo ensayo.	73
Tabla 4.16. Orden de reacción de los ensayos realizados.....	74
Tabla 4.17. Relación entre la concentración de ozono y la producción de radicales hidroxilo.	76
Tabla 4.18. Comparación de los ensayos con un tiempo de contacto de 20 minutos	78
Tabla 4.19. Comparación de los ensayos con un tiempo de contacto de 20 minutos y el ensayo de 10 minutos.	79
Tabla 4.20. Comparación de los ensayos con un tiempo de contacto de 30 minutos.	80
Figura 4.13. Curva de crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en un mes.	82
Figura 4.14. Curva de calibración de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en una semana.	83
Figura 4.15. Curva de crecimiento de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en una semana.	84
Tabla 4.21. Resultados de remoción del colorante a lo largo de los días de experimentación y cambio de pH en la solución.	85
Figura 4.16. Curva de calibración de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> en una semana.	86
Figura 4.17. Concentración del colorante expuesto a la luz UV.....	87
Figura 4.18. Morfología de la microalga sin presentar deformaciones.....	87
Figura 4.19. Porcentaje de remoción del colorante Rojo Congo con microalga <i>Chlorella vulgaris</i>	88
Figura 4.20. Remoción del colorante a través de los días de experimentación.	89
Figura 4.21. Concentración del colorante ante la luz UV y el crecimiento del alga dentro del biorreactor de cultivo, en el segundo experimento.	90
Figura 4.22. Remoción del colorante en el segundo experimento.....	90
Figura 4.23. Morfología de la microalga en presencia del colorante durante el segundo experimento.....	91
Figura 4.24. Concentración del colorante en el tercer experimento.	92
Figura 4.25. Concentración del colorante en presencia de luz UV, crecimiento de la microalga en el tercer experimento.	93
Figura 4.26. % de remoción del colorante Rojo Congo.	94
Figura 4.27. Estructura de la microalga en presencia del colorante rojo Congo en el tercer experimento.....	94
Figura 4.28. Concentración del colorante a lo largo de los días, en el cuarto ensayo.	95
Figura 4.29. Influencia de la luz UV sobre el colorante y crecimiento del alga en el cuarto experimento.....	96
Figura 4.30. Remoción del colorante en el cuarto experimento.....	97
Figura 4.31. Microalga en el proceso de remoción del colorante en el cuarto experimento.	97
Tabla 4.22. Porcentajes de remoción obtenidos.....	98
Figura 4.32. Microalga <i>Chlorella vulgaris</i> con quitosano.	99
Tabla 4.23. Concentración y pH de las soluciones con quitosano.....	100

Figura 4.33. Biosorción de microalga, teñida de colorante rojo Congo, tras la remoción del colorante..... 100

Tabla 4.24. Orden de reacción de los ensayos realizados..... 101

Figura 4.34. Cinética de la reacción de la microalga *Chlorella vulgaris* con el colorante rojo Congo en el primer ensayo..... 102

RESUMEN

En este trabajo de investigación se realizaron ensayos con el objetivo de establecer los parámetros de operación más convenientes para el método de oxidación avanzada “ozonación” con el fin de eliminar al colorante Bencidina (rojo Congo) de un agua residual proveniente de la industria textil, para ello, se desarrolló un diseño de experimentos en el cual se prepararon doce muestras de colorante con diferentes concentraciones, estos ensayos se dividieron en dos grupos, el primero contenía seis experimentos, en los cuales los ensayos se realizaron con ozono molecular, en el segundo grupo se encontraban los seis ensayos restantes los cuáles se realizaron en presencia de la especie oxidante, el radical hidroxilo. Se utilizó un generador de ozono y un reactor de contacto de burbuja para realizar la metodología; los residuos del ensayo de ozonación se utilizaron para realizar un ensayo de biorremediación y comparar ambos métodos de tratamiento. Los resultados de ambos procedimientos (radical hidroxilo versus ozono molecular) evidencian que existen diferencias significativas entre estos. Por lo tanto, se concluye que la realización de un ensayo en presencia del radical hidroxilo y con pH alcalino hace que el proceso de ozonación tenga una buena eficiencia y se logre eliminar hasta el 80% del colorante en el agua, además, al trabajar un proceso fisicoquímico como la ozonación como pretratamiento a un proceso biológico (biorremediación) ambos demuestran ser eficientes y viables en la remoción del colorante.

Palabras clave: Biorremediación, Rojo Congo, ozonación, radical hidroxilo.

ABSTRACT

In this research work, trials were carried out with the aim of establishing the most convenient operating parameters for the advanced oxidation method "ozonation" to eliminate the dye Benzidine (Congo red) from textile industry wastewater. For this purpose, a design of experiments was developed in which twelve dye samples with different concentrations were prepared. These trials were divided into two groups, the first group contained six experiments in which the trials were performed with molecular ozone, while the second group consisted of the remaining six trials performed in the presence of the oxidizing species, the hydroxyl radical. An ozone generator and a bubble contact reactor were used to carry out the methodology. The residues from the ozonation trial were used to conduct a bioremediation trial and compare both treatment methods. The results of both procedures (hydroxyl radical versus molecular ozone) show significant differences between them. Therefore, it is concluded that conducting a trial in the presence of the hydroxyl radical and with alkaline pH ensures that the ozonation process has a good efficiency and it can remove up to 80% of the dye in the water. Additionally, by using a physicochemical process like ozonation as a pre-treatment to a biological process (bioremediation) both methods prove to be efficient and viable in the removal of dyes.

Keywords: Bioremediation, Congo Red, ozonation, hydroxyl radical.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

En nuestro país, la industria textil es una de las más importantes. En los últimos años aportó 3.2% del PIB de las industrias manufactureras y ocupó la décima posición entre las actividades económicas más importantes en el año 2020 (Geografía, 2020); por otro lado, es de las industrias con mayor consumo de agua, para producir 1 kilogramo de tela de algodón se utilizan 10,800 litros de agua, además de 15,000 litros de agua para preparar el/los colorantes (Henríquez, 2021). En su mayoría, la cantidad de aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza y son arrojadas a ríos, mares, manantiales, entre otros.

Eliminar este colorante del agua evita la contaminación de los lugares a los cuales podría llegar esta agua residual, provocando la muerte de animales endémicos y de la población; agregado a esto, reutilizar el agua en el mismo proceso, precaviendo del alto consumo de agua que esta industria emplea.

Los colorantes utilizados en esta industria se conocen como azoicos y se caracterizan por tener al menos dos anillos aromáticos unidos a un grupo azo ($-N=N-$), son solubles en agua, altamente contaminantes y tóxicos; representa uno de los factores de contaminación de mayor preocupación, debido a que este tipo de compuestos son fabricados para ser muy resistentes a los diferentes tratamientos que se le da a las fibras textiles; además, algunos toleran la degradación microbiana, provocando que sean difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales (Allinger et al, 1971).

Este trabajo se centra en estudiar la importancia de los componentes azoicos, en específico de la sal sódica del ácido benci- dinadiazobis-1-naftilamina-4-sulfónico que le da estructura al colorante “bencidina” (Rojo Congo), por la facilidad de su síntesis y gracias a la versatilidad de colores que se pueden generar dependiendo de su carácter ácido o básico; además de ser altamente contaminante y tóxico, (cancerígeno); es utilizado para colorear fibras en la industria textil, es aplicado para teñir tejidos para su estudio en microscopio y como indicador ácido-base; ya que, se vuelve rojo en presencia de base (alcalinidad) y azul cuando se expone a ácidos.

A través de la investigación se aborda una solución viable para resolver el problema de la contaminación del agua por el colorante azoico bencidina, para ello, se analiza la eficiencia del tratamiento de aguas residuales a través del proceso de oxidación avanzada (ozonación), con el fin de determinar si este proceso unitario de oxidación avanza es suficiente para eliminar este contaminante o si por el contrario, es necesario de un tratamiento previo o secundario como el proceso de biorremediación, con la finalidad de conseguir la máxima remoción del colorante.

En el presente trabajo de investigación propone una metodología para eliminar al colorante Rojo Congo a través de un proceso de oxidación avanzada (Ozonación), posteriormente un proceso biológico (Biorremediación) con las microalgas *Chlorella vulgaris*; sí como identificar las condiciones óptimas de operación para la remoción del colorante (Rojo Congo) en un medio acuoso.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la eficiencia de remoción para el colorante azoico Rojo Congo de un efluente proveniente de aguas residuales con un proceso unitario de oxidación avanzada (ozonación) y un proceso biológico con la con microalga *Chlorella vulgaris*.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Establecer las condiciones óptimas de operación para la remoción del colorante Rojo Congo en un medio acuoso.
- Identificar las variables que influyan en el desempeño de la remoción del colorante.
- Establecer un modelo cinético para el método de oxidación avanzada y uno para el proceso biológico con microalga (*Chlorella vulgaris*) para determinar la rapidez de eliminación del colorante.
- Comprobar la eficiencia de la ozonación como pretratamiento a un proceso biológico.
- Comparar la eficiencia de remoción de ambos procesos (químico y biológico).

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 EL AGUA

El origen de la palabra **agua** proviene del latín *aqua*. Se puede definir como un cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos volúmenes de hidrógeno (H₂O).

Es un líquido inodoro e insípido, el cual es capaz de refractar la luz; es una sustancia polar, esto hace que se disuelva en casi cualquier sustancia, (la disolución se basa en las reglas de solubilidad), el calor la evapora y es la que forma la lluvia, los ríos, los mares, entre otros; el 71% de la superficie de nuestro planeta está cubierto por agua (Timboe et al, 2019).

Puede presentar los tres estados de la materia; en condiciones normales, (100° C y 1 atm), se encuentra en estado líquido, cuando se disminuye su temperatura por debajo de los 0° C se encuentra en estado sólido, el cual es capaz de flotar en el estado líquido; por otro lado, al aplicar poca presión o al aumentar la temperatura alrededor de 100° C (condiciones a nivel del mar) el agua se evapora y asciende formando vapor, haciendo que el agua se encuentre en estado gaseoso, esto porque el vapor es menos denso que el aire (Vilaclara, 2015).

2.1.1 EL AGUA EN MÉXICO

México dispone aproximadamente del 0.1% del total del agua dulce disponible a nivel mundial. En nuestro país, la disponibilidad del agua es cada vez menor, lo que trae consigo diversas problemáticas, entre ellas, limita la producción de alimentos, ya que, el reparto de este líquido no es homogéneo a lo largo del territorio. Debido al estrés hídrico que presenta nuestro país, se estima que en 40 años habrá problemas para abastecer a la población de agua (CONAGUA, 2019).

En el año 2022, el estado de Nuevo León, en México, el cual cuenta con 51 municipios, presentó una sequía como no se había presentado en el país desde la “**megasequía**” de la zona Centro de la República, entre los años 1438-1460, provocando pérdidas de cosechas, hambre y mortalidad; el 74.5% del estado se encontraba en esta condición. Así

mismo, la falta de lluvias en los estados de Sinaloa, Chihuahua, Querétaro y Sonora provocó sequía y que la producción agrícola y ganadera sufriera pérdidas (Pérez, 2022).

En 1944, México y Estados Unidos firmaron el **Tratado de Aguas Internacionales**, el cual es una colaboración entre los dos países para administrar conjuntamente las aguas de los ríos internacionales (Hatch, 2017).

2.2 PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO

Nuestro país es considerado como una zona semidesértica, (lugar en donde predominan condiciones de sequedad extrema y vegetación escasa o reducida).

El agua llega a cada hogar, oficina, estancia y demás cumpliendo el siguiente ciclo: 1,489 millones de metros cúbicos de agua llegan en forma de precipitación entre los meses de junio a septiembre. El 49.6% del agua de lluvia se recibe en los estados del sur, (Tabasco, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, entre otros). El 22% del agua de nuestro territorio escurre por los ríos o arroyos y tan solo el 6% se infiltra al subsuelo de forma natural, haciendo que se recarguen los mantos acuíferos. El 73% del agua que se desprende desde el suelo y de la superficie cubierta por plantas regresa a la atmósfera por evaporación (CONAGUA, 2019).

Cabe destacar que el 95.5% del agua total del planeta es agua salada, la cual no puede ser utilizada para consumo. Es por ello por lo que una crisis en relación con el agua se está presentando con más cotidianidad. Al año se renuevan únicamente 471.5 mil millones de metros cúbicos, lo cual cataloga a nuestro país con un índice de baja disponibilidad de agua (Timboe et al, 2019).

Este elemento es crucial para el funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de servicios ambientales de los que dependemos para sobrevivir; es un factor estratégico para el desarrollo de nuestro país y del mundo. Sin embargo, la contaminación, la desigualdad de distribución, la falta de ordenamiento, la sobreexplotación y la explosión demográfica provocan que sea complicado cumplir con la demanda que cada ciudadano necesita para vivir dignamente.

En México, la falta de lluvias debido al cambio climático y la falta de gestión (IMTA, 2023), han sido los principales factores que provoca escasez de agua potable en los hogares.

Agregado a esto, hay zonas en donde la mala calidad con la que llega el agua hace que las enfermedades proliferen. Del año 2020 al año 2023, la población mexicana pasó de 126 millones a 129 millones (INEGI, 2023), ubicando a México en el lugar número 10 dentro de las naciones más pobladas del mundo; esto significa que la población creció aproximadamente un millón cada año, provocando la construcción de viviendas sobre las áreas de carga o conservación de agua.

2.2.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

En el año 2010 la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoció que el acceso al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el correcto desarrollo de los ecosistemas. Fue para el año 2012 que en nuestro país se reconoció este derecho humano y se plasmó en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; en este se establece que *“toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible”* (Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917). El derecho a tener agua potable y salud significa tener el agua necesaria, tanto para el uso personal como doméstico libre de microorganismos que representen una amenaza para la salud humana.

Se denomina contaminación a la introducción de cualquier agente, (químico, físico o biológico), cuya presencia o acumulación tiene efectos nocivos en el entorno natural, la salud y el bienestar de las personas. Las sustancias que se incorporan al entorno pueden afectar la calidad del agua, del aire y/o el suelo; la magnitud de la contaminación depende de cuatro aspectos importantes:

- Cantidad de contaminante
- Tipo de contaminante
- Vía de ingreso
- Tipo de medio al que se adhiere.

Si bien, la contaminación se genera por fuentes naturales como arrastre de hojarasca, gases transportados por la lluvia, entre otros, la contaminación producida por el hombre es mayor y excesiva.

Entre las principales actividades que provocan la contaminación del agua se encuentran:

a) Uso de pesticidas y fertilizantes

Los pesticidas, fertilizantes y plaguicidas contaminan cuando son arrastrados por el agua de los cultivos hasta los ríos y mares, en donde se introducen en la cadena alimenticia provocando la muerte de varias formas de vida necesarias en el balance de algunos ecosistemas. Estos compuestos químicos provocan cada año la muerte de peces tanto en agua dulce como salada, tienen la capacidad de acumularse en los tejidos de algunos peces que a su vez ponen en peligro la vida de sus consumidores. Diversas investigaciones señalan que algunas clases de pesticidas pueden ser cancerígenos (sustancia que, por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puede ocasionar cáncer o incrementar su frecuencia), teratogénicos (agente capaz de causar un defecto congénito) y mutágenos (Que puede provocar mutaciones en los seres vivos).

b) La deforestación y erosión del suelo

Se denomina deforestación a la reducción o pérdida de bosques y selvas debido al impacto de actividades humanas como la construcción de infraestructuras, la expansión descontrolada de la agricultura debido a la explosión demográfica, la explotación del suelo por la alta demanda de recursos, las actividades de minería, entre otras.

Por otro lado, la erosión del suelo es el proceso en el cual se va perdiendo poco a poco la capa superficial del suelo, que proporciona a las plantas la mayoría de los nutrientes y el agua que necesitan.

c) Contaminación térmica

Se denomina contaminación térmica al proceso que modifica la temperatura del medio ambiente afectando la calidad del aire, el agua y de los seres vivos. La contaminación térmica es ocasionada principalmente por la actividad industrial, ya que introduce calor al ambiente de manera descontrolada, algunas actividades que provocan esta contaminación son:

- **El uso del agua como sistema de refrigeración:** se produce por las plantas industriales y manufactureras. Estas plantas utilizan el agua para evitar el calentamiento excesivo de sus máquinas; cuando esta agua es devuelta a su fuente natural, la temperatura de ese cuerpo de agua se incrementa.

- **La deforestación y erosión de los suelos:** estos factores incrementan el nivel o exponen masas de agua a la luz solar, lo cual ocasiona su calentamiento anormal.
- **Las causas naturales:** los volcanes y la actividad geotérmica pueden incidir en el calentamiento de las aguas subterráneas y oceánicas.

Los principales efectos que provoca esta contaminación son:

- **La reducción en los niveles de oxígeno en el agua:** El agua caliente puede retener cantidades menores de oxígeno disuelto que el agua fría, debido a su exceso de energía interna. Esto ocasiona que el agua sea menos idónea para la vida, sofocando especies animales.
- **Incremento de toxinas:** el agua de las industrias que fluye hacia mares y ríos puede contener toxinas y estas tienen un efecto sobre la ecología de la zona, haciendo que se desarrollen más enfermedades.
- **Migración masiva:** el aumento o disminución de temperaturas pueden causar que las especies migren a ambientes donde las condiciones sean más adecuadas, afectando a organismos que dependen de estas especies para su supervivencia.

La calidad de las aguas superficiales y subterráneas disminuye debido a la contaminación por la descarga de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias sin tratamiento en los cuerpos de agua receptores poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas. La descarga de aguas residuales de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos (ambiental, 2009).

d) Calentamiento global

En los últimos años el calentamiento global se ha convertido en el tema principal de muchas convenciones por sus efectos a nivel mundial. Cuando el clima es alterado por medio del aumento de temperatura en la Tierra, se conoce como calentamiento global; este cambio incluye diversas problemáticas como: el deshielo de los polos, la desaparición de los cuerpos de agua, intensificación de huracanes y hay una alteración en las lluvias (Balog, 2010).

El agua es el medio a través del cual la sociedad percibe muchos de los impactos de la crisis climática. En ella se destacan los diversos riesgos que supone para los sectores de la energía, la agricultura, la salud y el transporte.

Los factores no climáticos como el crecimiento de la población, la migración, el desarrollo económico, la urbanización, los cambios ambientales y geomórficos naturales o derivados del uso de la tierra ponen en peligro la sostenibilidad de los recursos porque disminuyen el suministro de agua o aumentan su demanda; dichas interacciones suelen dar lugar a fenómenos desiguales e imprevistos como las sequías.

e) Actividades industriales, agrícolas y ganaderas

La industria de la comida produce una gran contaminación, principalmente por los desechos animales, los antibióticos, las hormonas, los productos químicos, así como los fertilizantes y pesticidas que se usan para fumigar los cultivos.

f) Derrames de combustibles

Un combustible es un material que se pueden encontrar en forma de líquido, sólido o gas, el cual libera energía por medio de la combustión, puede liberar energía luminosa y energía calorífica.

Los combustibles contaminan este líquido vital, ya que, los hidrocarburos forman con el agua una capa impermeable que obstaculiza el paso de la luz solar que utiliza el fitoplancton para realizar el proceso de la fotosíntesis, interfiere el intercambio gaseoso, cubren la piel y las branquias de los animales acuáticos provocándoles la muerte por asfixia (ambiental, 2009).

2.2.2 ¿POR QUÉ SE CONTAMINA TAN RÁPIDO EL AGUA?

La molécula del agua (figura 2.1) es polar, esto significa que existe simetría en la distribución de los átomos de la molécula, el oxígeno es más electronegativo, es decir, es capaz de atraer mejor los electrones que el hidrógeno.

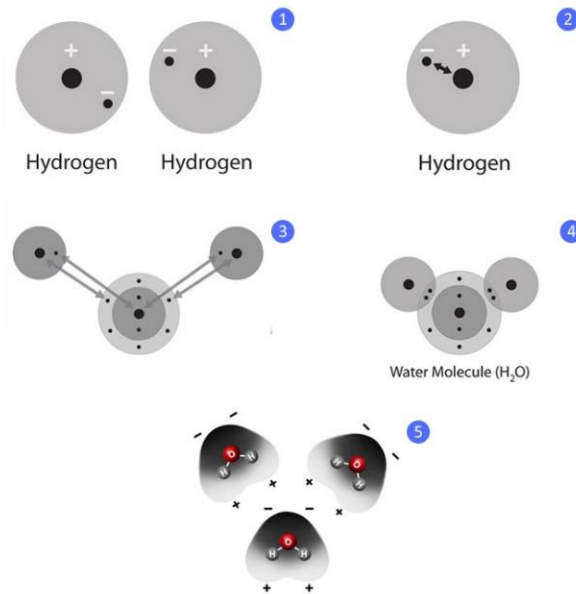


Figura 2.1. Formación química de la molécula del agua; unión de las dos moléculas de oxígeno con la molécula de hidrógeno.

Al ser una molécula polar, tiene la capacidad de formar enlaces de hidrógeno con otras moléculas, por lo cual, es capaz de diluir casi cualquier tipo de sustancias, se denomina “**disolvente universal**”. Esta característica hace que los contaminantes, principalmente los químicos que llegan a este recurso, por vertidos o arrastre, alteren su calidad. Cuando su concentración o cantidad exceden ciertos niveles, la capacidad natural de autodepuración, no es suficiente para revertir las afectaciones (Vilaclara, 2019).

2.2.3 EXPLOSIÓN DEMOGRÁFICA Y DESIGUALDAD DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA.

En la última época se ha presentado una crisis hídrica alrededor del planeta, provocada principalmente por la escasez del agua. De acuerdo con INEGI, la distribución a los hogares fue restringida; en 2020 se contabilizaron aproximadamente 29 048 251 hogares en México, de los cuales, 21.2 millones recibían agua diariamente, 4.4 millones cada tercer día, 1.6 millones dos veces por semana y 1.08 millones una vez a la semana. Además, el 95% del agua distribuida en México es para las zonas urbanas y tan solo 5% para zonas rurales. Las redes de distribución que abastecen las zonas rurales regularmente presentan fugas en las cuales se pierde un 40% de agua potable. En las ciudades, las industrias usan agua

de pozo para sus procesos y los permisos de concesión que les otorgan están sobre estimados sin que exista una limitación sobre el volumen que solicitan.

En la Ciudad de México, los sectores que más consumen agua potable para llevar a cabo sus procesos son: elaboración de refrescos y otras bebidas no alcohólicas, fabricación de papel, industria cervecera, industria textil y elaboración de harina de maíz. En las últimas décadas, alrededor del mundo y en México, los pobladores han extraído miles de millones de litros de agua de los acuíferos subterráneos, lo cual ha provocado una desecación lenta, pero, constante de los ecosistemas fluviales.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el año 2017 reportó que México cuenta con 663 acuíferos, de los cuales, 106 estaban reportados como sobre explotados, es decir, ya no tenían agua, 15 presentaban intrusión de agua salada y 31 tenían suelos salinos o con agua salobre.

En pocas palabras, el abastecimiento del agua en México es interrumpido por diversos problemas ambientales, que parten desde la sobreexplotación de los mantos acuíferos, hasta la falta de ordenamiento sobre las concesiones.

2.3 EL AGUA EN LA INDUSTRIA TEXTIL

La Industria textil en México produce fibras sintéticas, prendas de vestir, calzado, artículos para baño, telas, entre otros productos. Económicamente, de los insumos que utiliza esta industria, el 57.9% son nacionales y el 42.1% importados; a su vez, 58.9% de los clientes de la Industria textil y de la confección corresponden principalmente a la demanda intermedia (los productos van a otro proceso productivo) y 41.1% corresponde a la demanda final (Economía, 2015).

El impacto negativo en el medio ambiente ha sido muy notorio, la ONU la clasifica como la segunda industria más contaminante y dañina para el planeta. El consumo excesivo de prendas de vestir hace que se utilicen más combustibles fósiles para su manufactura afectando a los ecosistemas por la gran cantidad de agua que requiere la fabricación de una sola prenda. La problemática de la industria de la moda se mide analizando la huella hídrica, que es el agua que se utiliza para la producción de materias primas, durante el

proceso de fabricación de las prendas y después en el cuidado que se le da a la ropa para lavarla y conservarla.

Un ejemplo del impacto que ha tenido esta industria fue en los años 80, con la industria soviética del algodón, en la cual el lago más grande del mundo **-El mar de Aral-** en el centro de Asia se secura por el uso excesivo del agua para regar los plantíos de algodón, ya que, Uzbekistán cultivó más algodón que ningún otro país. Las consecuencias de esto se produjeron cuando el lago se encogió, las grandes cantidades de pesticidas e insecticidas acumulados a lo largo de los años se fueron concentrando y los peces murieron por el alto grado de contaminación (Qobilov, 2015).

Aproximadamente la industria textil utiliza 93.000 millones de m³ de agua al año, lo mismo que consumen 5 millones de personas.

Los daños que causa esta industria al ambiente son:

- Se producen 100.000 millones de prendas cada año. El 75% de estas termina en el basurero y tan solo el 25% es reutilizada.
- Contribuye con el 20% de las aguas residuales contaminadas por sustancias químicas.
- Más del 85% de la ropa está fabricada con fibras de algodón; para producir una prenda se necesitan entre 300 gramos a medio kilo de algodón. Para producir 1 kg de esta fibra se necesitan 10.000 de agua limpia.
- Esta industria consume un aproximado de 387.000 millones de litros de agua.
- Al año produce el 8% de las emisiones de CO₂, 850 toneladas, (Parlamento Europeo, 2022)

2.3.1 CANTIDAD DE AGUA UTILIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE PRENDAS DE VESTIR EN MÉXICO.

La industria textil es una de las industrias que más agua consume, aproximadamente entre 80 y 150 litros por kilogramo de tela procesada. La cantidad de agua que se emplea en la fabricación de prendas puede variar de acuerdo con el tipo de fibras con las que se trabaje, en la tabla 2.1 se observa un aproximado de los litros de agua que se emplean para la elaboración de ropa que utiliza diariamente una persona.

Tabla 2.1. Litros de agua gastados por la industria textil.

TIPO DE PRENDA	LITROS DE AGUA UTILIZADOS
Jeans	10.800
Traje	4.000/5.500
Tenis	4.400
Playera de algodón	2.700
Zapatos	4.400
Jersey	2.200
Camisa	1.500

Fuente: Moda letal, 11.000 litros de agua para unos vaqueros, 01 de julio de 2020

2.4 ¿QUÉ SON LAS AGUAS RESIDUALES?

Se denomina “**agua residual**” al agua que está contaminada con desechos y materia orgánica, detergentes, grasas, aceites, colorantes, entre otros contaminantes. Los patógenos que contiene este tipo de residuos provocan graves enfermedades; contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, además, contaminan mantos acuíferos por el exceso de nitratos y sales que son solubles en las mismas. Estas proceden del empleo de agua natural o de la red (Ramalho, 1996).

2.4.1 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

Para clasificar este tipo de aguas residuales es necesario tener en cuenta las características de cada población o de las industrias de las cuales provienen, también, dependen del sistema empleado para su recolección.

- Aguas residuales domésticas: procedentes de zonas residenciales o similares.
- Infiltraciones y aportaciones incontroladas: aguas que entran de forma directa o indirecta en la red de alcantarillado y no se conoce exactamente su composición.

- Pluviales: aguas resultantes de las escorrentías superficiales, con metales pesados como contaminantes.
- Aguas de complejos industriales u hospitalarios.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Como se conoce, la variación de componentes en las aguas residuales procedentes de la industria textil es extensa; estos residuos pueden encontrarse en forma disuelta o no disuelta. Principalmente se encuentran **tensioactivos** (productos químicos que disminuyen la tensión superficial de una interfase, los cuales tienen la función de tintura, humectante, emulgente, etc.); **ácidos** (principalmente ácido sulfúrico o acético); **alcalosis**, **aceites minerales y metales pesados** (líquidos derivados del petróleo) y **colorantes**, entre otros.

2.5 TECNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL EN MÉXICO

Las técnicas de oxidación avanzada son eficientes y en su mayoría económicas, por ello, en los últimos años se han catalogado como los procedimientos más utilizados en las industrias para el tratamiento de aguas residuales.

En una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) las etapas de tratamiento de aguas residuales se dividen en:

- a) **Pretratamiento**, en el cual se quitan las impurezas en suspensión, los sólidos, los coloides y los órganos vivos;
- b) **Tratamiento primario**, en este se sedimentan los sólidos grandes que no se eliminaron en el tratamiento anterior; y
- c) **Tratamiento secundario**: en donde los microorganismos aceleran la descomposición de la materia orgánica dentro de un reactor biológico.

Cuando los compuestos son poco biodegradables o la contaminación microbiana es excesiva, se aplican los **tratamientos terciarios**, que consisten en aplicar procesos de oxidación avanzada como la “*ozonación*”. (Osorio and Et, 2010)

2.5.1 TECNICAS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

El tratamiento biológico de aguas residuales se lleva a cabo utilizando microorganismos que son capaces de asimilar la materia orgánica y los nutrientes disueltos en el agua para desarrollarse. En estos, principalmente se elimina la materia orgánica soluble y coloidal, además de compuestos que contienen nitrógeno y fósforo. Gracias a su bajo costo de operación es un tratamiento habitual utilizado en las industrias.

Pueden dividirse en:

- **Sistemas anaerobios:**

Aquí, la materia orgánica actúa como una fuente de carbono, el cual ayuda a la formación de subproductos de crecimiento, (biogás, que es CO₂ y metano); esto ayuda a que se produzca una cantidad mínima de lodos a la vez que se produce biogás, también se aprovechan para producir energía eléctrica.

- **Sistemas aerobios:**

En este proceso se forma el fango debido al alto crecimiento de bacterias aerobias; el oxígeno es el medio en el que se desarrollan estos microorganismos, lo cual conlleva a que se obtengan elevados rendimientos energéticos.

- **Sistemas anóxicos:**

Un sistema anóxico es en el que se utilizan los nitratos, sulfatos, hidrógeno, entre otros como medio de formación y desarrollo para las bacterias y algas; cuando el nitrógeno de la molécula de nitrato se transforma en nitrógeno gas el metabolismo de los microorganismos permite la eliminación biológica del nitrógeno del agua residual, lo cual significa que se lleva un proceso de desinfección.

Los principales tratamientos de aguas residuales a través de un proceso biológico son:

1.- Reactor de lodos activos:

Proceso biológico en continuo, aerobio y con la biomasa en suspensión.

2.- Reactor biológico secuencial:

Este tipo de reactor opera en discontinuo y se dan todos los procesos en el mismo tanque de forma secuencial en el tiempo.

3.- Reactor biológico de membranas:

Este reactor dispone de un módulo de membranas de ultrafiltración en su interior; permite la separación del fango y el líquido mediante membranas.

4.- Reactor biológico de lecho móvil:

Proceso biológico, aerobio y con la biomasa fija.

5.- Reactor de lecho fijo con carbón:

Reactor aeróbico de lecho fijo cuyo material de relleno es carbón lignítico granulado. El carbón filtra, adsorbe y hace de soporte para la biopelícula, además de alimentar a los microorganismos de minerales y elementos traza. El proceso de adsorción hace que el tiempo de residencia de los contaminantes en el interior del reactor aumente con lo que es posible la degradación de compuestos orgánicos persistentes. Es efectivo en el tratamiento de contaminantes difíciles de biodegradar y con color; permite realizar en una sola etapa un tratamiento biológico y fisicoquímico de las aguas residuales.

6.- Reactor UASB

Proceso anaerobio, ideal para efluentes con altas cargas orgánicas (Colombia, 2023).

2.5.2 TECNICAS DE TRATAMIENTO QUÍMICO Y FISICOQUÍMICO

Los tratamientos fisicoquímicos consisten en la adición de productos químicos con la finalidad de alterar el estado físico de las sustancias que permanecen por tiempo indefinido de forma estable en el agua para después convertirlas en partículas susceptibles a la separación por sedimentación.

Generalmente han sido utilizados para eliminar o remover los colorantes sintéticos del agua; dentro de estos tratamientos se encuentran:

- a) Métodos fotoquímicos: reacciones de oxidación utilizando H_2O_2 y luz UV.

- b) Ozonización: Reacción de oxidación utilizando ozono gas.
- c) Adsorción con carbono activado: Remoción del colorante por adsorción.
- d) Coagulación: Adición de sulfato ferroso o cloruro férrico.
- e) Fotodegradación: Reacciones de oxidación.
- f) Coadyuvación: Tratamientos en donde se ajusta el pH de los efluentes para ser tratados posteriormente.
- g) Floculación: Agitación para romper los flóculos formados durante la coagulación.

El tratamiento fisicoquímico puede constituir una única etapa dentro del tratamiento del agua residual, incluso puede utilizarse como una técnica complementaria entre el pretratamiento y el tratamiento biológico.

2.5.3 TIPOS DE PROCESOS DE OXIDCIÓN AVANZADA (POA)

Los procesos conocidos como POA son tratamientos terciarios que generan especies fuertemente oxidantes, estos tratamientos tienen como objetivo la eliminación de compuestos solubles no biodegradables que están presentes en las aguas residuales.

Consisten en una oxidación química en condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 25 °C), en donde se mineraliza al colorante. El agente oxidante de estas reacciones es el radical hidroxilo (OH•) que posee tiempos de reacción muy cortos; estos radicales se forman a través de oxígeno, agua oxigenada, catalizadores, entre otros, haciendo que los subproductos sean únicamente agua y dióxido de carbono.

Para acelerar la producción del radical hidroxilo en estos procesos, se combinan con diversos agentes oxidantes como ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂), radiación UV, sales de hierro (Fe (II) y Fe (III)), además de catalizadores como dióxido de titanio (TiO₂).

Los POA se dividen en tres principalmente:

- PROCESOS NO FOTOQUÍMICOS:
 - Ozonización
 - Ozonización con H₂O₂/O₃
 - Procesos Fenton (Fe²⁺/H₂O₂)
 - Oxidación electroquímica
 - Radiólisis y tratamiento con haces de electrones

- Plasma no térmico
- Oxidación en agua sub y supercrítica (Monge, 2015)

- PROCESOS FOTOQUÍMICOS
 - Ultravioleta de vacío.
 - UV/H₂O₂
 - UV/O₃
 - UV/H₂O₂/O₃ (Monge, 2015)

- FOTOCALISIS SOLAR:
 - Fotocatálisis homogénea (Foto-Fenton).
 - Mecanismos de fotocatálisis con TiO₂ (Monge, 2015)

2.6 PROCESO DE OZONACIÓN

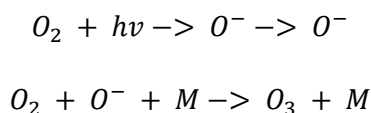
El proceso que implica la generación del radical hidroxilo en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio se denomina ozonación.

Las etapas de este proceso se dividen en:

- Preozonación se deposita ozono en el agua para desinfectarla, ayuda en la eliminación de hierro y magnesio, además ayuda en el proceso de coagulación.
- Ozonación intermedia: generalmente se aplica antes del proceso de filtración, oxida la materia orgánica natural y favorece la eliminación biológica en los filtros de arena.
- Post ozonación: se aplica en la fase final del tren de tratamiento.

En estos procesos, el ozono se genera dentro de un generador de ozono, en el cual, el gas de alimentación, (puede ser aire u oxígeno puro), pasa a través de dos electrodos, causando que un electrón fluya a lo largo del hueco de descargas; con la energía suficiente se disocian las moléculas de oxígeno produciéndose así el ozono.

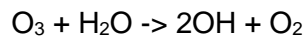
Ecuación 2.1. Formación de ozono



Este tratamiento se basa en encontrar el tiempo de contacto y la cantidad de ozono adecuados para lograr eliminar los contaminantes del agua de forma eficiente. Lo más importante de esta técnica de tratamiento es el poder oxidante del ozono (2.07 V).

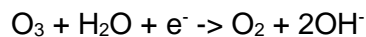
El proceso de ozonación involucra diversas reacciones químicas:

1. Reacción de ozonólisis:



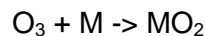
Esta reacción es la principal de este proceso ya que, es la responsable de la eliminación de la materia orgánica en el agua tratada. El ozono reacciona con el agua para formar los radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$), los cuales son altamente oxidantes, atacan y degradan compuestos orgánicos disueltos.

2. Reacción de reducción de ozono:



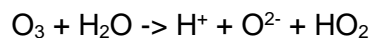
Esta es la reacción que se produce dentro del ozonador, el cual utiliza electrodos para generar electrones, los cuales reaccionan con el ozono para formar oxígeno molecular y los iones hidroxilo.

3. Reacción de ozonación directa:



Esta reacción se genera cuando el ozono reacciona directamente con una sustancia orgánica, (como los colorantes). El resultado es la formación de óxidos de la sustancia orgánica, lo que facilita su eliminación de la solución.

4. Reacción de hidrólisis:



Aquí, el ozono reacciona con el agua para formar iones hidronio (H^+) y peróxido de hidrógeno (HO_2), los cuales son altamente oxidantes y son capaces de atacar compuestos orgánicos. Como se observa, las cuatro ecuaciones anteriores son fundamentales en el proceso de ozonación, sin embargo, el proceso puede ser más complejo y dependerá de los contaminantes presentes en el agua y de las condiciones a las cuales se lleve a cabo el proceso de ozonación (IDEAM, 2023).

2.7 LOS COLORANTES

En química, un colorante es cualquier sustancia capaz de absorber determinadas longitudes de onda del espectro de luz visible, a su vez, desarrollan tonalidades a lo largo de las reacciones químicas y transfieren color al medio al cual se aplican. La constitución química de los colorantes principalmente es de grupos cromóforos y auxocromos (Marcano, 2018).

Los colorantes se agrupan en tres categorías principales para clasificarlos:

- De acuerdo con el material al que serán aplicados,
- Conforme los métodos de aplicación con los cuales se trabaje, y
- Su constitución química.

Los colorantes (**figura 2.2**) son organizados por el *Colour Index* (CI): un catálogo editado por la sociedad de Tintoreros y Coloristas de Inglaterra en conjunto con la asociación Americana de Químicos Textiles y Coloristas, además del *CAS Registry Number*, que es el número de registro en el Chemical Abstract. A la par de estos, existe el *BIOS* (*British Intelligence Objectives Subcommittee*) y *FIAT* (*Field Information Agency Technical*) los cuales presentan información sobre los colorantes y las técnicas de preparación.

Cuando se trabaja con colorantes destinados a medicamentos, cosméticos y alimentos su sistema de identificación es el *FDA* (*Food and Drugs Administration*), dentro de estos se agrupan colorantes que están destinados a: cerámicas, vidrios, alimentos, medicamentos, cosméticos, plásticos, pinturas, barnices, **textiles y otras fibras**, fotografía, sensibilizadores fotográficos, tintas tipográficas, abrillantadores, entre otros (Marcano, 2018).

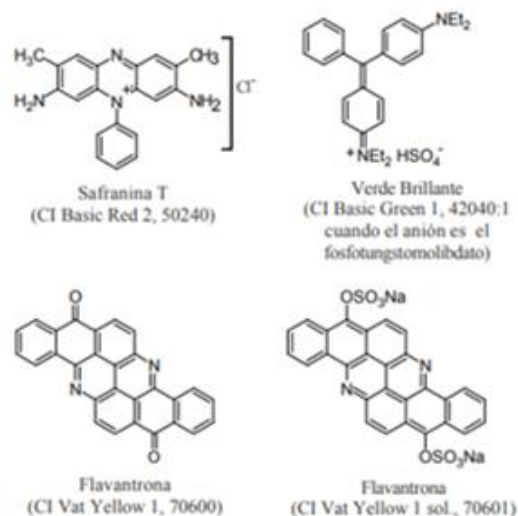


Figura. 2.2. Clasificación de los colorantes de acuerdo con las instituciones.

Químicamente un colorante orgánico tiene una estructura molecular que consiste en un sistema de dobles enlaces conjugados $A=C-(C=C)-B$ en donde A y B son átomos de nitrógeno, oxígeno, halógenos, azufre y metales. La conjugación en la estructura de la molécula de un colorante determina su coloración.

2.7.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES TEXTILES

De acuerdo con su clasificación tintórea los colorantes pueden ser:

- Colorantes directos: Contienen grupos polares como RNH_3^+ , RSO , además, se aplican de forma directa en la solución y se adhieren a las fibras por interacciones electrostáticas o por la formación de sales. Dentro de estos se encuentran los colorantes ácidos, que contienen grupos como SO_3 , H , CO_2H , NO_2 , OH fenólicos, estos ácidos pueden teñir fibras gracias a la formación de sales; también se encuentran en este grupo los colorantes básicos, que son catiónicos solubles como $MHMe_2^+$, NH_2Me^+ , NMe_2 , NH_2 , los cuales tienen afinidad por las fibras celulósicas. Los últimos colorantes que se encuentran dentro de esta clasificación son los sustantivos, que tienen grupos polares como las sales sódicas, potásicas o de amonio de un sustituyente ácido sulfónico en su estructura molecular, generalmente se denominan colorantes directos que se unen a las fibras por puentes de hidrógeno.

- Colorantes dispersos y transferidos: Son sustancias poco solubles en agua, pero, altamente solubles en solventes orgánicos.
- Colorantes reactivos: contienen en sus moléculas grupos reactivos que mediante enlaces covalentes forman ésteres o éteres.
- Colorantes VAT: Insolubles en agua, que por reducción forman sales solubles como los compuestos leuco, incolores o ligeramente coloreados.
- Colorantes de azufre: insolubles en agua que contiene azufre enlazado a la cadena del polímero (-S-S-).

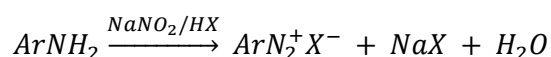
Colorantes de pigmentación: pigmentos: Sustancias cromogénicas inorgánicas como óxidos de cobalto, hierro, sales de cromo (Marcano, 2018).

2.7.2 COLORANTES TIPO AZO

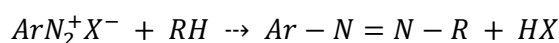
El término *azoico* hace referencia a la clasificación tintórea, para aquellos colorantes azo producidos sobre la fibra. Estos colorantes son los más importantes debido a su facilidad de síntesis y por su versatilidad; se caracterizan por la presencia de uno o más grupos azo: C-N=N-C en su molécula.

El proceso de formación de un grupo azo consta de dos pasos fundamentales:

1. Formación de la sal de diazonio:



2. Acoplamiento de la sal de diazonio con el sustrato acoplante:



Ar: núcleo aromático de la amina

R: sustrato acoplante.

Entre los grupos atradores de electrones (R: sustrato acoplante) se encuentran: COOR, CO, COOH, CN, NO₂, SO₃H y los grupos dadores de electrones se encuentran: NH₂, OH, CH₂, etc. El compuesto RH es generalmente un compuesto aromático como naftoles, naftilaminas, dimetilnilina, también se pueden acoplar sales de diazonio como índoles, pirroles, pirazolonas o quinolonas (Marcano, 2018).

2.7.3 CLASIFICACIÓN DE LOS COLORANTES AZO

De acuerdo con el número de grupos azo presentes en la molécula se tienen mono-, bis-, tri-azo compuestos y policondensados.

Para llevar a cabo la síntesis de un colorante azo se debe considerar el sistema aromático que cumplirá el papel de sustrato y cuál aporta el grupo diazonio. Como regla general, la porción aromática que contiene grupos atractores de electrones corresponde a la sal de diazonio y los dadores de electrones se ubican sobre el sustrato acoplante.

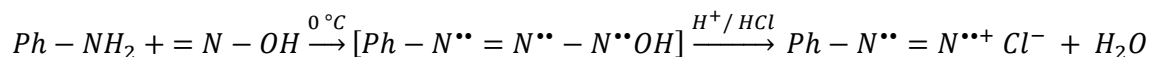
En los poliazocompuestos se considera la secuencia en la cual se generan los grupos azo que integran al colorante. Para un colorante bis-azo los dos acoplamientos son simultáneos, así, una molécula con dos grupos amino generan la sal de diazonio doble, los cuales se acoplan a un mismo sustrato en donde se obtendrá un compuesto simétrico. Estos colorantes se conocen como *bis-azo primarios* en los cuales se utilizan dos acoplantes diferentes; los colorantes *bis-azo secundarios* se preparan en etapas de acoplamiento consecutivas.

Los colorantes *bis-azo* se clasifican en cuatro grupos en donde se utilizan las letras: A (componente mono-diazo), D (componente bis-diazo), E (acoplante azoico con una sola posición atacada por el diazo), M (acoplante azoico que presenta un grupo amino susceptible a transformarse en sal de diazonio), Z (acoplante azoico con más de un sitio para ser atacado por el componente diazo). Las letras se unen entre sí con flechas que indican la dirección del ataque del componente diazo; la letra X indica el grupo extensor o aislante en la molécula que no corresponde al enlace -N=N-, como metileno, éter, amido, urea, fenilo, entre otros (Marcano, 2018).

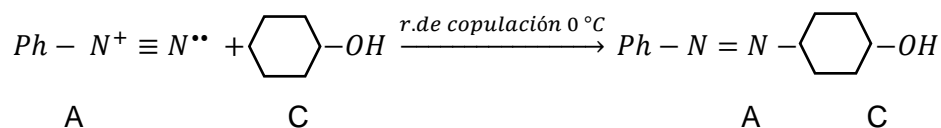
1. A -> Z <- A
2. E <- D -> E
3. A -> M -> E
4. A -> ZXZ <- A

2.7.4 MÉTODO DE OBTENCIÓN DE COLORANTES AZOICOS

En la preparación de los colorantes azoicos se utiliza siempre una amina aromática que, por reacción con ácido nitroso, el cual se prepara in situ desde NaNO_2 y HCl , da lugar a un compuesto dinitrogenado que se denomina sal de diazonio. La reacción recibe el nombre de diazotación, a continuación, se presenta el mecanismo de reacción:



Las sales de diazonio aromáticas son compuestos estables que dan reacciones de sustitución electrófila aromática.



A: amina de partida que experimenta diazotación y el compuesto aromático que se copula.

CA: copulante-amina, compuesto diazotable que experimenta una segunda copulación.

DA: compuesto con dos grupos diazotables.

Así, la preparación de un colorante azoico requiere de una amina y otro compuesto aromático que se copule con el primero.

El colorante rojo Congo se obtiene a partir de una tetradiazotación con bencidina y ácido naftilsulfónico, (Bencidina: $\text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{N}_2$ y Ácido naftilsulfónico: $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H}$) **figura 2.3**.

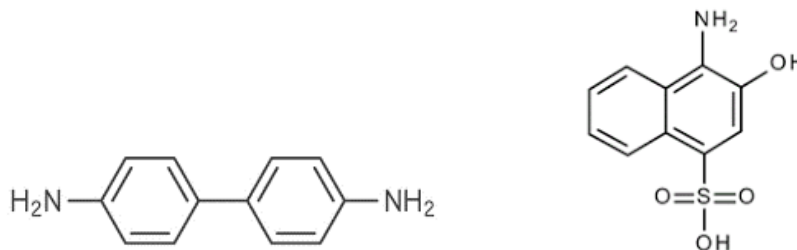


Figura 2.3. Estructura química de la bencidina y del ácido naftilsulfónico.

2.7.5 BENCIDINA (ROJO CONGO)

La Bencidina ($C_{12}H_{12}N_2$) es una sustancia química que se presenta en forma de sólido cristalino de color amarillo grisáceo, blanco o rojo grisáceo e inolora; en el medio ambiente se encuentra como base orgánica o como sal. Se usa para producir tinturas para telas, papel y cuero. Se debe tener precaución cuando se trabaja con esta sustancia, ya que, es altamente tóxica, los vapores y el polvo que emite pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones, además de provocar efectos adversos en los riñones, así como cáncer de vejiga.

A través de una tetradiazotación con bencidina y ácido naftilsulfónico se prepara el colorante rojo Congo (**figura 2.4**), el cual es una sal de ácido naftilensulfónico 3,3'-(4,4'-bifenileno)bis (azo) bis (4amino) disódico; este colorante es un diazo-aniónico, el cual puede afectar la transparencia y la solubilidad de oxígeno en los cuerpos de agua. Al ser producido con bencidina lo hace un compuesto altamente tóxico, puede provocar carcinogénesis (fenómenos que determinan la aparición y desarrollo de un cáncer), mutagénesis (Aparición de mutaciones), teratogénesis (sustancia, agente físico u organismo capaz de provocar un defecto congénito durante la gestación del feto), daños respiratorios, alergias y problemas durante el embarazo. Cuando se metaboliza regresa a la molécula de bencidina.

A su vez, este colorante se clasifica como recalcitrante, ya que, por ser constituido por una estructura muy estable químicamente no es biodegradable, resiste al ataque de los microorganismos o de cualquier mecanismo de degradación (biológico y/o químico), es por ello por lo que tiene la capacidad de acumularse en los organismos vivos causando enfermedades y trastornos nocivos para los seres vivos (agua, 2012).

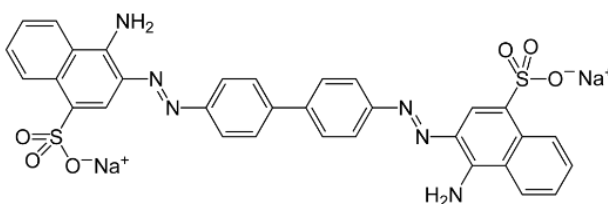


Figura 2.4. Estructura Química del colorante Rojo Congo.

2.8 PROCESOS DE BIOREMEDIACIÓN CON MICROALGAS

En los procesos de Biorremediación se utilizan diversos microorganismos que tienen la capacidad de incorporar contaminantes en sus procesos metabólicos para después utilizarlos como fuente de energía, todo esto sin afectar su actividad biológica.

Principalmente se utilizan organismos unicelulares como las microalgas, estas son capaces de eliminar sustancias tóxicas como: metales pesados, pesticidas, entre otros. Además, son capaces de absorber grandes cantidades de CO₂ para liberar O₂ por medio de la fotosíntesis, esto ayuda a degradar compuestos orgánicos generando biomasa que más adelante puede ser utilizada en sistemas de producción de biocombustibles o en procesos de agricultura. Generalmente los procesos de biorremediación pueden tratar casi todos los tipos de contaminación causadas por la actividad humana, representa una alternativa ecológica para disminuir el impacto negativo; por lo general se utilizan para tratar tres tipos de contaminantes: hidrocarburos, metales pesados y colorantes (Castillo, 2005).

- **Biorremediación de hidrocarburos**

Se utiliza para reducir o eliminar la contaminación producida por el derrame de petróleo, aceites, diésel y grasas de ecosistemas terrestres y acuáticos.

- **Biorremediación de metales pesados**

Se aplica a través de tres métodos: biosorción, precipitación de metales y biolixiviación, todo esto para eliminar los metales contaminantes que afectan la calidad del agua y los suelos.

- **Biorremediación de colorantes**

Diferentes industrias, (textil, alimenticia, papel, entre otras), utilizan técnicas de coloración que resultan contaminantes para el medio ambiente, es por ello, que esta técnica se basa en utilizar microorganismos que absorban y degraden a los colorantes presentes en el agua.

Las ventajas de utilizar procesos de biorremediación son bastantes, entre ellas destacan:

- No producen desechos que contaminen su entorno.
- Requiere de poca energía para su aplicación.
- Es una técnica económica.
- Puede funcionar como complemento de otras técnicas, o secuencialmente a ellas.
- No es invasiva ni dañina con el medio ambiente. (Carreño, et al. 2022)

2.8.1 MICROALGAS EMPLEADAS EN LOS PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN

Las especies de microalgas más utilizadas para los procesos de Biorremediación son:

Scenedesmus sp

Arthrospira maxima

Chlorella, (*Ch. vulgaris*)

Tetraselmis sp y

Pseudochlorella sp

Scenedesmus obliquus.

2.8.2 Microalga *Chlorella vulgaris*.

Chlorella vulgaris es un alga verde unicelular sin flagelo, regularmente posee una estructura esférica con un diámetro de 2 a 19 μm y por lo general se cultiva en agua dulce (**figura 2.5**). Fue descubierta y estudiada en 1931 por el bioquímico Alemán Otto Heinrich Wartburg. Tiene la capacidad de reproducirse con facilidad gracias a que únicamente necesita de Dióxido de carbono, agua, luz solar y pequeñas cantidades de minerales para realizar su proceso de fotosíntesis.



Figura 2.5. Microalga *Chlorella vulgaris*.

2.9. Legislación ambiental para colorantes azoicos.

Como se mencionó, los colorantes azoicos presentan una importante preocupación en el impacto ambiental debido a su dificultad para ser desintegrados. Es importante proteger al ambiente y la salud de la población a través de un control en el uso, manejo y destino de los colorantes azoicos.

2.9.1 Normatividad Mexicana

En nuestro país es escasa la normatividad que controla el destino de los colorantes azoicos o que regula la cantidad de colorante en los efluentes proveniente de las industrias; principalmente de la industria textil. El colorante rojo Congo fue utilizado en México en la época del Porfiriato, del año 1877 a 1880 y de 1884 a 1911 (México, Porfiriato e Inicio de la Revolución Mexicana), como colorante textil y actualmente, en algunos poblados aún es empleado para teñir prendas, además, es utilizado por diversos laboratorios como revelador de tejidos, por esta razón, existe una preocupación por eliminar este colorante de las aguas, pues es altamente cancerígeno y su presencia en el agua provoca efectos adversos en los ecosistemas (Cedillo, et al. 2006)

La secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) son las dependencias encargadas de realizar las regulaciones para preservar las aguas nacionales.

Las normas que regulan la contaminación del agua en México son:

1. 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. NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
3. NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público.

Estas normas que regulan la descarga de efluentes industriales no contemplan el color como un parámetro a considerar en la contaminación del agua, únicamente fija condiciones particulares como grasas o aceites.

En 1994, existió la gaceta ecológica de México, en la cual, se publicaban normas que establecían los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de diferentes industrias como:

- a) NOM-CCA-010-ECOL/1993 de la industrial del vidrio
- b) NOM-CCA-016-ECOL/1993 de la industria de bebidas gaseosas
- c) NOM-CCA-012-ECOL/1993 de la industria del hule
- d) NOM-CCA-018-ECOL/1993 de la industria de laminación, extrusión y estiraje de cobre

Entre otras industrias, esta gaceta contenía 23 normas ecológicas (social, 1993).

La NOM-CCA-014-ECOL/1993 determinaba los límites máximos permitidos para la industria textil, en la **tabla 2.2** se presentan los valores enunciados por la norma.

Tabla. 2.2. Parámetros establecidos de 1993 a 1997 para la industria textil.

	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
pH (unidades de pH)	6-9	6-9
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	100	120
Demanda química de oxígeno (mg/L)	200	240
Sólidos sedimentados (mg/L)	1.0	1.2
Grasas y aceites	20	30
Sólidos suspendidos totales (ml/L)	100	120
Cromo total (mg/L)	1.0	1.2
Sulfuros (mg/L)	0.2	0.4
Fenoles (mg/L)	0.1	0.2

Fuente: NOM-CCA-014-ECOL-1993. Diario Oficial de la Federación, 18 de octubre de 1993 (vigencia hasta el 7 de enero de 1997).

Sin embargo, en el año 2003 se modificó la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 en la cual se establece los límites máximos permisibles en aguas y bienes nacionales; es la que actualmente está vigente y se aplica en la industria textil. Los límites máximos permisibles para contaminantes básicos se fijan de acuerdo con los responsables de los efluentes.

2.9.1.1 Normatividad en otros países

Alrededor del mundo con el impacto del cambio climático y de la escasez del agua a causa de diversos factores como la contaminación, en diversos países de Europa, Asia y América Latina, se han modificado las medidas ambientales, con ello surgió la implementación de nuevas normas que ayuden a regular el impacto de los contaminantes provenientes de las industrias.

Un ejemplo es Santiago de Chile, este país ha implementado nuevas medidas para tener más control de los contaminantes procedentes de las industrias, como, la expresión de un

límite máximo permitido de metales contaminantes en el agua o, la reducción de miligramos de contaminantes al día en las descargas de las industrias (Públicas, 1998).

Por otro lado, países como Gran Bretaña, aplica la normativa ambiental EA (agencia ambiental) y de la Agencia de Protección ambiental de Escocia (SEPTA), en las cuales, desde 1997 la política ambiental en el Reino Unido hasta 2021 exigía que ningún compuesto químico sintético puede ser descargado al ambiente marino (Economista, 2021).

Finalmente, algunos países europeos y asiáticos han decidido restringir el uso de colorantes azoicos que liberen aminas aromáticas, ya que, estas están consideradas como cancerígenas; Alemania desde 1995 prohibió el uso de cualquier colorante que libere alguna de las 20 aminas aromáticas consideradas de alto riesgo (Europeo, 2008).

En la tabla 2.3 se muestran los parámetros y sus valores permitidos para las descargas de aguas residuales textiles de la industria en Alemania.

Tabla 2.3 Parámetros y valores permisibles en Alemania 1996.

Parámetro	Valor
DFZ a 436nm (amarillo), m-1	7
DFZ a 525nm (rojo), m-1	5
DFZ a 620nm (azul), m-1	3
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	25
Demanda química de oxígeno (mg/L)	160
Compuestos orgánicos halogenados (mg/L)	0.5
Compuestos aromáticos (Benceno, fenol, entre otros) /mg/L)	0.1
Cromo, Cobre, Níquel para cada uno	0.5
Fósforo (mg/L)	2
Nitrógeno amoniacal	10
Ninguna sustancia como: transportadora, alquifenol, detergentes, arsénicos y mercurio.	

Fuente: Federación Alemana, 1996. **DFZ: Valor de absorbancia.**

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS.

Para desarrollar correctamente los procesos (ozonación y biorremediación) se calibraron los equipos antes de utilizarlos.

a) ESPECTROFOTÓMETRO UV/VIS, MODELO GENESYS 10S VIS

En una celda de vidrio se agregaron 2 mililitros de agua destilada, la cual fungía el papel de blanco. Se metió al espectrofotómetro y se midió la concentración en tres ocasiones, (haciendo que este valor fuera 0, para tener un valor de referencia).

b) OZONADOR

Antes de conectar el ozonador al reactor de contacto de burbuja, la manguera se depositó en un vaso de precipitados con agua destilada, para tener mayor control de la presión y para observar si el ozonador estaba pasando el oxígeno correctamente en su interior.

La metodología del trabajo experimental consistió en las siguientes etapas:

I. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN Y LONGITUD DE ONDA PARA EL COLORANTE ROJO CONGO.

La determinación de la concentración del colorante (lecturas de absorbancia) se realizó por el método fotométrico, en el cual, se relacionó la cantidad de luz absorbida con la ayuda de un espectrofotómetro UV/VIS, modelo GENESYS 10S VIS con la concentración del analito, (colorante Rojo Congo); de acuerdo con la bibliografía consultada, la longitud de onda se fijó en una máxima absorción de 550nm.

Se estableció una curva de calibración a partir de una concentración stock de 500.0 mg/L de colorante, para ello, se pesaron 0.25 g de reactivo sólido Rojo Congo y se diluyeron en

500 mL de agua destilada para obtener una disolución de la cual se partió para realizar las diluciones con un rango de concentraciones que van de 10 a 50 mg/L (**tabla 3.1**).

Tabla 3.1. Diluciones preparadas para realizar la curva de calibración del colorante rojo Congo.

Matraz aforado de 25 mL	Concentración del colorante (mg/L)
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25
6	30
7	35
8	40
9	45
10	50

El colorante azoico Rojo Congo posee versatilidad de colores que se pueden generar dependiendo de su carácter ácido o básico; ya que, se vuelve rojo en presencia de base (álcalis) y azul cuando se expone a ácidos, **Figura 3.1**, las diferentes tonalidades pudieran tener condiciones diferentes, es así como las diez diluciones se prepararon de igual manera para una solución acuosa a pH neutro (7.0), a pH ácido (3.0) y finalmente a pH básico (11.0).

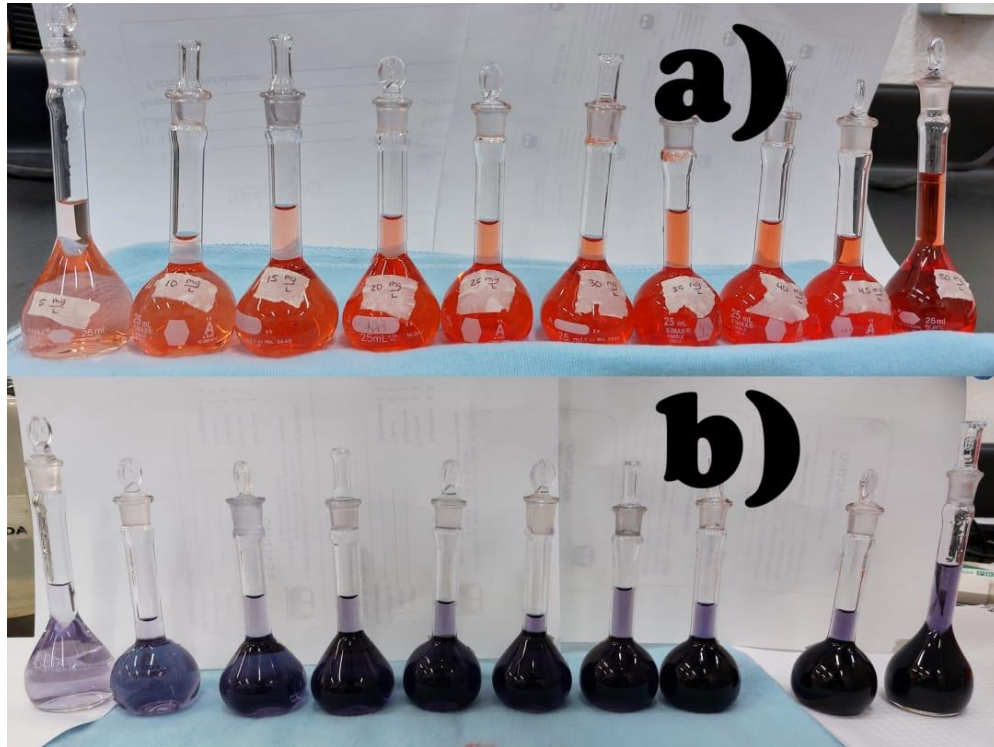


Figura 3.1. Alícuotas de Rojo Congo. a) colorante a pH básico (11), b) colorante a pH ácido (3).

La metodología anteriormente descrita se realizó por igual para los tres valores de pH trabajados.

II. TRATAMIENTO QUÍMICO

El tratamiento de oxidación química se realizó con el proceso de ozonación; este proceso se dividió en dos etapas, principalmente para comparar la eficiencia de reacción del ozono en dos vías: directa con ozono molecular e indirecta con el radical hidroxilo.

a) Ozonación directa: Ozono molecular

El sistema de ozonación se muestra en la **figura 3.2** en donde la producción de ozono se llevó a cabo por un generador de ozono, en el cual, interactúan las descargas eléctricas silenciosas, que consiste en pasar oxígeno en forma gaseosa a través de dos electrodos

separados por un dieléctrico y un hueco de descargas. Se aplica un voltaje a los electrodos, causando que un electrón fluya a través del hueco de descargas. Esos electrones suministran la energía para disociar las moléculas de oxígeno, produciéndose así la formación de ozono.



Figura 3.2. Generador de ozono.

Para realizar el primer ensayo, en un matraz aforado de 500.0 mL se preparó una solución acuosa de colorante Rojo Congo con una concentración inicial de 172.305 mg/L y un pH 3.0. En un lavador de gases se añadió 500.0 mL de KI (yoduro de potasio) al 2% y se instaló el sistema (**Figura 3.2**) para realizar el proceso de ozonación. La presión de salida del cilindro de oxígeno se fijó en 24.0 psi; al ponerse en marcha el generador de ozono, la oxidación del colorante se realizó durante 20 minutos. Cada minuto se tomaron 10.0 mL de colorante del reactor de contacto de burbuja con una pipeta graduada de 5.0 mL, hasta el término de los 20 minutos.

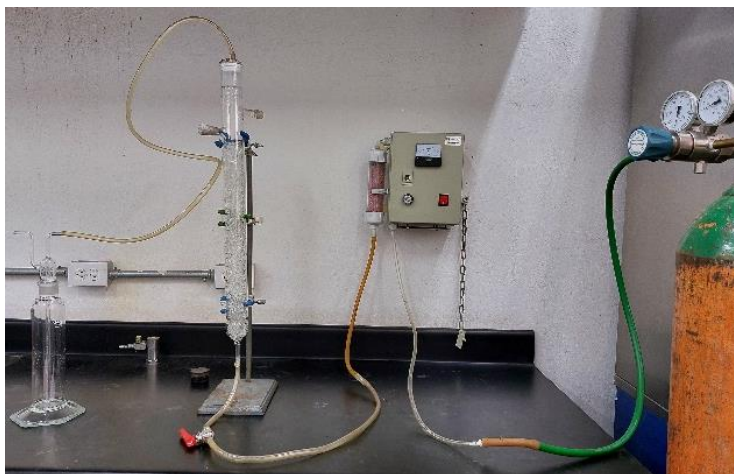


Figura 3.3. Conexión del equipo para realizar el proceso de ozonación.

Al finalizar el proceso de oxidación del colorante, del colector de gases se tomaron 3 muestras de 50 ml de la solución de KI y se vertieron en matraces de 250 ml, se les adicionó 5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1N y se titularon con Tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 N para calcular el ozono residual del sistema. Finalmente, se realizó la lectura de la absorbancia a las 20 muestras colectadas del reactor de contacto de burbuja en el que se realizó la oxidación del colorante, esto en un espectrofotómetro UV-VIS, GENESYS 10S, en una longitud de onda de 550nm.

Con los 20 valores de absorbancia obtenidos de las lecturas se determinó la concentración con la ecuación de la línea obtenida en el apartado anterior, posteriormente también se determinó el porcentaje de remoción.

Se realizaron 6 ensayos con oxidación directa, con diferentes concentraciones en diversos tiempos y pH, como se observa en la **tabla 3.2**:

Tabla 3.2. Variables planteadas para el proceso con ozono molecular.

Colorante sólido diluido (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	pH
250	10	3.37
200	30	3.16
150	20	3.37
125	30	3.05
100	20	3.34
100	30	3.37

b) Ozonación indirecta: radical hidroxilo.

Para realizar el segundo ensayo, en un matraz aforado de 500.0 ml se preparó una solución acuosa de colorante Rojo Congo con una concentración inicial de 149.661 mg/L y un pH 11. En un lavador de gases se añadió 500.0 ml de KI (yoduro de potasio) al 2% y se instaló el sistema (**figura 3.3**) para realizar el proceso de ozonación bajo las mismas condiciones que en el ensayo anterior.

En el proceso de oxidación con radical hidroxilo se determinó de igual forma el ozono residual, la concentración y el porcentaje de remoción.

Se realizaron 6 ensayos con oxidación indirecta, con diferentes concentraciones en diversos tiempos y pH, como se observa en la **tabla 3.3**:

Tabla 3.3. Variables planteadas para el proceso con radical hidroxilo.

Colorante sólido diluido (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	pH
250	10	11.02
200	30	10.80
150	20	10.40
125	30	10.95
100	20	9.14
100	30	11.02

- *Cantidad de ozono suministrado*

El proceso de ozonación se realizó en una columna empacada con anillos raschig, **figura 3.4**, la cual cumplió la función de un reactor de contacto de burbuja, se utilizó este tipo de reactor porque dentro se pueden efectuar reacciones gas-líquido. Además, en los procesos de ozonación se utilizan porque se obtiene una máxima área superficial para realizar los procesos, la confección de la columna permite recolectar rápidamente de su interior muestras para un correcto análisis.

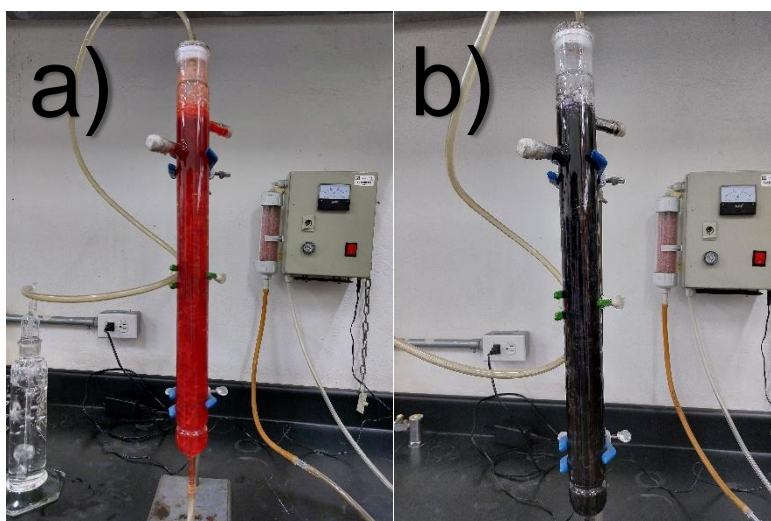


Figura 3.4. Reactor tubular vertical. a) ensayo a pH básico, b) ensayo a pH ácido.

Para calcular la cantidad de ozono que fue suministrado a la columna se utilizaron tres ajustes:

a) Primer ajuste:

El tanque de oxígeno presente en el laboratorio se encontraba en un mínimo de contenido; las condiciones para el primer ensayo se ajustaron en 24.0 PSI de presión, el manómetro del tanque marcaba los 700.0 PSI y el generador de ozono se ajustó para realizar el proceso en 5.0 voltios, este último parámetro es automático en el ozonizador.

b) Segundo ajuste:

El tanque se encontraba lleno, por ello, las condiciones de operación cambiaron; para los siguientes tres ensayos la presión en el tanque marcada por el manómetro fue de 2500.0 PSI, por lo tanto, la presión se ajustó a 14.0 PSI y el generador de ozono se encontraba trabajando 4.5 voltios.

c) Tercer ajuste:

Finalmente, para los dos ensayos finales, el proceso se suspendió una semana debido a trabajos en el laboratorio; al retomar las experimentaciones, el manómetro del tanque de oxígeno se encontró en 2000.0 PSI, la presión se ajustó a 7.5 PSI y el generador de ozono se encontraba en 5.0 voltios.

La concentración del ozono en la solución afecta directamente a la eficiencia del proceso; una alta concentración de ozono en la solución aumenta la tasa de reacción entre el ozono y los contaminantes, lo que mejora la eficiencia de la eliminación del colorante Rojo Congo.

III. TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Se trabajó con un sistema de biorremediación (**figura 3.5**), donde se realizaron ensayos con la microalga *Chlorella vulgaris*.

Para realizar el primer ensayo se preparó la solución. En un matraz aforado de 2000.0 mL se agregaron los residuos del proceso realizado con ozono molecular (**figura 3.6**) con un pH de 6.17 y una concentración de 33.914 mg/L.

Se realizó el tratamiento biológico (biorremediación) con el alga verde por el siguiente procedimiento:

1. En un biorreactor de 1000 mL se agregaron 400 mL de residuos de colorante con una concentración de 33.914 mg/L y un pH 6.17; se rotuló como "testigo".

2. En un segundo biorreactor de 1000 mL se agregaron 0.5 g de biomasa de *Chlorella vulgaris*, con un pH 9.27; se rotuló como “control de cultivo”.
3. En un tercer biorreactor de 1000.0 mL se agregaron 1.50 g de biomasa de *Chlorella vulgaris*, 400.0 mL de residuos de colorante y un pH 6.17; se rotuló como ensayo 1.
4. En un cuarto biorreactor de 1000.0 mL se agregó 1.00 g de biomasa de *Chlorella vulgaris* y 400.0 mL de residuos de colorante y un pH 6.17; se rotuló como ensayo 2.
5. En un quinto biorreactor de 1000.0 mL se agregó 0.50 g de biomasa de *Chlorella vulgaris* y 400.0 ml de residuos de colorante y un pH 6.17; se rotuló como ensayo 3.

Los 5 biorreactores se conectaron a una bomba de aire MAXIMA-R HA806 para producir aireación y se les colocó una luz blanca led ADIR LIGHTING para ayudar en su proceso de fotosíntesis, este proceso se realizó durante 4 días, la luz y el aire fueron suministrados las 24 horas del día (**Figura 3.6**).



Figura 3.5 Orden de los biorreactores para el proceso de Biorremediación.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
Unidad de Servicios para la Industria Petrolera
CARACTERÍSTICAS:

RESIDUO

(X) Líquido Rojo Congo
() Sólido _____

Laboratorio: Protección Ambiental
Responsable: (Barbara H.) Dra. Luz Lezcano
Fecha de recolección: 02/09/2022

pH: 6.17
100 mg/L

Corrosivo ()
Reactivo ()
Explosivo ()
Tóxico (X)
Inflamable ()

Figura 3.6. Etiqueta de datos utilizados para el primer ensayo de Biorremediación.

Durante el tiempo que se realizó el bioensayo, cada 24 horas se realizó un monitoreo sobre la remoción del colorante, para lo cual se tomaron 30.0 ml de solución del tercer biorreactor, se dividió y agregó en 3 tubos de ensaye de 10.0 ml, estos tubos se metieron en una centrífuga SOLBAT C-40 durante 10 minutos a 3500 rpm (**figura 3.7**); este procedimiento se repitió para el cuarto y quinto biorreactor; la solución del biorreactor denominado “testigo” no se introduce en la centrífuga ya que no hay interferencia alguna en la lectura de la absorbancia; los tubos del biorreactor “control de cultivo” no se introducen en la centrífuga esto se debe a que la microalga se asienta en el fondo y la lectura se puede hacer sin tener alteración. Finalmente, a cada tubo se le realizó la lectura de absorbancia en un espectrofotómetro UV-VIS, GENESYS 10S, para así determinar la concentración y al mismo tiempo el porcentaje de remoción.




Figura 3.7. Colorante rojo Congo al término de la centrifugación, en el fondo se encuentra sedimentada la microalga.

Debido a las condiciones de pH (9.0 a 11.30) con las cuales se trabaja la microalga *Chlorella vulgaris*, se decidió realizar el proceso de biorremediación con los residuos del proceso de ozonación con ozono molecular, en donde únicamente se modificó la concentración inicial del colorante, esto se aprecia en la **tabla 3.4**:

Tabla 3.4. Concentraciones modificadas durante los bioensayos con pH ácido.

Frasco de residuos (mg/L)	Concentración a la que se ajustó el reactor (mg/L)	pH
100	77.860	5.57
125	45.293	5.41
100	33.914	6.17

Para realizar el segundo ensayo se prepararon 2000.0 mL de colorante rojo Congo. En un matraz aforado de 2000.0 mL se agregaron los residuos del proceso de ozonación trabajado con radicales hidroxilo (**figura 3.8**) con un pH de 10.40.


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
 Unidad de Servicios para la Industria Petrolera
CARACTERÍSTICAS:

RESIDUO

Líquido Rojo Congo
 Sólido _____

Laboratorio: Protección Ambiental
 Responsable: (Bianca H.) Dra. Luz Lozano
 Fecha de recolección: 21 / 09 / 2022

Corrosivo ()
 Reactivo ()
 Explosivo ()
 Tóxico (X)
 Inflamable ()

pH: 10.40
150 mg/L

Figura 3.8. Etiqueta de datos utilizados para el segundo ensayo de Biorremediación.

El tratamiento por el método de Biorremediación con la microalga *Chlorella vulgaris* se realizó en las mismas condiciones que para el bioensayo a pH 3. Es decir, concentración de biomasa, volumen y tiempo de contacto; así como controles del sistema.

Los 5 biorreactores se conectaron a una bomba de aire MAXIMA-R HA806 para producir aireación y se les colocó una luz blanca led ADIR LIGHTING para ayudar en su proceso de fotosíntesis (**Figura 3.9**).



Figura 3.9. Orden de los biorreactores para el proceso de Biorremediación.

El proceso de biorremediación con radicales hidroxilo se realizó bajo las mismas condiciones que en el ensayo anterior. Este experimento solo se llevó a cabo una vez,

debido a que, en la teoría, las condiciones óptimas para trabajar con microalga *Chlorella vulgaris* es en un rango de pH entre 9.0 y 11.30; por ello, el resto de las experimentaciones se realizaron con pH ácido para identificar que sucedía con la microalga y el colorante.

Debido a que el quitosano fue utilizado durante la experimentación para coagular/flocular a la microalga *Chlorella vulgaris*, permitiendo separar los compuestos suspendidos y disueltos del agua, facilitando así pesar en seco al alga para poder agregarla a los biorreactores, es que se analizó la influencia de este biopolímero durante la remoción del colorante.

Para ello, en un biorreactor de 1000 mL se agregaron 400 mL de colorante rojo Congo con una concentración de 45.910 mg/L y un pH 9.49, además se agregaron 6 mL de Quitosano al 10% de Ácido acético.

El biorreactor se conectó al sistema (**figura 3.10**), durante 4 días se realizó la experimentación, en la cual se midió el pH y la concentración del colorante dentro del biorreactor con Quitosano.



Figura 3.10. Sistema de biorreactores para el proceso de Biorremediación incluyendo el biorreactor de Quitosano.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN Y LONGITUD DE ONDA PARA EL COLORANTE ROJO CONGO.

Se realizó un barrido para determinar la longitud de onda con la cual se trabajó, en la **tabla 4.1**, se muestran los valores obtenidos para calcular la curva de calibración y la longitud de onda con la cual se tuvo un mejor coeficiente de determinación (0.999) **figura 4.1**.

Tabla 4.1. Datos para la curva patrón de colorante Rojo Congo.

Concentración de alícuota mg/L	Colorante Rojo Congo (mL)	Primera medición (A)	Segunda medición (A)	Tercera medición (A)	Promedio (A)
0	0.700	0.200	0.207	0.207	0.204
15	0.750	0.279	0.281	0.281	0.280
30	1.500	0.574	0.575	0.575	0.575
45	2.25	0.83	0.84	0.83	0.83
60	3.00	1.90	1.09	1.09	1.09
75	3.75	1.38	1.38	1.38	1.38
90	4.50	1.624	1.63	1.63	1.63
105	5.25	1.92	1.92	1.92	1.92
120	6.00	2.14	2.16	2.16	2.15
135	6.75	2.38	2.39	2.38	2.38
150	7.50	2.61	2.61	2.61	2.61

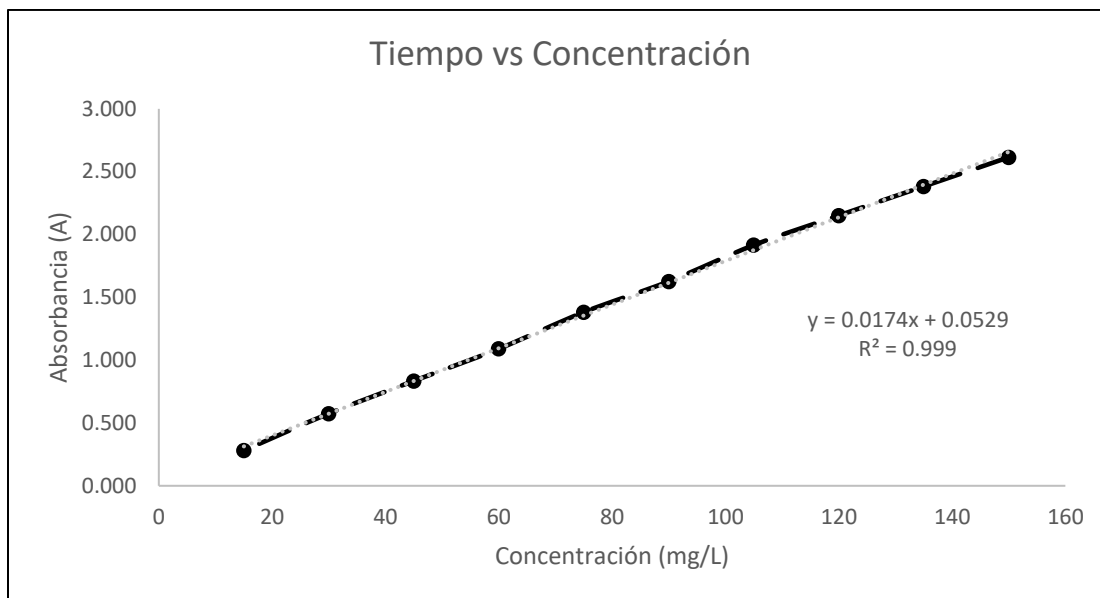


Figura 4.1. Curva patrón del colorante Rojo Congo

4.1.1 Influencia de la concentración y el pH en el cálculo de longitud de onda.

Al observar el comportamiento de la **figura 4.1**, notamos que la concentración es directamente proporcional a la absorbancia.

La concentración de la muestra afecta la cantidad de luz absorbida; cuando tenemos una concentración alta, la absorbancia se satura en diversos valores de longitud de onda, con lo cual es más difícil tener una cuantificación del valor. Por otro lado, las concentraciones más bajas no son detectadas por el espectrofotómetro Uv-Vis, provocando datos erróneos y al mismo tiempo inexactitud en el valor de la longitud de onda.

La medición de pH de una solución afecta directamente al valor de absorbancia al hacer la lectura en el espectrofotómetro Uv-Vis; generalmente, a mayor pH se producen cambios en la forma o posición de la banda de absorción del colorante, por lo cual, se percibe una tonalidad diferente en cada valor de lectura (**tabla 4.2**) y, por lo tanto, una variación en el valor de la concentración.

4.1.2 Elección de longitud de onda correcto

Experimentalmente, se puede observar que el colorante rojo Congo a diferentes valores de pH adquiere tonalidades diversas; con un pH ácido la tonalidad es azul-morado, cuando se

trabaja a pH neutro la tonalidad es naranja y con un pH básico es rojo; por esta razón es importante determinar la longitud de onda para cada tipo de ensayo. Cuando se utilizan tonalidades rojas en colorantes, la longitud de onda abarca los 645-700 nm; al trabajar con tonalidades naranjas nos encontramos entre 587-597 nm; finalmente, al utilizar tonos azules, la longitud de onda abarca los 446-500 nm (César, 2012).

Se desarrollaron los barridos de longitud de onda para acotar el rango establecido que es de 446 a 700 nm.

Tristán (2012) en su trabajo señala que para trabajar el colorante Rojo Congo a un pH 2, la longitud de onda que se debe utilizar es de $\lambda=570$ y para un pH 4 la longitud de onda debe ser de $\lambda=562$.

En la **tabla 4.3** se observan las longitudes de onda con las que se trabajaron y cuáles fueron las aceptables de acuerdo con su coeficiente de determinación.

Tabla 4.3. Valores de longitud de onda para el colorante Rojo Congo.

pH	λ
2	570
3	566
4	562
6	554
7	550
8	546
9	542
10	538

Se realizaron ensayos con valor de pH 3.07, 7.0 y 9.01 (**tabla 4.4**), cada uno con la longitud de onda correspondiente a las condiciones que requería; sin embargo, los resultados arrojan que para los tres valores de pH la longitud de onda correcta fue de 550 nm.

Debido a que se obtuvo un coeficiente de determinación para cada experimento de $R^2=0.999$, (**figura 4.3**), lo cual indica que la variación de respuesta de la variable dependiente (absorbancia) es proporcional a la variable independiente (concentración) en el modelo de regresión lineal.

Tabla 4.4. Valores de absorbancia utilizados para realizar la curva de calibración del colorante rojo Congo.

VALORES DE ABSORBANCIA			
Concentración de alícuota [mg/L]	Ácido	Neutro	Básico
50	1.057	0.874	0.888
45	0.957	0.793	0.819
40	0.853	0.704	0.724
35	0.773	0.621	0.634
30	0.640	0.534	0.546
25	0.551	0.451	0.461
20	0.429	0.364	0.385
15	0.328	0.273	0.270
10	0.222	0.187	0.188
5	0.109	0.093	0.094

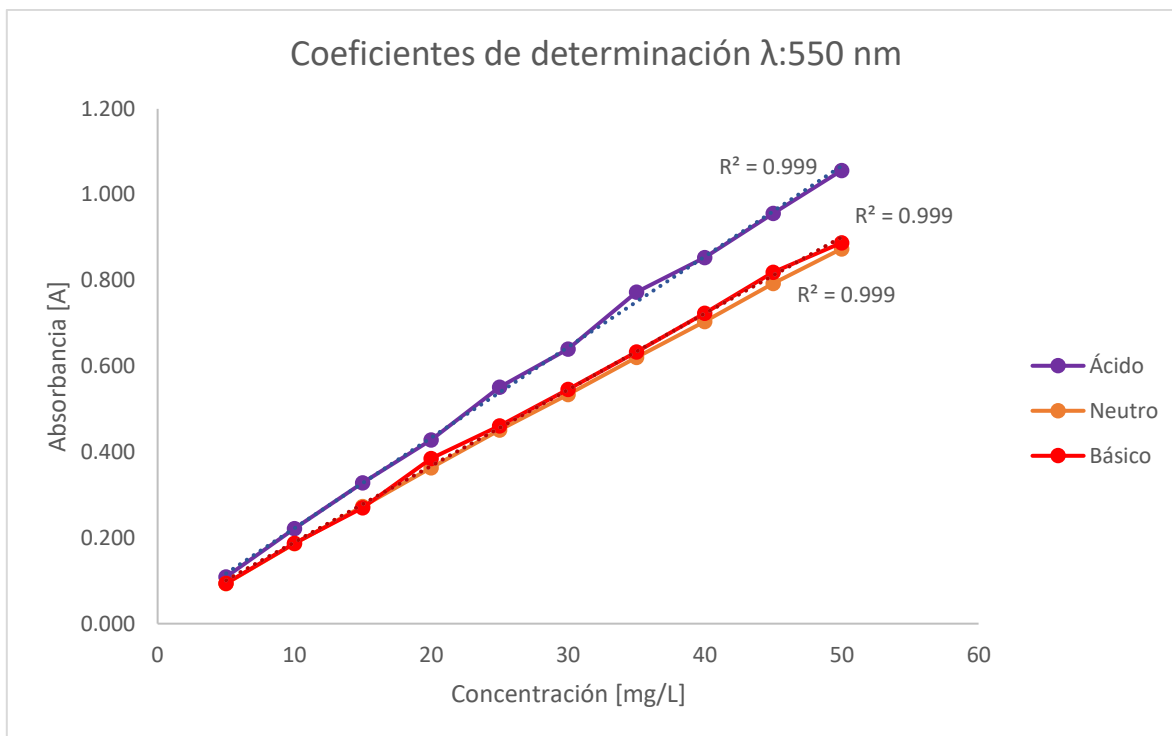


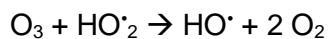
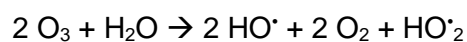
Figura 4.3. Coeficientes de determinación del colorante Rojo Congo para pH ácido, neutro y básico.

4.2. TRATAMIENTO QUÍMICO

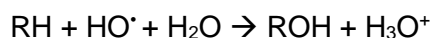
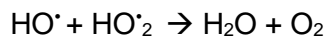
La configuración electrónica del ozono ayuda a que al disociarse en agua pueda tener diferentes tipos de reacciones, las cuales lo llevan a la formación de radicales libres.

Cuando se habla de procesos que se realizan con ozono, se puede pensar en la formación de reacciones directas e indirectas; en una **reacción directa** la molécula de ozono reacciona con especies químicas presentes en la muestra, mientras que una **reacción indirecta** es la que se realiza con el radical hidroxilo, los cuales se forman por la descomposición del ozono en las reacciones directas. Es así como las reacciones directas del ozono son el paso inicial hacia las reacciones indirectas.

- Reacciones directas:



- Reacciones indirectas:



El colorante rojo Congo actúa como un ligando para formar complejos con moléculas cargadas negativamente; su estructura molecular es planar (tipo de geometría molecular con un átomo en el centro y tres átomos en las esquinas de un triángulo, llamados átomos periféricos, todos ellos en el mismo plano) y un grupo funcional carboxilo lo cual le permite unirse a otros compuestos mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van Der Waals (Marcano, 2018).

Para determinar si la eliminación del colorante era suficiente al introducirla al reactor, se modificaron diversas variables al momento de experimentar; permitiendo identificar el cambio en la tonalidad del colorante debido a la concentración y el pH; así como los parámetros de ajuste para realizar el proceso de ozonación en condiciones óptimas.

A continuación, se describen las variables que se modificaron en este experimento:

- Concentración de ozono:** cantidad de ozono disuelto en el agua durante el proceso.
- pH:** nivel de acidez o alcalinidad del agua tratada, la cual se ajusta para optimizar la efectividad del proceso de ozonación.
- Temperatura:** puede ser determinante en la velocidad de reacción a la que se lleva a cabo la reacción.
- Tiempo de contacto:** es modificado para tener mayor eficiencia en el proceso, determina el tiempo en que el agua tratada está en contacto con el ozono dentro del reactor de contacto de burbuja.
- Concentración:** indica si se forman subproductos tóxicos cuando la concentración del compuesto orgánico es desconocida.

Para entender el comportamiento del colorante, en la **figura 4.2** se observa la degradación del colorante, como se mencionó en el párrafo anterior, la concentración del colorante es proporcional al pH y por tanto a la tonalidad de este; al tomar el ensayo de ozonación con radicales hidroxilo, pH 7.00 y un tiempo de contacto de 10 minutos,

se puede observar la escala de tonalidades que el colorante adquiere durante la oxidación de este.

Tabla 4.2. Degradación del colorante en el proceso de ozonación con radicales hidroxilo a lo largo de 10 minutos de reacción, con valores diferentes de pH y concentración.

Número de ensayo	Concentración (mg/L)	pH
0	215.063	11.02
1	206.385	11.02
2	199.201	11.02
3	189.316	11.01
4	179.374	11.01
5	167.879	11.00
6	155.580	11.00
7	146.960	10.96
8	137.477	10.96
9	127.305	10.70
10	90.868	10.54

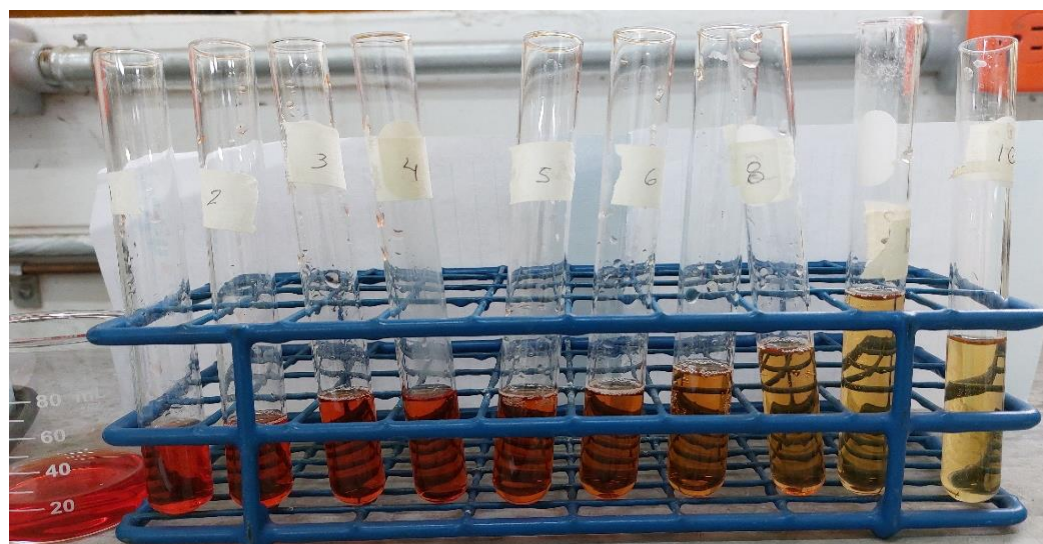


Figura 4.2. Degradación del colorante durante 10 minutos de reacción.

4.2.1. Producción de Ozono molecular y Radicales Hidroxilo

El proceso de ozonación con ozono molecular no es un proceso que se encuentre a pH ácido o básico, esto porque no libera protones (H^+) ni hidroxilos (OH^-) (Peña, 2018), debido a que en el proceso de ozonación una de las variables con mayor importancia es el pH, es importante ajustar dicho valor; además, la concentración de ozono debe ser controlada ya que una sobredosis puede causar la formación de subproductos tóxicos y reducir la eficiencia del tratamiento (Cortinas de Nava, 2003).

El ozono es capaz de oxidar los grupos funcionales presentes en el colorante Rojo Congo, como los grupos aminos y azoicos, lo cual lleva a la formación de productos de oxidación, estos productos finales son menos tóxicos y más fáciles de degradar que el colorante original, lo cual los hace menos problemáticos para el medio ambiente.

La reacción que se genera dentro del reactor de contacto de burbuja se expresa como:



En la reacción anterior, los productos derivados de la oxidación que se forman a través del proceso de ozonación del colorante rojo Congo pueden ser:

- **Ácido acético CH_3COOH**
- **Ácido cítrico $C_6H_8O_7$**
- **Ácido oxálico $C_2H_2O_4$**
- **Ácido tartárico $C_4H_6O_6$**

El proceso de ozonación se dividió en dos partes, ensayo con ozono molecular y ensayo con radical hidroxilo.

El ensayo de ozonación con ozono molecular se realizó con pH ácido, para ello, la producción de ozono se realizó *in situ*.

Por otro lado, el ensayo de ozonación con radicales hidroxilo se realizó con pH básico, para ello, la producción de los radicales se realizó a través de un proceso conocido como “proceso de oxígeno activado”, en este se inyectó ozono en el agua, así, los radicales hidroxilo atacaron y degradaron al colorante y a los contaminantes orgánicos presentes en el agua produciendo subproductos menos tóxicos.

Para evitar la formación de los productos de oxidación antes mencionados, es necesario encontrar las condiciones óptimas de operación para este colorante.

Por este motivo, se hizo la cuantificación de la producción, el flujo y los residuos de ozono presentes en la columna y por tanto a lo largo de la experimentación.

- Cuantificación de la cantidad de ozono suministrado a la columna

Las variables calculadas están definidas por:

1. Producción de ozono:

Fórmula 1.

$$O_3(g) = V_1 * N * E * PMO_3$$

En donde:

V_1 : Mililitros de tiosulfato de sodio gastado en la titulación.

N : Normalidad del tiosulfato de sodio

E : estequiometría de la reacción.

PMO_3 : Peso molecular de la molécula de ozono.

2. Residuo de ozono (**figura 4.4**):

Fórmula 2.

$$RO_3 = \frac{O_3(g)}{t (min)}$$

En donde:

O_3 : Ozono producido.

t : tiempo de contacto establecido para el proceso de ozonación.

3. Flujo de ozono a lo largo del reactor de contacto de burbuja.

Fórmula 3.

$$F_o(mg/min) = \frac{Q_o (mg/h)}{t (min)}$$

En donde:

Q_0 : Concentración de ozono que entra al reactor por hora.

t: Tiempo de residencia.

NOTA: el cálculo de la concentración de ozono es importante para desarrollar la estequiometría de las reacciones que se realizan en el sistema y así calcular la producción de ozono y el ozono residual durante la oxidación del colorante **tabla 4.5**.

Tabla 4.5. Valores calculados para la producción de ozono y ozono residual durante la oxidación del colorante en los 12 ensayos.

Número de ensayo	Tiempo de contacto [min]	Tipo de ensayo	O ₃ producido (mg)	O ₃ Residual (mg)	Concentración O ₃ (mg/L)
1	10	ozono molecular	2720.00	272.00	113.33
	10	radicales hidroxilo	400.00	40.00	16.66
2	30	ozono molecular	1760.00	58.66	73.33
	30	radicales hidroxilo	1200.00	40.00	50.00
3	20	ozono molecular	3120.00	156.00	130.00
	20	radicales hidroxilo	880.00	44.00	36.66
4	30	ozono molecular	1120.00	37.33	46.66
	30	radicales hidroxilo	800.00	26.66	33.33
5	20	ozono molecular	1360.00	68.00	56.66
	20	radicales hidroxilo	640.00	32.00	26.66
6	30	ozono molecular	2400.00	80.00	100.00
	30	radicales hidroxilo	720.00	24.00	30.00



Figura 4.4. Trampa de gas (yoduro) para ozono residual.

Como se registra en la tabla 4.5, la cantidad de ozono suministrado al reactor de contacto de burbuja es proporcional a la cantidad de colorante disuelto en el agua y del pH que la solución contenga.

De acuerdo con los resultados se puede mencionar que, cuando se trabaja con ozono molecular (pH ácido) la producción de ozono es mucho menor que al trabajar con radical hidroxilo (pH básico); esto es así, principalmente porque en un ambiente básico se generan más radicales hidroxilo los cuales reaccionan y provocan una demanda mayor de ozono; además, el oxígeno es más soluble en agua con pH ácido que en agua con un pH básico, de esta manera, existe más oxígeno disponible para reaccionar con los radicales libres y formar ozono. Finalmente, que el ozono sea mayor en el proceso con ozono molecular puede deberse a una mayor capacidad de oxidación, el pH ácido aumenta la capacidad de oxidación del ozono (Patiño, 2011). Al mismo tiempo, el flujo de ozono calculado es muy próximo al valor que reportan los manuales de ozonadores, estos informan que se generan 2 g/h de ozono, en la **tabla 4.6** se reportan los valores del flujo de ozono que se calcularon bajo estas concentraciones de colorante.

Tabla 4.6. Valores reportados del flujo de ozono que pasa por el ozonador.

Número de ensayo	Tiempo de contacto [min]	Tipo de ensayo	Flujo de O ₃ (g/h)
1	10	ozono molecular	2.04
	10	radicales hidroxilo	0.30
2	30	ozono molecular	0.10
	30	radicales hidroxilo	0.14
3	20	ozono molecular	0.58
	20	radicales hidroxilo	0.16
4	30	ozono molecular	0.09
	30	radicales hidroxilo	0.06
5	20	ozono molecular	0.12
	20	radicales hidroxilo	0.22
6	30	ozono molecular	0.20
	30	radicales hidroxilo	0.06

El pH es un factor importante que afecta este proceso, ya que, teóricamente los sistemas de ozonación son más eficientes en medios ácidos, debido a que una mayor acidez favorece la formación de radicales hidroxilo que son altamente reactivos. Se ha demostrado que el rango óptimo de pH para la ozonación se encuentra entre 4.5 y 8. Sin embargo, un pH muy bajo puede inhibir la reacción de ozonación, mientras que un pH alto puede provocar la formación de compuestos orgánicos clorados y una reducción en la eficiencia del tratamiento (Peña, 2011).

Para comparar los trabajos realizados con colorante rojo Congo con los datos obtenidos en esta experimentación es que se mide el grado de acidez y alcalinidad de la solución de colorante trabajada, para esto, fue necesario ajustar y medir el valor del pH antes, durante y al final de realizar los procesos de ozonación.

Tristán (2012) señala que el pH con el cual se debe trabajar el colorante rojo Congo es en un rango de 5.0 a 8.0, cuando la temperatura es ambiente.

Químicamente, la descomposición del ozono en el agua se encuentra en un pH de 6.2 a 7.2 y el pH del colorante rojo Congo está en un intervalo de 3.0 a 5.2 cuando la industria textil utiliza tonos rojizos. Los procesos de oxidación avanzada son utilizados por el grado de oxidación de las especies que se utilizan para tratar al agua; por esta razón, en la técnica de ozonación el pH al que se ajusta el proceso oscila entre 6.0 y 8.0.

Al comparar los valores de pH y las condiciones reportados por Tristán Alejandra (pH 5.0 a 8.0) con las condiciones con las cuales se trabajó en estos experimentos, se interpreta que:

- En el proceso de ozonación con **radicales libres** el pH más adecuado para trabajar es entre 9.0 y 12.0
- Para el proceso de ozonación con **ozono molecular** el pH más adecuado para trabajar es entre 3.0 y 5.0

En donde resulta que el porcentaje de remoción es más alto; en la **tabla 4.7** se presentan los valores de pH y el porcentaje de remoción que se obtuvo, resaltando los resultados más favorables.

Tabla 4.7. Valores de pH y porcentaje de remoción obtenidos en los experimentos.

Número de ensayo	pH medido	Concentración final (mg/L)	% de remoción obtenido
Primero	3.37	80.351	53.367
	10.40	18.799	87.439
Segundo	3.34	68.052	36.952
	9.14	13.914	86.023
Tercero	3.37	183.052	21.026
	11.02	90.868	57.748
Cuarto	3.37	33.511	65.962
	11.02	5.006	94.892
Quinto	3.05	44.144	61.170
	10.95	9.603	89.768
Sexto	3.16	120.351	41.409
	10.80	76.155	57.652

Se identificó que al tener soluciones con diferentes valores de pH, la coloración (**figura 4.4**) y el comportamiento del ozono se ve modificado; al trabajar con ozono molecular, este se caracterizó por ser altamente selectivo, esto depende en gran medida porque el ozono es poco soluble en agua y por su poder oxidativo no es capaz de adherirse a las sustancias por completo; en cuanto a los radicales hidroxilo, son la mejor opción para trabajar, se caracterizan por ser especies químicas capaces de tener una existencia independiente que contienen uno o más electrones sin aparear, (electrones solos en sus orbitales), haciendo que la necesidad de aparearse sea la base para tener una gran reactividad, se reconoce así que estos radicales libres no discriminan a las moléculas con las que reaccionan, en tal caso, la bencidina puede tomar los electrones que estén disponibles en los radicales hidroxilo y así hacer más eficiente el proceso de ozonación (Calderón et al, 2000).



Figura 4.5. Tonalidades del colorante. a) colorante a pH básico, b) colorante a pH neutro, y c) colorante a pH ácido.

4.2.2.1. Temperatura

El ozono es una sustancia que bajo diversas condiciones actúa como líquido o como gas. Cuando es sometido a bajas temperaturas, (se enfrían a $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos), se transforma en un líquido criogénico, lo cual puede ser peligroso si no se manipula con precaución; el oxígeno criogénico puede reaccionar de forma explosiva con los materiales orgánicos. Cuando se aumenta la temperatura del ozono a más de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ disminuye su solubilidad en el agua y es mucho menos estable, una temperatura alta provoca que la vida media del ozono sea muy corta, haciendo que se descomponga en segundos en el ambiente donde se encuentra. Por lo anterior, el proceso de ozonación se realizó en condiciones ambientales (25°C y 1 atmósfera) de forma segura (Chicón, 2004).

4.2.3 Primer experimento

- Tiempo de contacto

En las plantas de tratamiento de agua residual hay un factor importante, el cual está relacionado con la eficiencia de remoción de cualquier tipo de sustancia, este es denominado “**tiempo de contacto**”. Este tiempo es la duración que requiere el fluido para mantenerse a lo largo del reactor durante el bombeo del ozono; es así, que el tiempo de contacto es parte fundamental del proceso de ozonación.

Técnicamente, el tiempo de contacto en que un ozonador debe trabajar depende del tipo de generador de ozono, un ozonador industrial se mantiene encendido de 5 a 20 minutos,

mientras que, un ozonador sencillo se mantiene encendido de 20 a 40 minutos (Kleen, 2019)

Al inicio del primer experimento se observó el comportamiento del colorante cuando está dentro del reactor por un tiempo pequeño de reacción, (para ozonación, el parámetro de tiempo de 10 minutos se considera tiempo pequeño).

Como se puede observar en la **tabla 4.8**, se llevaron a cabo seis ensayos con radicales hidroxilo y seis ensayos con ozono molecular. En estos, se modificó el tiempo de contacto que tuvo el colorante dentro del reactor de contacto de burbuja, así como el pH de la solución acuosa de colorante y la concentración inicial con la cual se preparó el colorante que se introdujo al proceso de ozonación.

Tabla 4.8. Propuesta en el tiempo de contacto en el proceso de ozonación.

Número de ensayo	Tipo de ensayo	Tiempo de contacto (min)	Concentración inicial del colorante (mg/L)	Concentración final del colorante (mg/L)
1	Ozono molecular	10	231.78	183.05
	Radical hidroxilo		215.06	90.86
2	Ozono molecular	20	172.30	80.35
	Radical hidroxilo		149.66	18.79
3	Ozono molecular	20	107.93	68.05
	Radical hidroxilo		99.54	13.91
4	Ozono molecular	30	98.45	33.51
	Radical hidroxilo		97.99	5.00
5	Ozono molecular	30	113.68	44.14
	Radical hidroxilo		93.85	9.60
6	Ozono molecular	30	205.40	120.35
	Radical hidroxilo		179.83	76.15

En la **figura 4.6**, se analiza el primer ensayo con ozono molecular y con radicales hidroxilo; en esta se observa que un tiempo de contacto de 10 minutos, remueve al colorante, sin embargo, no es suficiente tiempo para lograr una remoción completa del colorante a una concentración de 250 mg/L de colorante en el agua.

La lectura de valores arrojados por el espectrofotómetro muestra que el cambio de un minuto a otro es casi mínimo; en el ensayo con ozono molecular se remueve menos colorante en comparación con el ensayo con radicales hidroxilo, esto porque el medio acuoso en el que se está desarrollando la oxidación es adecuado para la proliferación de radicales hidroxilo.

El ensayo con ozono molecular muestra un porcentaje de remoción de 21% y el ensayo con radical hidroxilo tiene un porcentaje de remoción del 57%. Para considerar un proceso de ozonación eficiente, se requiere que la eliminación del colorante sobre pase el 65% de remoción, demostrando así, que trabajar concentraciones altas a un tiempo de contacto relativamente corto, no dará los resultados esperados, dejando en claro que la contaminación del agua sigue estando presente.

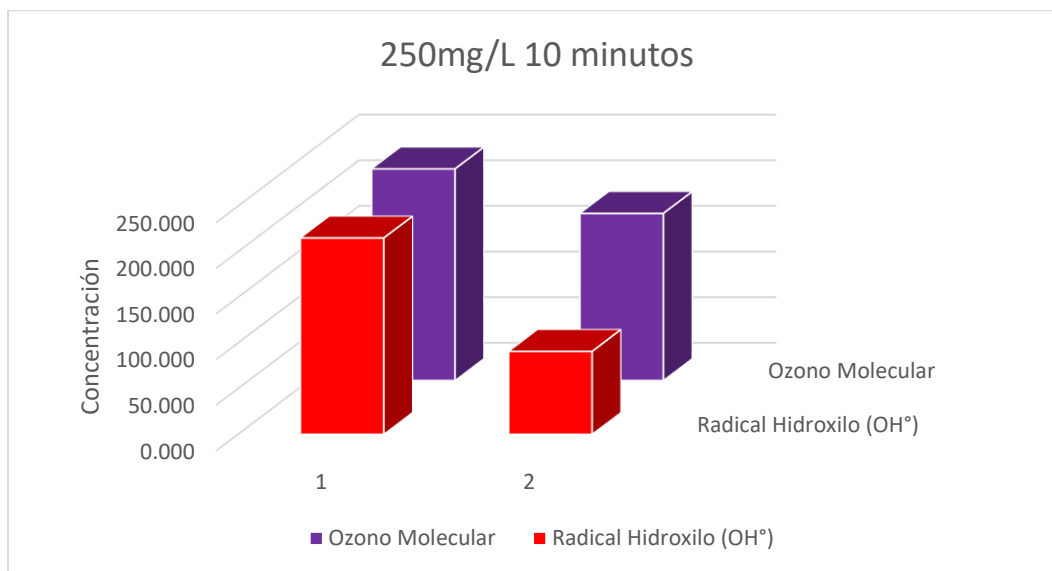


Figura 4.6. comparación de los ensayos con ozono molecular ($C_o= 232$ mg/L y $C_f= 183$ mg/L) y radical hidroxilo (OH°) ($C_o= 215$ mg/L y $C_f= 91$ mg/L).

- Concentración y Porcentaje de remoción

La Industria textil utiliza una concentración aproximada de 30-60 g/L de colorante para teñir 1 kilogramo de ropa, además de 70 a 150L de agua. En el caso del colorante rojo Congo, el cual no necesita un mordiente para adherirse por completo a la tela, solo requiere de 20-45 g/L de colorante para teñir 1 kilogramo de ropa, así como de 55 a 130L de agua (Secretaría de economía, 2015).

Para realizar las experimentaciones a nivel laboratorio, la solución con la concentración más alta fue con 250mg/L de este colorante, en proporción, una doceava parte de lo que se apresta en la industria de la moda.

Tabla 4.9. valores registrados del primer en ensayo del proceso de ozonación.

Tipo de ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
Ozono molecular	231.787	183.052	21.026
Radical hidroxilo	215.063	90.868	57.748

En el primer experimento, en la **tabla 4.9.** se observa que en ambos ensayos la cantidad de colorante disminuye conforme el tiempo avanza, por lo tanto, la concentración y el tiempo de contacto están estrechamente relacionados.

La pérdida de colorante que se observa al pasar de 250 mg a 215 mg y 231 mg puede estar relacionada a la cantidad de agua destilada con la cual se preparó la solución; los instrumentos utilizados para la medición de volumen, como los matraces aforados y los vasos de precipitados, tenían un error de ± 5 ; se utilizaron materiales graduados y aforados para medir con precisión el volumen del líquido que se debía utilizar, esto con el fin de no tener pérdidas significativas.

En consecuencia, el porcentaje de remoción es mayor con radicales hidroxilo que, con ozono molecular, debido a que, los radicales hidroxilo son mucho más reactivos y por tanto tienen una mayor capacidad para oxidar al colorante. Además, los radicales hidroxilo tienen una vida útil corta (Piña, 2007), lo que significa que reaccionan inmediatamente al ser generados, el ozono puede permanecer en el agua por más tiempo retardando el tiempo de reacción entre este y el colorante.

4.2.4 Segundo experimento

- Tiempo de contacto

Al no obtener una eficiencia superior a 65% con el ensayo de ozonación en un tiempo de contacto de 10 minutos, se decidió modificar este tiempo. La variable del tiempo al realizar la oxidación del colorante se realizó en intervalos de 20 minutos para el segundo y tercer ensayo, principalmente porque el tiempo recomendado para realizar el proceso de eliminación de contaminantes es de 20 a 40 minutos. La solución acuosa de colorante rojo

Congo se introdujo en el reactor para realizar el proceso de ozonación y cada minuto durante 20 minutos se tomó una muestra para su análisis.

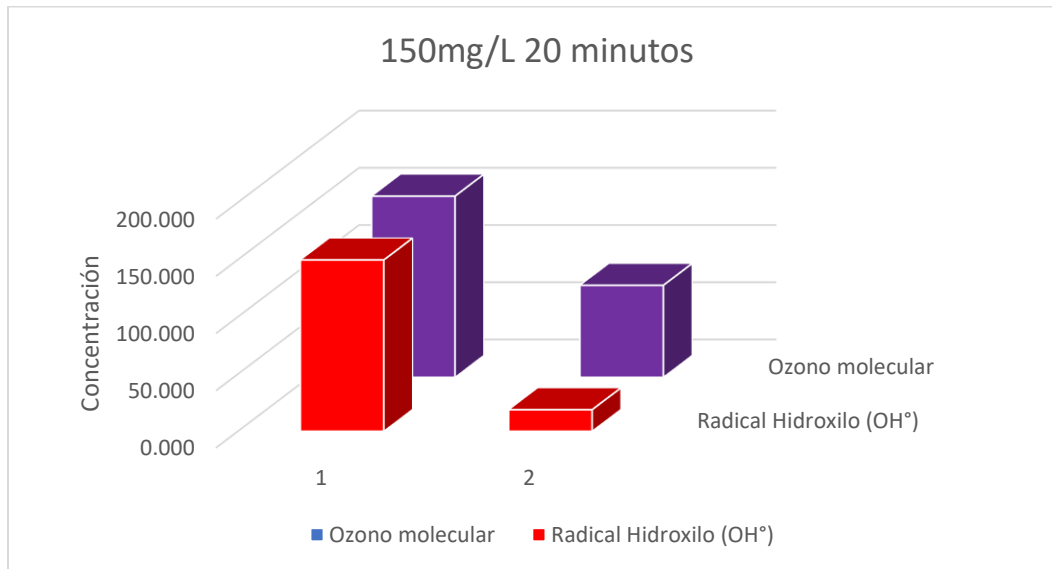


Figura 4.6. Segundo ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular ($C_o= 158.305$ mg/L y $C_f= 80.351$ mg/L) y radical hidroxilo (OH°) ($C_o= 149.661$ mg/L y $C_f= 18.799$ mg/L).

En la figura anterior se observan los resultados obtenidos del segundo ensayo, un tiempo de contacto medio como lo fueron los 20 minutos es suficiente tiempo para remover una concentración alta (150 mg/L) de colorante en el agua. Sin embargo, aún se observan trazas de este, que, si no son eliminadas, más adelante puede contribuir a la contaminación del ambiente.

Es así como, un tiempo de contacto de 20 minutos es adecuado para la remoción del colorante y los compuestos que continúan en el agua definitivamente podrían ser removidos por medio de un segundo tratamiento.

- Concentración y Porcentaje de remoción

Como se analizó en el primer experimento, el tiempo de contacto tiene influencia en el porcentaje de remoción del colorante.

Tabla 4.10. valores registrados del segundo en ensayo del proceso de ozonación.

Tipo de ensayo	Tiempo de contacto (min)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
Ozono molecular	20	158.305	80.351	53.367
Radical hidroxilo		149.661	18.799	87.439

En la **tabla 4.10** con los datos obtenidos se puede inferir que entre mayor es el tiempo de contacto y menor es la concentración del colorante, mayor es el porcentaje de remoción.

La eliminación del colorante en ambos ensayos es favorable, sin embargo, el porcentaje de remoción con el radical hidroxilo supera el 65% de eliminación del colorante.

Al comparar este experimento con el primero podemos observar que una menor concentración de colorante tiene una mayor efectividad en la eliminación del colorante.

4.2.5 Tercer experimento

- Tiempo de contacto

Al comprobar que un tiempo de contacto de 20 minutos elimina al 50% de colorante del agua, en el tercer experimento únicamente se modificó la concentración del colorante al inicio del proceso de ozonación; en este, se utilizaron 100 mg/L de colorante, **figura 4.7**.

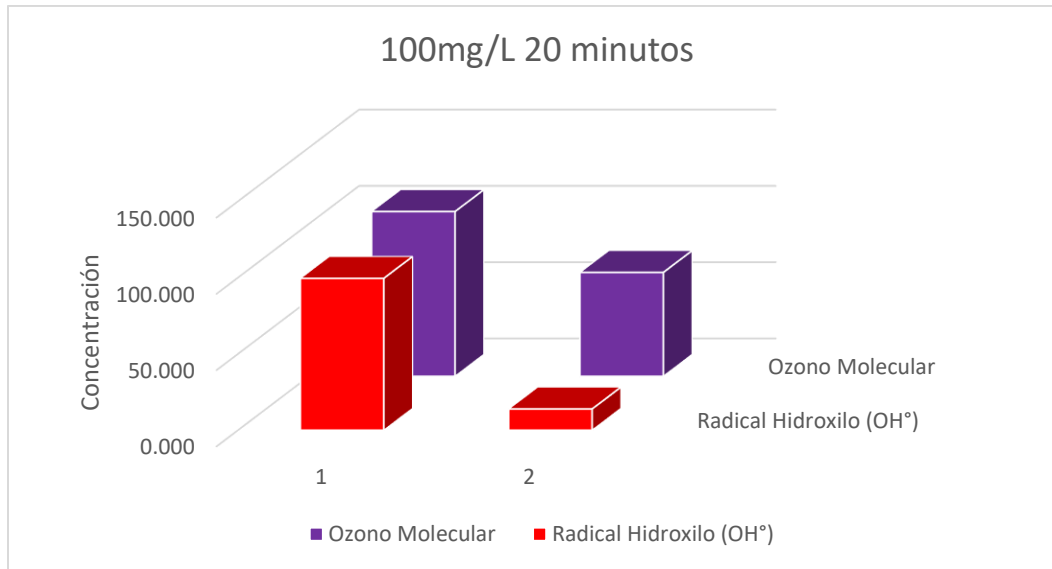


Figura 4.7. Tercer ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular ($C_o= 107.937$ mg/L y $C_f= 68.052$ mg/L) y radical hidroxilo (OH°) ($C_o= 99.546$ mg/L y $C_f= 13.914$ mg/L).

- Concentración y Porcentaje de remoción

Tabla 4.11. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.

Tipo de ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
Ozono molecular	107.937	68.052	36.952
Radical hidroxilo	99.546	13.914	86.023

Como se observa en la **tabla 4.11** la diferencia en la remoción del colorante es muy evidente; por un lado, tenemos la remoción con ozono molecular en la que, aunque la concentración inicial es muy baja, la remoción del colorante estuvo muy cerca de alcanzar el 50% de remoción. Y por el otro se observa la remoción del colorante con radical hidroxilo superó el 65% de remoción establecido (Aguilar et al, 2018) para considerarse como un buen ensayo.

Cuando se pesa el colorante se espera que la concentración de la disolución inicial sea la misma o cercana a la cantidad medida, en este experimento 100 mg, sin embargo, al instante de preparar la solución, la porción que se reparte para realizar el ensayo con ozono molecular presentó un aumento de 7.937 unidades, lo cual significa que se agregó más solución para este proceso que para el ensayo con radicales hidroxilo; además, se le agregó

a cada muestra 3 mL de ácido o base para equilibrar el pH con el que se necesitaba trabajar, esto provocó que la concentración se viera afectada.

El 86% de remoción del ensayo con radical hidroxilo es el segundo mejor ensayo que se obtuvo dentro de los 6 procesos de ozonación con radicales hidroxilo.

Si se compara el segundo experimento con el tercer experimento, aunque ambos ensayos se sometieron al mismo tiempo de contacto (20 minutos) y la concentración únicamente se disminuyó en 50 miligramos, se puede determinar que, entre mayor es la concentración del colorante, mayor es el tiempo de contacto que debe estar dentro del reactor, ya que, hay una diferencia significativa en los porcentajes de remoción del colorante.

4.2.6 Cuarto experimento

- Tiempo de contacto

Como se observó, con un tiempo de contacto de 20 minutos se obtuvo un mejor porcentaje de remoción en comparación con un tiempo de contacto de diez minutos; con la finalidad de comparar si hay una mejor remoción aumentando el tiempo de contacto, se decidió observar este comportamiento realizando los siguientes ensayos a un tiempo de contacto de 30 minutos.

Se realizaron tres ensayos del proceso de ozonación en un tiempo de 30 minutos, la solución acuosa de colorante rojo Congo se sometió al proceso de ozonación con estas condiciones para determinar la eficiencia del proceso determinando el porcentaje de remoción.

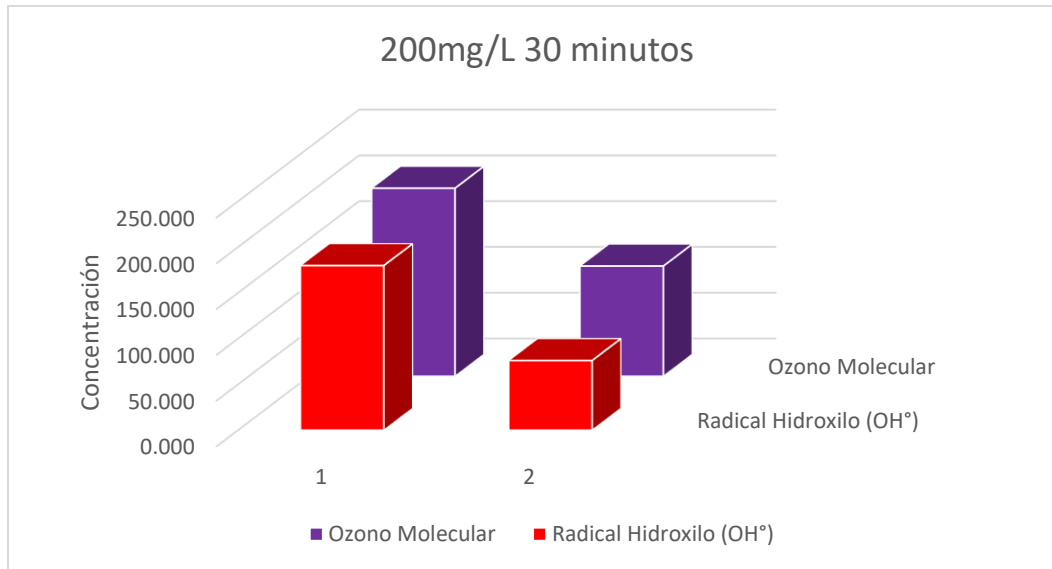


Figura 4.8. Cuarto ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular ($C_o=205.408$ mg/L y $C_f=120.351$ mg/L) y radical hidroxilo (OH°) ($C_o=179.833$ mg/L y $C_f=76.155$ mg/L).

En la **figura 4.8** se analiza el cuarto ensayo, aquí, se observa que un tiempo de contacto de 30 minutos es un tiempo adecuado para remover una concentración de 200 mg/L de colorante en el agua.

Un tiempo de contacto de 30 minutos remueve al colorante de forma muy positiva y eficiente, la remoción del colorante en el ensayo con radicales hidroxilo sigue siendo la mejor opción; los tres ensayos cumplen con el objetivo, limpian el agua dejando residuos menos tóxicos dentro del parámetro establecido.

- Concentración

Tabla 4.12. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.

Tipo de ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
Ozono molecular	205.408	120.351	41.409
Radical hidroxilo	179.833	76.155	57.652

En la tabla anterior, se puede notar la diferencia entre el ensayo con ozono molecular y con radical hidroxilo, aunque ambos ensayos son buenos para remover al colorante del agua, el porcentaje de remoción del ensayo con radical hidroxilo sigue demostrando ser el mejor ensayo.

De los tres ensayos llevados a cabo en un tiempo de contacto de 30 minutos, este es el que arroja porcentajes de remoción con eficiencia menor, demostrando así que entre mayor sea la concentración del colorante, mayor es el tiempo de contacto en que se debe llevar a cabo la reacción de oxidación de este. Si se compara este experimento con los tres anteriores, podemos observar que la concentración es un factor importante al eliminar compuestos orgánicos del agua.

4.2.7 Quinto experimento

- Tiempo de contacto

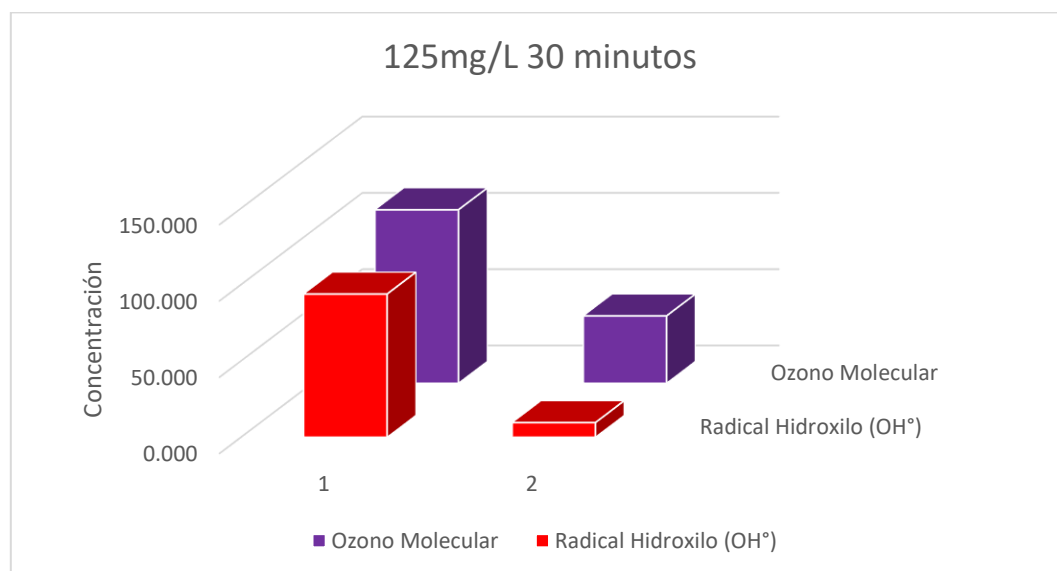


Figura 4.9. Quinto ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular-(Co= 113.684 mg/L y Cf= 44.144 mg/L) y radical hidroxilo (Co= 93.856 mg/L y Cf= 9.603 mg/L).

En la figura anterior, se analiza la remoción del colorante en el quinto experimento, siguiendo con el tiempo de contacto de 30 minutos, pero, reduciendo la concentración inicial del colorante; resultando aún más favorable la remoción con el radical hidroxilo.

- Concentración

Tabla 4.13. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.

Tipo de ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
Ozono molecular	113.684	44.144	61.170
Radical hidroxilo	93.856	9.603	89.768

En la tabla anterior, el porcentaje de remoción para el ensayo con ozono molecular presenta un valor favorable, aproximándose al 65% de remoción para ser considerado un proceso aceptable. Mientras que el porcentaje de remoción del ensayo con radical hidroxilo es muy favorable, considerándose así, como el tercer mejor ensayo de los seis que se realizaron a estas condiciones.

Al comparar el tercer y quinto ensayo, aunque la concentración es similar (100 mg/L), notamos que el tiempo de contacto tiene gran influencia, en ambos procesos, la remoción del colorante fue alta, siendo ambos los mejores ensayos para la eliminación del colorante rojo Congo en las aguas residuales.

4.2.8 Sexto experimento

- Tiempo de contacto

El sexto ensayo se realizó con el mismo tiempo de contacto que los dos ensayos anteriores (30 minutos), sin embargo, la concentración fue reducida 25 miligramos, para así, tener una concentración inicial aproximada de 100 mg/L, en la **figura 4.10** se observa la tendencia de remoción del colorante en ambos ensayos.

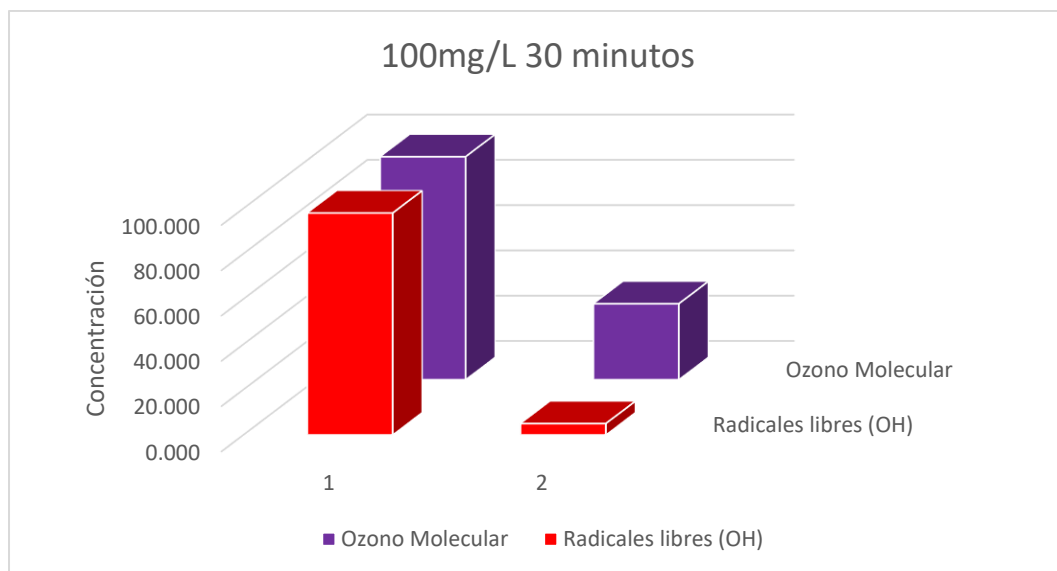


Figura 4.10. Sexto ensayo del proceso de ozonación con ozono molecular ($C_o= 98.454$ mg/L y $C_f= 33.511$ mg/L) y radical hidroxilo ($C_o= 97.994$ mg/L y $C_f= 5.006$ mg/L).

- Concentración

El sexto ensayo es considerado el más favorable, ya que, el porcentaje de remoción para el ensayo con radical hidroxilo supera el 90%, haciendo casi completa la remoción del colorante. Además, el ensayo con ozono molecular presenta un porcentaje de remoción del 66%, siendo este considerado como el mejor ensayo con ozono molecular por su alta eficiencia en la remoción del colorante, **figura 4.11**.

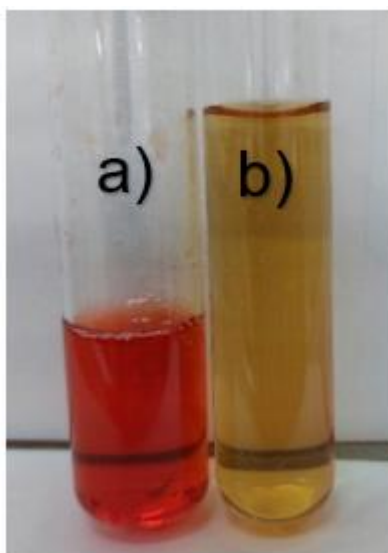


Figura 4.11. Eliminación del 94% del colorante. a) colorante al principio de la reacción, b) colorante al final de la reacción.

Tabla 4.14. valores registrados del tercer en ensayo del proceso de ozonación.

Tipo de ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción
Ozono molecular	98.454	33.511	65.962
Radical hidroxilo	97.994	5.006	94.892

En los tres ensayos con un tiempo de contacto de 30 minutos, existe una compensación dentro del proceso de ozonación, la cual nos indica que, entre menor tiempo de contacto, mayor será la dosis de ozono y menor será la eliminación del colorante; es por esta razón, que el tiempo de contacto es quizá el parámetro más importante al trabajar con un proceso de oxidación avanzada como la ozonación.

Si comparamos el primer y sexto ensayo que son los experimentos en los cuales la cantidad de colorante fue mayor, podemos inferir que entre mayor sea la concentración del colorante, mayor será el tiempo de contacto en que la reacción permanezca dentro del reactor.

Como se puede observar, la concentración del colorante puede afectar en diversas formas:

1. Una concentración muy alta de colorante (250 mg/L y 200 mg/L) provoca que el colorante se mantenga sin cambios al momento de removerlo del agua, esto significa que limita la capacidad del ozono para oxidar todos los compuestos del agua. Agregado a esto, no tener el control sobre la concentración provoca que se formen compuestos más complejos y aún más difíciles de eliminar, reduciendo la cantidad de ozono que puede reaccionar en el agua.
2. El tipo de compuestos que contenga el colorante pueden formar sustratos en las reacciones de oxidación catalizadas por ozono, lo cual puede acelerar la reacción de oxidación de otros compuestos en el agua.
3. Una concentración demasiado baja (50 mg/L) de colorante puede evitar o reducir el poder oxidativo del ozono.
4. La concentración afecta directamente al tiempo de contacto, es por lo que se observa que a un tiempo mayor existe una mejor eficiencia del proceso y por tanto una mejor eliminación del colorante.

Finalmente, al observar el comportamiento del colorante durante los 6 ensayos, se puede afirmar que el proceso de ozonación se puede ver afectado por:

- a) La concentración inicial del colorante en la solución.
- b) El pH de la solución.
- c) El tipo de reactor que se utilice para llevar a cabo la reacción de oxidación del colorante.
- d) El tiempo de contacto entre el ozono y el colorante.
- e) Y, por último, la dosis de ozono introducida en el reactor para llevar a cabo los procesos.

Por otro lado, el porcentaje de remoción depende de la concentración del colorante, en la **tabla 4.15** en la última fila están los cálculos del porcentaje de remoción de cada ensayo. El quinto ensayo trabajado con radicales hidroxilo es el que presenta los mejores resultados, observando un porcentaje de remoción del 94%.

Tabla 4.15. Concentración y porcentajes de remoción en la eliminación del colorante.

Número de Ensayo	Tipo de Ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Tiempo de contacto (min)	Porcentaje de Remoción
1	Ozono Molecular	231.78	183.05	10	21.02
	Radiales Hidroxilo	215.06	90.86		57.74
2	Ozono Molecular	172.30	80.35	20	53.36
	Radiales Hidroxilo	149.66	18.79		87.43
3	Ozono Molecular	107.93	68.05	20	36.95
	Radiales Hidroxilo	99.54	13.91		86.02
4	Ozono Molecular	113.68	44.14	30	61.17
	Radiales Hidroxilo	93.85	9.60		89.76
5	Ozono Molecular	98.45	33.51	30	65.96
	Radiales Hidroxilo	97.99	5.00		94.89
6	Ozono Molecular	205.40	120.35	30	41.40
	Radiales Hidroxilo	179.83	76.15		57.65

4.3 NORMATIVIDAD PARA COLORANTES

Como se mencionó en el marco teórico, México cuenta con muy pocas normas que regulen la descarga de contaminantes en los cuerpos de agua.

La norma mexicana principal para el control de contaminantes es 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, en esta, se indica que la descarga de colorantes que se pueden desechar en las aguas negras es de 200 mg/L, es así, que los valores obtenidos al final de la experimentación nos indican que el proceso de oxidación avanzada del colorante rojo Congo está dentro de lo establecido por esta norma.

4.4 OTROS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE OZONACIÓN

4.4.1 TIEMPO DE ALMACENAMIENTO

La industria textil almacena los efluentes en tanques por semanas o incluso meses. Para determinar si el tiempo de almacenamiento de la muestra influye directamente en los resultados alterando la concentración o el pH, se hizo una prueba con el ensayo que tenía una concentración de 125 mg/L.

Se preparó la solución stock de colorante el 2 de septiembre de 2022 pesando 125 mg de pigmento Rojo Congo, este fue disuelto en 1000 mL de agua destilada.

Se tomaron 500 mL de la muestra preparada y se ajustó el pH 3.05; al leer la concentración del colorante en el espectrofotómetro UV-VIS, GENESYS 10S en una longitud de onda de 550nm, la concentración fue de 113.705 mg/L.

La solución se almacenó en un frasco ámbar durante 3 semanas. El 29 de septiembre de 2022 se trabajó con esta solución almacenada; para poder realizar el ensayo con ozono molecular se midió el pH, el cual se mantuvo en 3.05, el medir la concentración, se leyó un valor de 113.684 mg/L, la diferencia entre las concentraciones fue tan solo de 0.021 mg.

Por otro lado, la otra mitad de la muestra preparada (500 mL) se ajustó en un pH 10.95; al leer la concentración del colorante en el espectrofotómetro UV-VIS, GENESYS 10S en una longitud de onda de 550nm, la concentración fue de 93.898 mg/L. Se almacenó en un frasco ámbar durante 3 semanas. El 30 de septiembre de 2022, se trabajó con la solución almacenada para hacer el ensayo con radicales hidroxilo, el pH 10.95 quedó sin cambios, y la concentración fue de 93.856 mg/L; la diferencia entra las concentraciones fue de 0.042 mg.

Demostrando así en ambas pruebas, que el tiempo de almacenamiento no influye notablemente en los resultados. Cabe señalar que el mínimo cambio en la concentración pudo deberse a la poca luz absorbida por el colorante durante las 3 semanas de almacenamiento.

4.5 CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE OZONACIÓN

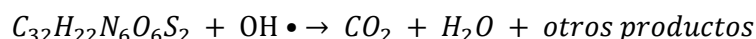
El estudio de la rapidez de reacción de una oxidación química con ozono molecular y con radicales hidroxilo es indispensable analizar para conocer el comportamiento en la rapidez de reacción del colorante bajo condiciones variables (como pH y concentración).

Para determinar la cinética de la reacción de rojo Congo se mide la concentración de colorante en función del tiempo de reacción.

Las reacciones que se llevan a cabo dentro del reactor son:

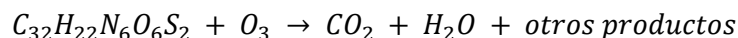
- Con radical hidroxilo (OH•):

El radical hidroxilo actúa como agente oxidante del colorante rojo Congo, transfiere electrones y genera radicales libres durante el proceso. La reacción de oxidación resultante es:



- Con ozono molecular (O₃):

El ozono es un oxidante muy fuerte que es capaz de oxidar al colorante rojo Congo, fragmentándolo en compuestos más simples y fáciles de degradar. La reacción de oxidación resultante es:



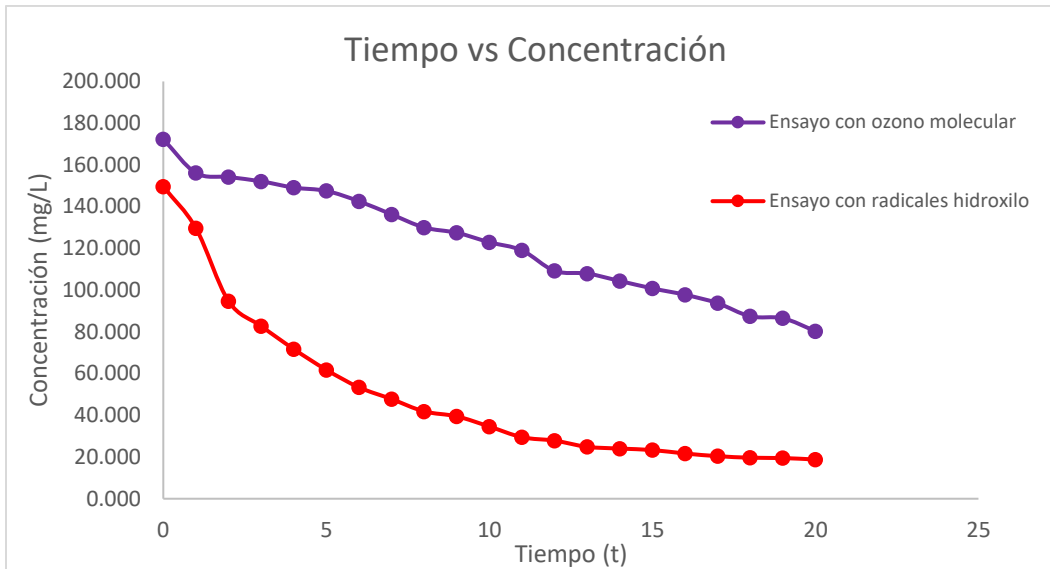


Figura 4.12. Cinética de la reacción de colorante rojo Congo en el segundo ensayo.

En la figura anterior se analizan:

- a) Ensayo con ozono molecular, pH 3.37 y concentración inicial de 150 mg/L
- b) Ensayo con radicales hidroxilo, pH 10.40 y concentración inicial de 150 mg/L

En esta, se puede observar que ambos ensayos siguen una cinética de primer orden, ya que, la velocidad de reacción del colorante rojo Congo depende directamente de la concentración molar inicial del pigmento.

Este orden de reacción lo siguen todos los ensayos realizados, **tabla 4.16**, por lo que se puede concluir que el orden general para el colorante rojo Congo es uno.

Tabla 4.16. Orden de reacción de los ensayos realizados.

Número de Ensayo	Tipo de Ensayo	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Orden de reacción
1	Ozono Molecular	231.787	183.052	Primer orden
	Radiales Hidroxilo	215.063	90.868	Primer orden
2	Ozono Molecular	172.305	80.351	Primer orden
	Radiales Hidroxilo	149.661	18.799	Primer orden
3	Ozono Molecular	107.937	68.052	Primer orden
	Radiales Hidroxilo	99.546	13.914	Primer orden
4	Ozono Molecular	113.684	44.144	Primer orden
	Radiales Hidroxilo	93.856	9.603	Primer orden
5	Ozono Molecular	98.454	33.511	Primer orden
	Radiales Hidroxilo	97.994	5.006	Primer orden
6	Ozono Molecular	205.408	120.351	Primer orden
	Radiales Hidroxilo	179.833	76.155	Primer orden

4.6 CUANTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DEL RADICAL HIDROXILO.

Es importante hacer el cálculo de radical hidroxilo (OH•) que intervienen en el proceso de ozonación porque estos iones hidroxilo son los que principalmente reaccionan con los

contaminantes presentes en el agua a tratar. Cuantificar la producción de (OH•) optimiza el proceso, garantizando una eliminación efectiva de los contaminantes.

La producción de (OH•) es la forma de medir la capacidad del ozono para oxidar los contaminantes en la solución.

Para determinar la concentración de (OH•) producidos durante el proceso de ozonación se utilizan diversos métodos, como:

- a) **Metrología de radiación:** se miden los OH a través de la aplicación de radiación UV absorbida por el agua.
- b) **Monitoreo de pH:** Al hacer la medición del pH se puede estimar la producción de OH presentes en el agua, ya que, estas dos variables se relacionan entre sí.
- c) **Química de reactivos:** se basa en la medición de OH al ser producidos por ciertos reactivos como el escualeno, la medición se realiza a través de cromatografías o espectroscopía.
- d) **Medición de concentración de ozono:** el ozono en este ensayo es directamente proporcional a la producción de OH.

A lo largo de esta experimentación no se midieron valores como la concentración de iones hidrógeno o la concentración de hidronio, únicamente se cuantificó la concentración de iones oxígeno, por ello, para determinar la concentración de radicales hidroxilo presentes durante el proceso de ozonación, se optó por igualar la cantidad de (OH•) con la concentración de ozono, ya que estos valores son directamente proporcionales, **tabla 4.17**, esto se puede realizar así, porque el ozono que está en el reactor de contacto de burbuja reacciona con las moléculas del agua presentes en la solución preparada de colorante, esto provoca que se formen los radicales hidroxilo (OH) y el oxígeno molecular (O₂). (Valderrama ,2003)

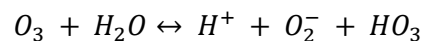


Tabla 4.17. Relación entre la concentración de ozono y la producción de radicales hidroxilo.

Número de Ensayo	Tipo de Ensayo	Concentración inicial de O ₃ (mg/L)	Concentración de (OH•) al inicio (mg/L)
1	Ozono Molecular	231.787	231.787
	Radiales Hidroxilo	215.063	215.063
2	Ozono Molecular	172.305	172.305
	Radiales Hidroxilo	149.661	149.661
3	Ozono Molecular	107.937	107.937
	Radiales Hidroxilo	99.546	99.546
4	Ozono Molecular	113.684	113.684
	Radiales Hidroxilo	93.856	93.856
5	Ozono Molecular	98.454	98.454
	Radiales Hidroxilo	97.994	97.994
6	Ozono Molecular	205.408	205.408
	Radiales Hidroxilo	179.833	179.833

Como se observa en la tabla anterior, cuanto mayor es la concentración de ozono, mayor es la producción de radicales hidroxilo.

4.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Matemáticamente se analizaron los datos, identificando así que, aunque los ensayos de ozonación son un procedimiento adecuado para el tratamiento de agua residual, la prueba con radical hidroxilo fue la más adecuada para eliminar al colorante rojo Congo; para comprobar si esto era exacto, se aplicó un análisis estadístico a los mismos valores.

Este análisis se realizó a través de la prueba de Tukey, la cual tuvo como objetivo comparar los datos de absorbancia y concentración (remoción del colorante) obtenidos en los ensayos de ozonación, para así, determinar si existió entre ellos una diferencia significativa. Además, este análisis ayudó a encontrar las condiciones óptimas de operación y en la interpretación del porcentaje de remoción.

En los resultados de las **tablas 4.18, 4.19 y 4.20**, se proporciona la información suficiente para entender como la concentración de las muestras afecta directamente en el porcentaje de remoción del colorante; esto a través de la interpretación del dato denominado p-valor, en el cual, cuando el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) es mayor a p-valor significa que no hay diferencias significativas entre las medidas obtenidas en los ensayos de ozonación, entonces, los grupos son similares en cuanto a resultado y por lo tanto, las diferencias observadas en los valores de concentración se pueden deber a la inexactitud de medición en un recipiente de vidrio.

Por otro lado, cuando el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$) es menor a p-valor significa que sí hay diferencias significativas entre las medidas obtenidas en los ensayos de ozonación, lo anterior refleja que existe una diferencia en el efecto del tratamiento.

Como se observa en las **tablas 4.18, 4.19 y 4.20**, cuando se compara el proceso de ozonación con radicales libres y con ozono molecular, el valor del nivel de significancia es menor a p-valor, indicando que ambos procesos son muy diferentes entre sí; por esta razón, es que se deben determinar las condiciones óptimas de operación para cada ensayo, ya que, como se vio en los ensayos, si no se establecen estas condiciones, los procesos no tienen la misma eficiencia.

Cuando se comparan los ensayos de acuerdo con el tiempo de contacto en que se llevó a cabo la reacción, también se puede observar que el nivel de significancia es menor a p-valor, afirmando que la variable más importante para un proceso de oxidación avanzada es el tiempo de contacto en que la reacción se lleva a cabo dentro del reactor.

El valor del nivel de significancia en este proceso de oxidación avanzada, (ozonación), depende directamente del tiempo de contacto, el tipo de ensayo con el cual se esté trabajando (ozono molecular o radical hidroxilo), así como, la concentración de la muestra de colorante a eliminar, sin embargo, el valor de la concentración afecta directamente al ensayo si la concentración es muy alta, ya que el proceso necesita producir más ozono para remover al colorante del agua. En las **tablas 4.18, 4.19 y 4.20** se aprecia el análisis que muestra lo anteriormente descrito.

Tabla 4.18. Comparación de los ensayos con un tiempo de contacto de 20 minutos

ENSAYO CON OZONO MOLECULAR					
TUKEY	Alfa	0.05			
Ensayo	Ss	df	q-crit		
150 g/mL ácido	14448.12893	40	2.858		
100 g/mL ácido	1649.849674				
Grupo 1	Grupo 2	mean	std err	q-stat	p-value
150 g/mL ácido	100 g/mL ácido	33.42090476	4.377700337	7.63435187	3.30355E-06
ENSAYO CON RADICAL HIDROXILO					
TUKEY	Alfa	0.05			
Ensayo	Ss	df	q-crit		
150 g/mL básico	27816.43098	40	2.858		
100 g/mL básico	11885.46973				
Grupo 1	Grupo 2	mean	std err	q-stat	p-value
150 g/mL básico	100 g/mL básico	13.90261905	6.874894	2.02223031	0.160501274

Como se observa, al comparar los ensayos con ozono molecular, no se notan diferencias significativas, en cambio, al comparar los ensayos con radical hidroxilo se nota que hay diferencias significativas, demostrando que, aunque el tiempo de reacción es muy similar, los 50mg de diferencia en la concentración inicial provoca un impacto fuerte en el porcentaje de remoción.

Tabla 4.19. Comparación de los ensayos con un tiempo de contacto de 20 minutos y el ensayo de 10 minutos.

ENSAYO CON OZONO MOLECULAR					
TUKEY	Alfa	0.05			
Ensayo	ss	df	q-crit		
150 g/mL ácido 20 min	8779.333021	30	3.486		
100 g/mL ácido 20 min	1178.744881				
250 g/mL ácido 10 min	1977.081996				
Grupo 1	Grupo 2	mean	std err	q-stat	p-value
150 g/mL ácido 20 min	100 g/mL ácido 20 min	33.532	6.013409228	5.57620457	0.00126
150 g/mL ácido 20 min	250 g/mL ácido 10 min	83.0408364	6.013409228	13.8092442	2.36E-10
100 g/mL ácido 20 min	250 g/mL ácido 10 min	116.572636	6.013409228	19.3854487	5.9952E-14
ENSAYO CON RADICAL HIDROXILO					
TUKEY	Alfa	0.05			
Ensayo	ss	df	q-crit		
150 g/mL básico 20 min	16576.38111	30	3.486		
100 g/mL básico 20 min	7412.519187				
250 g/mL básico 10 min	14283.04381				
Grupo 1	Grupo 2	mean	std err	q-stat	p-value
150 g/mL básico 20 min	100 g/mL básico 20 min	14.0544545	10.76919827	1.30508067	0.63035546
150 g/mL básico 20 min	250 g/mL básico 10 min	114.315545	10.76919827	10.6150489	6.77046E-08
100 g/mL básico 20 min	250 g/mL básico 10 min	128.37	10.76919827	11.9201098	6.20025E-09

Al comparar los ensayos con ozono molecular y con radical hidroxilo, se nota que solo en el ensayo de 150 mg/L y 100 mg/L hay diferencia significativas, demostrando que, aunque el tiempo de reacción es muy similar, la diferencia en la concentración inicial provoca un impacto fuerte en el porcentaje de remoción, además, la tendencia de todos los ensayos es que al existir una diferencia pequeña entre las concentraciones, mayor es el cambio en el porcentaje de remoción; en cambio, cuando la diferencia de concentración es mayor a 100 miligramos, no existen diferencias significativas entre los ensayos.

Tabla 4.20. Comparación de los ensayos con un tiempo de contacto de 30 minutos.

ENSAYO CON OZONO MOLECULAR					
TUKEY	Alfa	0.05			
Ensayo	Ss	Df	q-crit		
100 g/mL ácido	4299.08	30	3.486		
125 g/mL ácido	6888.22				
200 g/mL ácido	6417.17				
Grupo 1	Grupo 2	mean	std err	q-stat	p-value
100 g/mL ácido	125 g/mL ácido	18.65	7.30	2.55	0.184
100 g/mL ácido	200 g/mL ácido	98.63	7.30	13.50	3.9E-10
125 g/mL ácido	200 g/mL ácido	79.98	7.30	10.95	3.62E-08
ENSAYO CON RADICAL HIDROXILO					
TUKEY	Alfa	0.05			
Ensayo	Ss	Df	q-crit		
100 g/mL básico	11244.85771	30	3.486		
125 g/mL básico	7875.206934				
200 g/mL básico	9934.552335				
Grupo 1	Grupo 2	mean	std err	q-stat	p-value
100 g/mL básico	125 g/mL básico	4.33	9.38	0.46	0.94
100 g/mL básico	200 g/mL básico	92.12	9.38	9.81	3.06E-07
125 g/mL básico	200 g/mL básico	87.78	9.38	9.35	7.46E-07

Al comparar los porcentajes de remoción y la concentración obtenida en los experimentos realizados en un tiempo de contacto de 30 minutos, se observa que entre los ensayos de 100mg/L y 125mg/L existe diferencia significativa, por lo tanto, aunque el porcentaje de remoción sea muy parecido, para 100mg/L es de 66% para ozono molecular, en 125mg/L es de 61%, matemáticamente no se percibe el cambio en los datos, en el análisis estadístico sí y esto podría demostrar porque aunque los cambios de la concentración sean tan solo de 50 miligramos, el porcentaje de remoción cambia tanto de una concentración a otra.

4.8 BIORREMEDIACION

Con el fin de remover el colorante que se encontraba en los residuos provenientes del proceso de ozonación, a los remanentes almacenados se les aplicó un proceso de Biorremediación, el cual tenía como objetivo limpiar el agua con ayuda de la microalga *Chlorella vulgaris*.

Esta microalga verde se caracteriza por ser un organismo unicelular con forma esférica, la cual en su estructura no cuenta con un flagelo. Tiene la capacidad de obtener la energía que necesita para desarrollarse a través del sol, además, se alimenta de materia inorgánica, haciendo que esta microalga sea **fotoautótrofa** y se adapta al medio en que se cultiva.

Así mismo, se eligió a la microalga *Chlorella vulgaris* porque:

- Es un organismo que es fácil de cultivar en grandes cantidades, haciéndola ideal para el tratamiento de agua.
- Es tolerante a sustancias tóxicas del agua, muy importante, debido a que aún no se sabe con exactitud en qué momento o en cuanto tiempo puedan formar subproductos peligrosos en la oxidación del colorante Rojo Congo.
- Aunque no fue tema central de esta investigación, utilizar esta microalga reduce los costos asociados al tratamiento convencional del agua.
- Se desea demostrar que el ozono es inocuo, ya que, no genera ningún compuesto durante la reacción de oxidación del colorante, comprobando así, que el proceso de ozonación puede considerarse como un post proceso a un tratamiento biológico, ya que, no daña a la microalga.

4.8.1 Curva de crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*

La curva de crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* se muestra en la **figura 4.13**. Teniendo en cuenta las fases de una curva de crecimiento, fase de latencia, fase exponencial o fase logarítmica, fase estacionaria y fase de muerte, no se observa fase de latencia, ya que, la microalga se encontraba en fase de crecimiento experimental al tomarse del medio de cultivo proporcionado en el laboratorio; cuando este organismo celular se colocó en los biorreactores, los cuales eran un medio de cultivo similar en donde había nutrientes como nitrógeno y carbono que son base de la composición bioquímica de la microalga, esto permitió que la adaptación del medio fuera más sencilla. No se observa fase exponencial debido a que únicamente se tomaron los datos de cuatro semanas. Entre los

días 13, 14 y 15 se puede ver la fase estacionaria, alcanzando su máximo crecimiento el día 15. Finalmente, el crecimiento disminuye entre los días 24 y 15, representando así la fase de muerte.

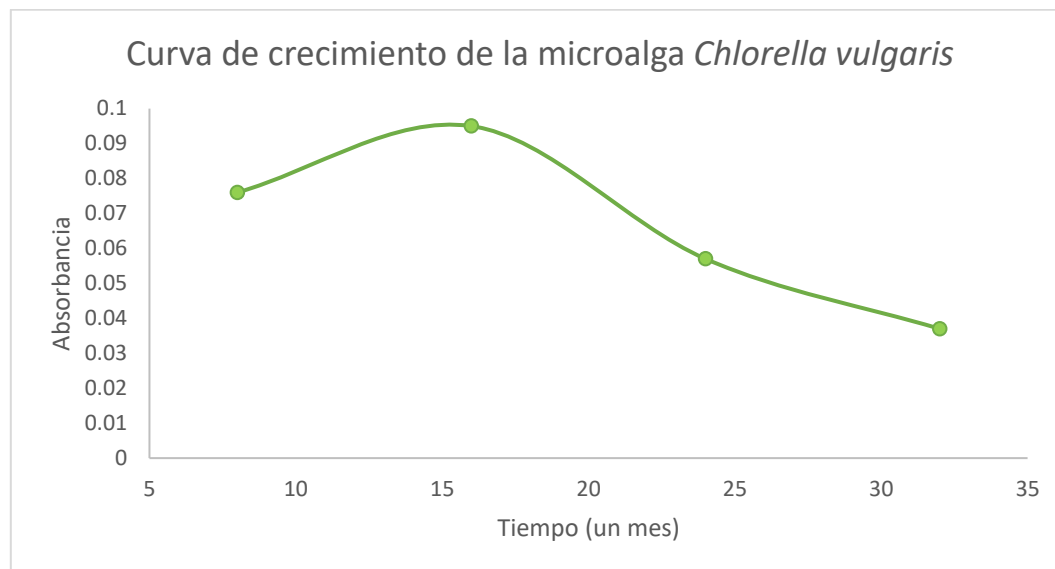


Figura 4.13. Curva de crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en un mes.

Como parte de la experimentación, el proceso de biorremediación la microalga *Chlorella vulgaris* se hizo bajo condiciones de pH diferentes; el primer experimento se llevó a un pH básico de 9.11, esto con el fin de tener un ensayo similar al que se expone en la literatura, en donde el mejor escenario para trabajar con esta microalga es con un pH básico y a temperatura ambiente (25°C). En el segundo, tercero y cuarto experimento se modificó el pH, (5.57, 5.27 y 6.33, respectivamente), esto con el fin de trabajar en un medio ácido para observar el comportamiento del alga en la eficiencia de remoción del colorante y en el crecimiento de este organismo celular.

En la **figura 4.14** se muestra la curva de crecimiento de la microalga en el primer experimento a diferentes valores de absorbancias. En la **figura 4.15** se observa la curva de crecimiento de la microalga en el segundo, tercero y cuarto ensayo, respectivamente, a diferentes valores de absorbancia.

Al comparar las curvas de crecimiento se observa que a un pH ácido existe una inhibición de la *Chlorella vulgaris* en el agua, está comprobado que el pH es un factor que afecta el crecimiento y la incorporación de carbono del medio, por lo que existe una relación

significativa entre el metabolismo del nitrógeno y el pH; además, esta microalga necesita de un pH entre 8.0 - 9.34 que le permita desarrollarse favorablemente. Cuando se modifica el pH hay un desequilibrio, afectando principalmente en la productividad de la microalga, en su crecimiento y en la capacidad de remoción de los contaminantes, principalmente aquellos que en su estructura contiene nitrógeno (Martínez, 2012).

Modificar el pH en estos ensayos también afecta en la reproducción dentro del biorreactor; la microalga *Chlorella vulgaris* se reproduce por autoesporas (Kai Ru, I., et al. 2020), estas se forman cuando el pH de la solución se encuentra neutro (6.95 - 7.35 para *Chlorella vulgaris*), los valores bajos de absorbancia indican que, a lo largo de los días, para los ensayos dos, tres y cuatro, el alga entró rápidamente en fase de muerte (figura 4.15).

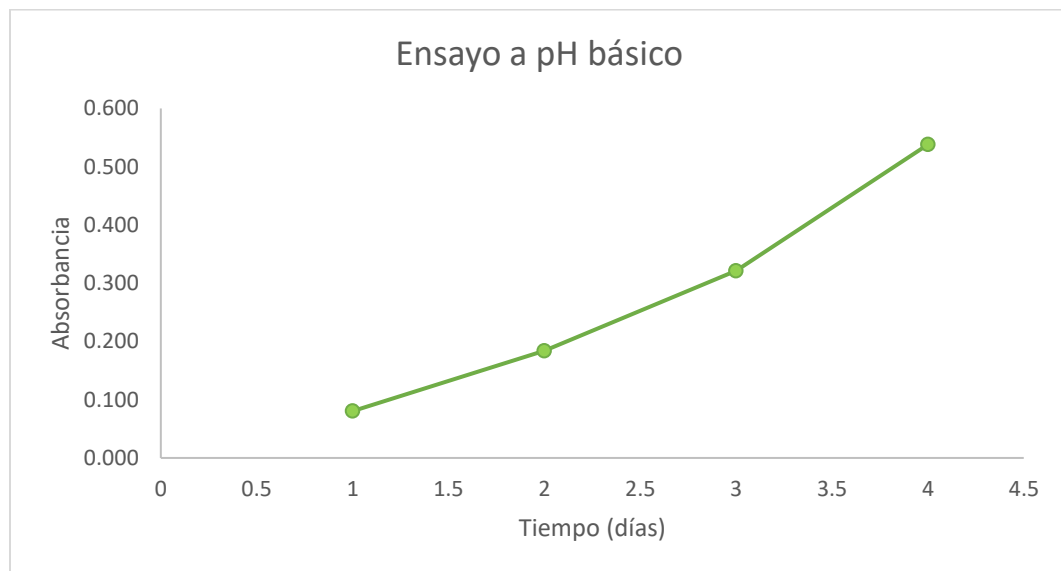


Figura 4.14. Curva de calibración de la microalga *Chlorella vulgaris* en una semana.

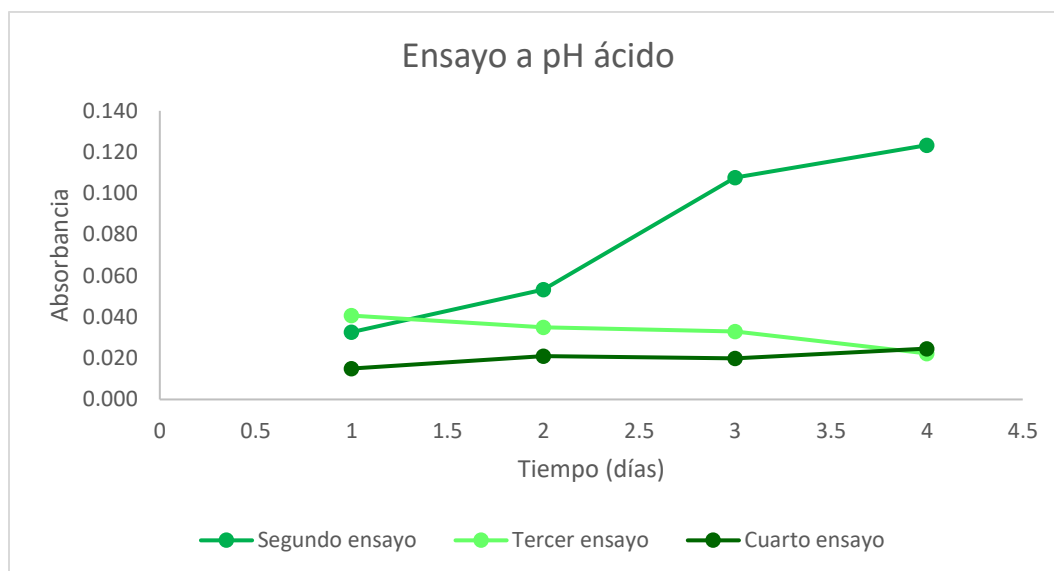


Figura 4.15. Curva de crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris* en una semana.

Como se describió en la imagen de la estructura química del colorante Rojo Congo, (**Figura 2.4**), al tratarse de un compuesto azoderivado del benceno, posee dos enlaces N=N formados por nitrógeno, la microalga seleccionada trabaja principalmente para la eliminación de nutrientes como NO_3 , NO_2 y PO_4 ; es así como los resultados al experimentar se consideraban altos.

La eliminación del colorante se estudió en 6 biorreactores, en los cuales se utilizaron los residuos provenientes del primer tratamiento, "**ozonación**"; se eligieron 6 frascos de residuos, seleccionados por el porcentaje de remoción del tratamiento previo, su pH y el volumen resultante.

Como se analiza en la **tabla 4.21**, el primer proceso se llevó a cabo en un medio básico, ya que, esta microalga tiene un mejor crecimiento y desarrollo si sus condiciones están a un pH de 9.0–9.5; por ello, el resto de los experimentos efectuados, (tres experimentos), se realizaron en medio ácido, para comparar entre ellos que tanto cambiaban los resultados y comprobar que el alga no se desarrolla bien en un medio con estas condiciones de pH.

El biorreactor No. 1 tuvo la función de cultivo, esto para observar, su comportamiento a lo largo del tiempo, la influencia del pH en el medio en que se encontraba la microalga.

Se determinó si la alcalinidad o acidificación del medio de cultivo era una condicionante para que la *Chlorella vulgaris* creciera y continuara removiendo el colorante.

Tabla 4.21. Resultados de remoción del colorante a lo largo de los días de experimentación y cambio de pH en la solución.

No. Experimento	Día	Concentración del colorante (mg/L)	pH del medio	Datos de cultivo	Datos de testigo	[0.5] (g)	[1.0] (g)	[1.5] (g)
1°	Martes	130.437	9.11	0.080	2.322	2.254	2.319	2.119
	Miércoles			0.184	2.322	2.144	2.194	2.084
	Jueves			0.321	2.322	2.138	2.160	2.067
	Viernes			0.538	2.305	2.071	2.009	1.990
	% de Remoción			S/D	S/D	8.329	13.707	6.259
2°	Martes	77.860	5.57	0.033	1.434	0.722	0.665	0.846
	Miércoles			0.053	1.492	0.588	0.421	0.795
	Jueves			0.108	1.517	0.481	0.188	0.683
	Viernes			0.123	1.618	0.425	0.090	0.641
	% de Remoción			S/D	S/D	36.000	93.996	25.921
3°	Martes	45.293	5.27	0.041	0.843	0.320	0.307	0.025
	Miércoles			0.035	0.854	0.243	0.190	0.014
	Jueves			0.033	0.718	0.131	0.131	0.009
	Viernes			0.022	0.670	0.061	0.082	0.006
	% de Remoción			S/D	S/D	70.671	88.664	100.00
4°	Martes	33.914	6.17	0.015	0.662	0.362	0.250	0.220
	Miércoles			0.021	0.641	0.343	0.201	0.188
	Jueves			0.020	0.671	0.274	0.128	0.155
	Viernes			0.025	0.661	0.246	0.122	0.145
	% de Remoción			S/D	S/D	28.546	64.712	44.993

4.8.2 Remoción del colorante con microalga *Chlorella vulgaris*.

a) Primer experimento

Con el fin de analizar el comportamiento de la microalga en el proceso de biorremediación, en la **figura 4.16** se describe como fue disminuyendo la concentración del colorante a lo largo de la semana, esto nos indica que la microalga a un pH básico es capaz de eliminar

al colorante, por consiguiente, un proceso fisicoquímico de oxidación avanzada como la ozonación se puede considerar como un pretratamiento a un proceso biológico (biorremediación) favoreciendo las condiciones para una buena remoción del colorante rojo Congo.

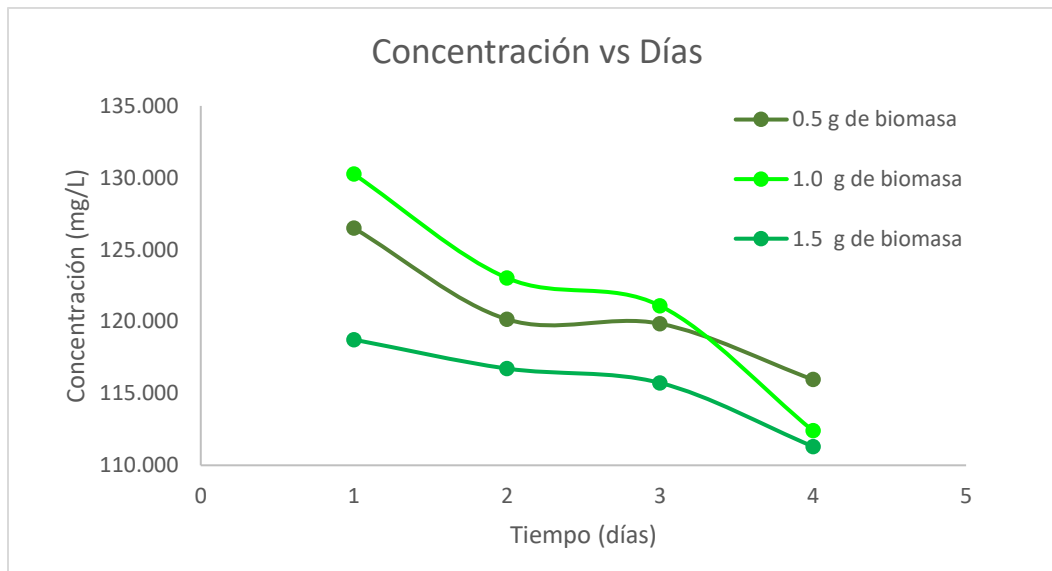


Figura 4.16. Curva de calibración de la microalga *Chlorella vulgaris* en una semana.

El agua tratada de este experimento es procedente del primer ensayo del proceso de ozonación, en el cual, la concentración final se encontraba en 183.052 mg/L de colorante en el agua. Estos residuos permanecieron guardados del 20 de septiembre de 2022, hasta el 22 de octubre de 2022; la concentración de estos residuos bajó, cambiando de 183.052 mg/L a 182.079 mg/L, esto se pudo deber a la poca absorción de luz del exterior; sin embargo, está comprobado que el alga no soporta concentraciones muy altas de colorante cuando la biomasa es menor a los 5.0 g, (más allá de 150 mg/L), ya que, esta puede deformarse y morir antes de eliminar los contaminantes del agua, por esta razón, la concentración inicial de la solución fue de 130.437 mg/L,

En este experimento, una biomasa de 1.0 g de microalga húmeda en el tercer biorreactor, elimina un 13.707% de colorante del agua.

El colorante rojo Congo es un colorante fotosensible, lo que indica que si entra en contacto con luz solar (UV) se puede oxidar, degradar o incluso perder propiedades, en la **figura 4.17**, se midió la concentración del colorante al ser sometido bajo luz UV, para determinar el cambio que pudiera presentar el Rojo Congo y si la luz era un factor determinante al realizar experimentaciones con este colorante.

Se concluye así, que la luz UV no afecta significativamente en el cambio de la concentración del colorante, en la figura 4.17 se puede observar que no hay cambios en la estructura de la microalga y además se favoreció su crecimiento. En la figura 4.18 se observa a la microalga sin alteración alguna.

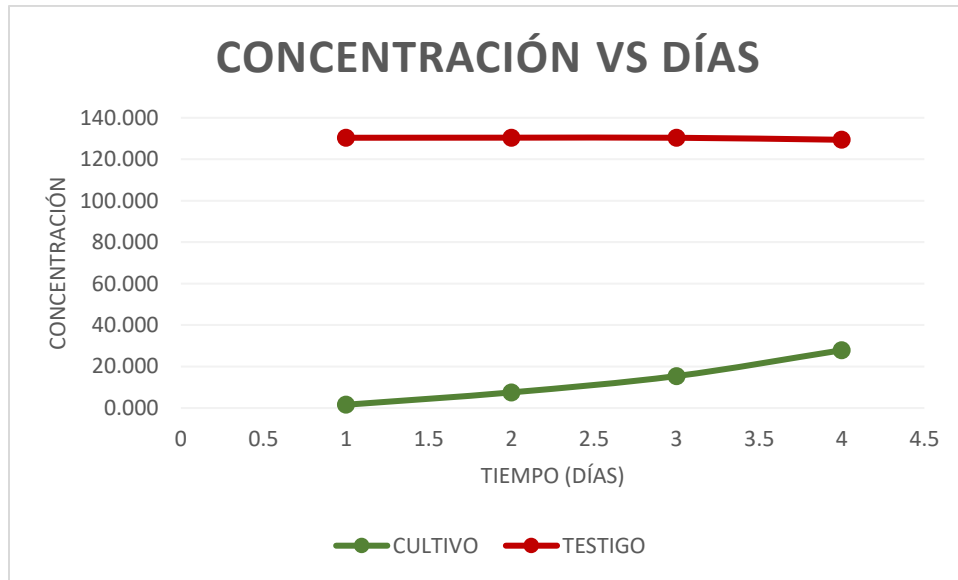


Figura 4.17. Concentración del colorante expuesto a la luz UV.

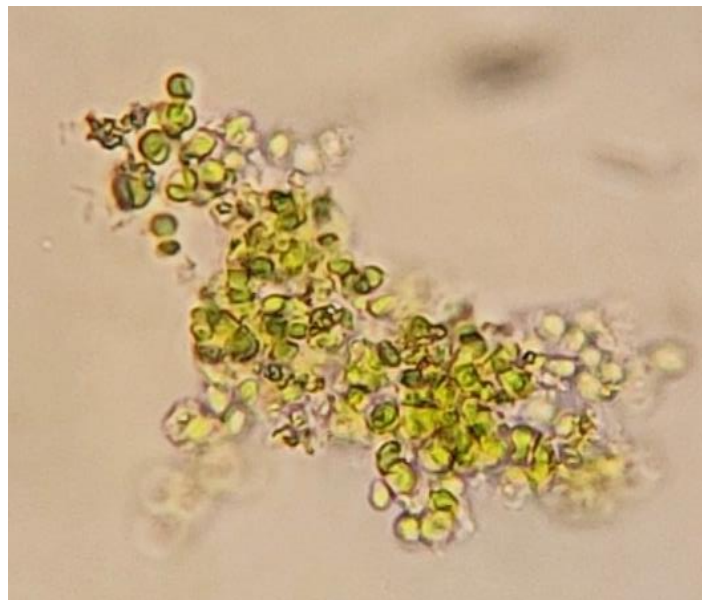


Figura 4.18. Morfología de la microalga sin presentar deformaciones.

En la **figura 4.19**, se presenta la remoción del colorante a lo largo del tiempo de experimentación, es visible, que la eliminación del colorante es gradual. Es posible que, si

el experimento se dejara unos días más, (2 semanas completas), la remoción del colorante arrojaría mejores resultados.

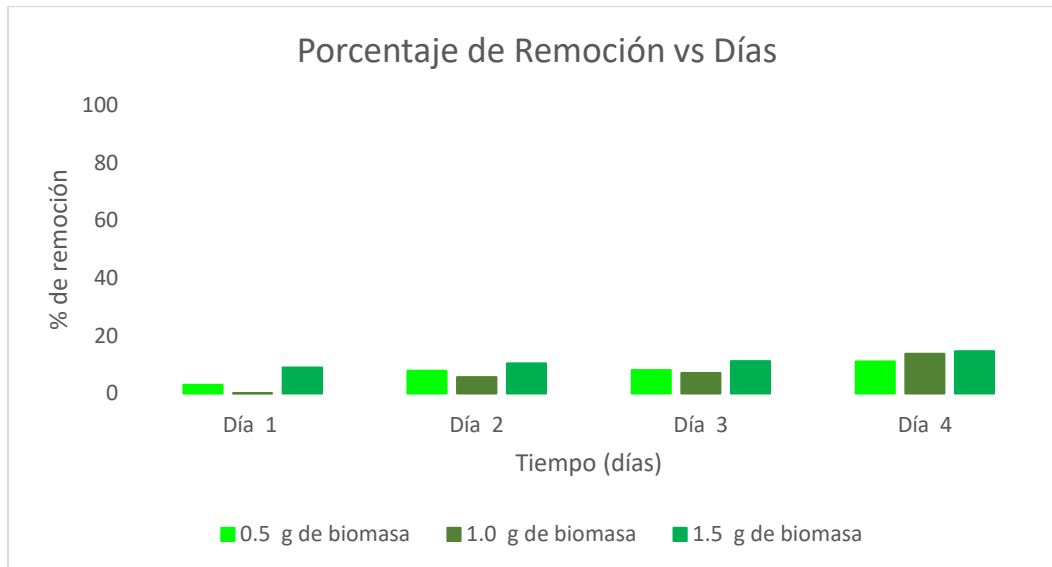


Figura 4.19. Porcentaje de remoción del colorante Rojo Congo con microalga *Chlorella vulgaris*.

b) Segundo experimento

Con fines experimentales, el pH de la solución se cambió, llevando el experimento a un pH completamente ácido. En este ensayo se trabajó con los residuos del tercer ensayo del proceso de ozonación, con una concentración final de 68.052 mg/L, el tiempo de almacenamiento de estos residuos fue del 23 de septiembre de 2022 al 17 de octubre de 2022, en este tiempo, no se presentó cambios en la concentración, sin embargo, para realizar el proceso de biorremediación, la concentración inicial fue de 77.860 mg/L; la **figura 4.20** nos indica que la concentración del colorante disminuye gradualmente con el tiempo, esto explica, que al igual que en el proceso de ozonación, la concentración y el tiempo son directamente proporcionales.

Al agregar 1.0 gramos de biomasa al tercer biorreactor se logró una remoción del colorante casi total (94%), demostrando así que, la microalga *Chlorella vulgaris* tiene la capacidad de remover concentraciones de hasta casi 80 mg/L del agua.

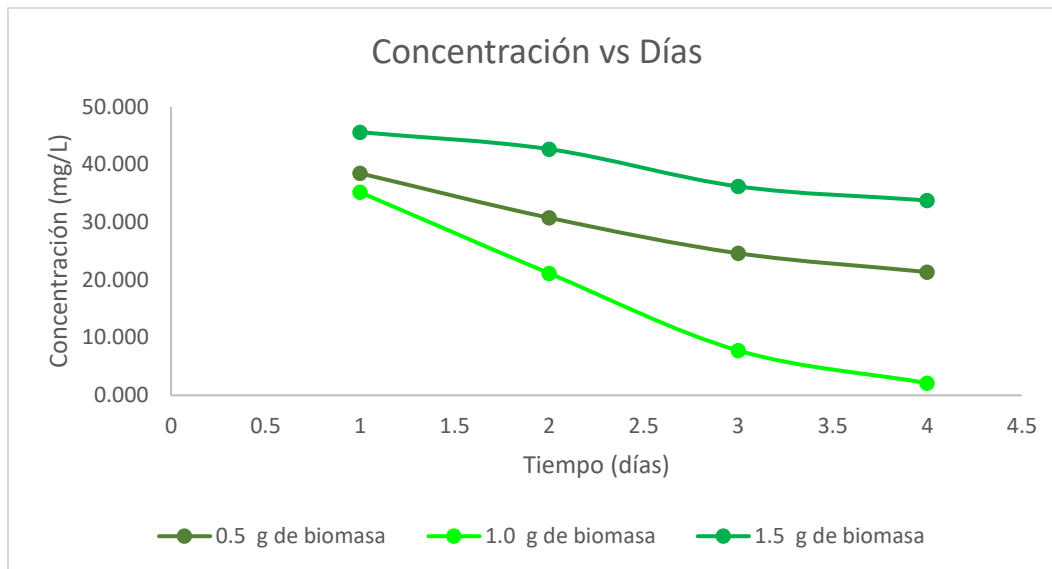


Figura 4.20. Remoción del colorante a través de los días de experimentación.

Debido a que el pH en este experimento fue ácido, se observó que la microalga tuvo una muerte rápida y que su crecimiento fue casi nulo; esto se pudo deber principalmente a que, en un ambiente ácido, los protones en el agua se unen a los grupos de átomos cargados negativamente en las proteínas de la microalga, alterando así su conformación, la función de enzimas y otras proteínas encargadas de los procesos metabólicos y por consiguiente el crecimiento celular, ya que, se inhibe su capacidad de producir clorofila y de realizar correctamente su proceso de fotosíntesis, procesos químicos esenciales para su supervivencia. Sin embargo, al observar a la microalga al microscopio, no se encontraron deformaciones en su estructura, **figura 4.23.** (Tristán, 2012).

Además, la luz UV hizo que se presentaran cambios en la concentración del colorante; esto porque la luz UV es capaz de romper y oxidar los enlaces químicos, lo que altera la estructura molecular del colorante (**figura 4.21**).

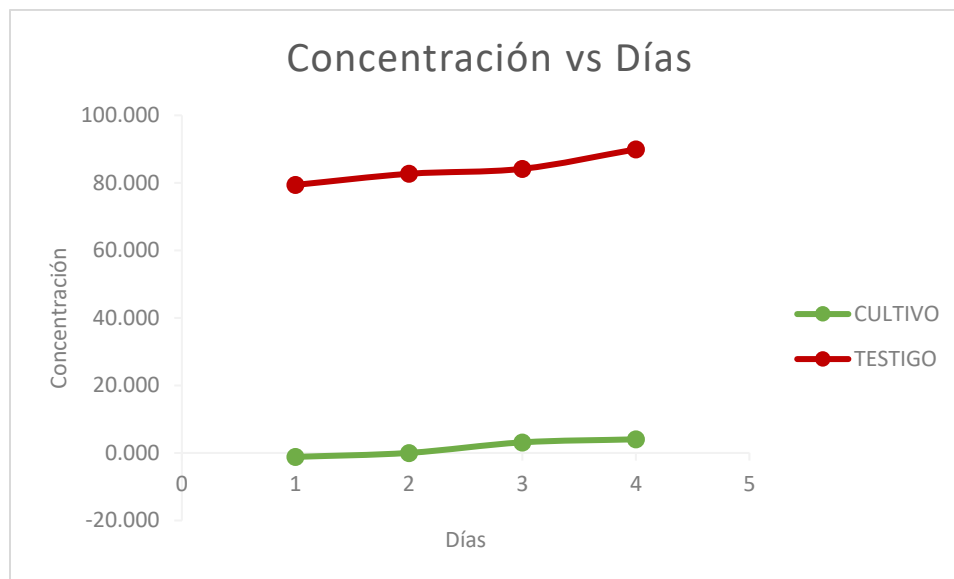


Figura 4.21. Concentración del colorante ante la luz UV y el crecimiento del alga dentro del biorreactor de cultivo, en el segundo experimento.

Finalmente, aunque la acidez o alcalinidad de la solución tenga un ligero vire, se obtiene una buena remoción. En la **figura 4.23** se observa como la célula adsorbió el colorante en su pared celular.

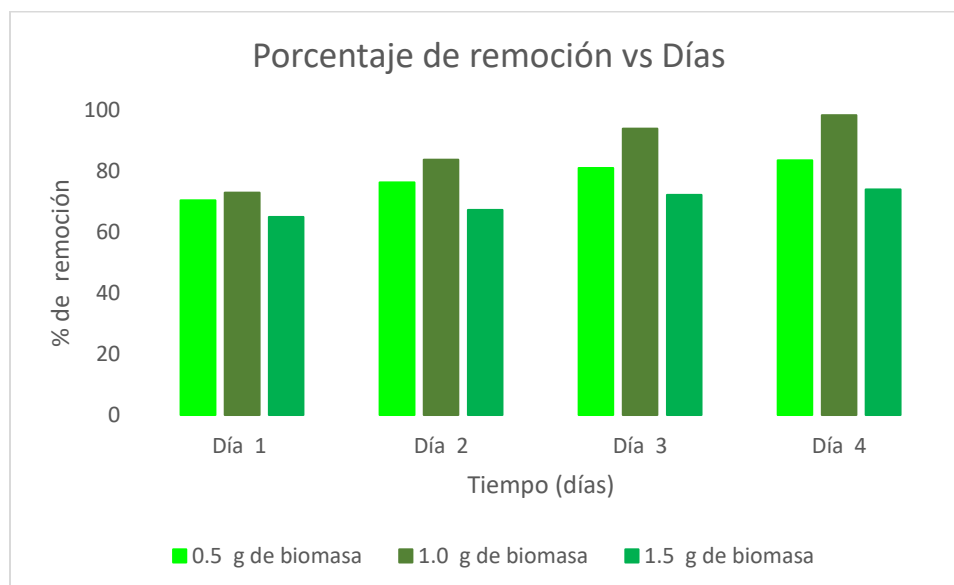


Figura 4.22. Remoción del colorante en el segundo experimento.

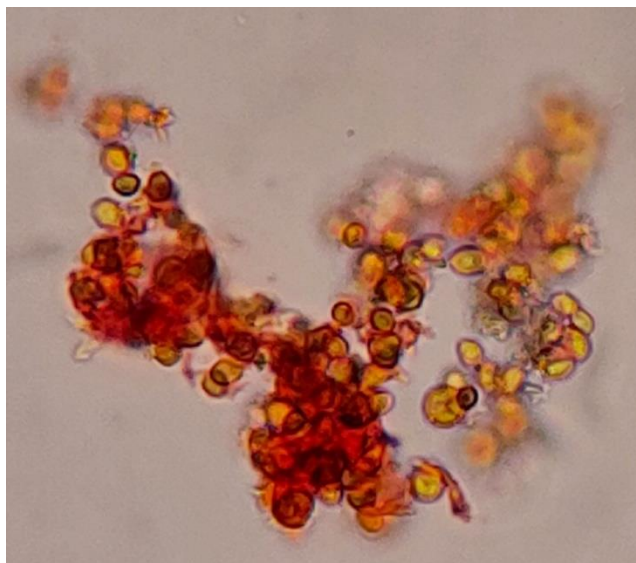


Figura 4.23. Morfología de la microalga en presencia del colorante durante el segundo experimento.

c) Tercer experimento

En este ensayo de igual forma se trabajó con un pH ácido, el cual fue de 5.41, esto para confirmar si el alga sufría grandes cambios con un pH ácido. Para este experimento se utilizaron los residuos del quinto ensayo de ozonación, en el cual, la concentración final fue de 44.144 mg/L, la concentración para el proceso de biorremediación se ajustó en 45.293 mg/L. En la **figura 4.24**, se observa que este experimento arrojó resultados muy favorables, ya que, dos ensayos obtuvieron más del 95% de remoción del colorante, con ello, podemos afirmar que la microalga es capaz de eliminar en su totalidad al colorante cuando la concentración inicial de este no supera los 50 mg/L.

Los valores de concentración medidos para el biorreactor que contenía 1.5 gramos de biomasa fueron negativos. Esto pudo deberse a diversos factores como:

- La falta de nutrientes en el medio de cultivo del que fue tomada la biomasa.
- La presencia de una concentración alta de colorante dentro del biorreactor, provocando que se inhiba el crecimiento de la microalga.
- Estrés ambiental debido a la exposición de la microalga al alto valor de pH, además de ser un pH que no es adecuado o tolerable por *Chlorella vulgaris*.
- Finalmente, pudo deberse por una mala aireación o por falta de luz, afectando en el crecimiento y viabilidad de las células. (Abalde, 1995).

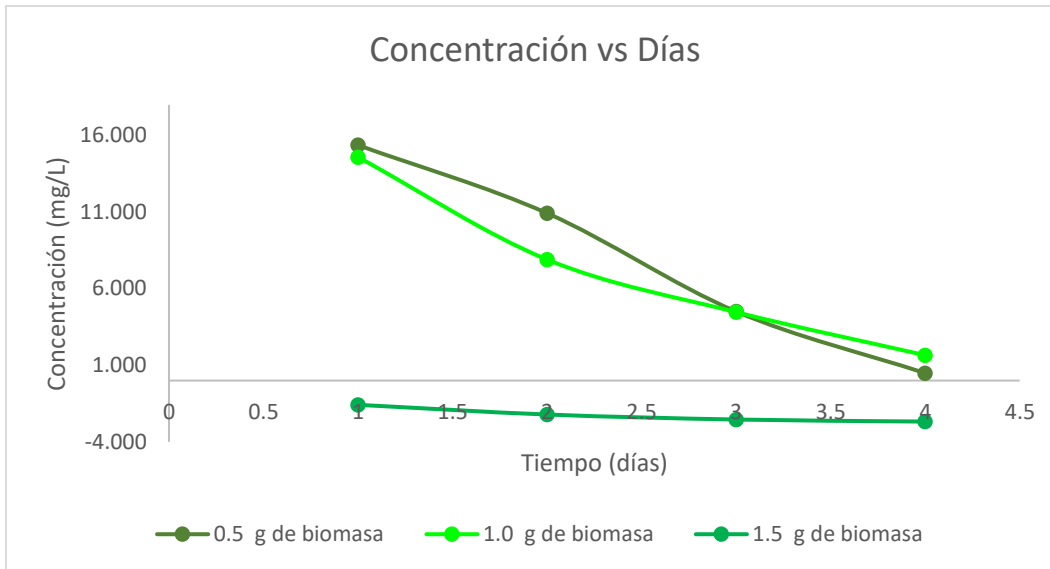


Figura 4.24. Concentración del colorante en el tercer experimento.

Por otro lado, la influencia de la luz UV (**Figura 4.25**) en el colorante es mucho más notable que en el experimento anterior, esto debido a que, al momento de la preparación del colorante, este estuvo expuesto más de 4 horas a la luz natural, (el sol), agregado a esto, la luz UV de las lámparas fue expuesta durante más tiempo.

Sin embargo, al comparar el comportamiento de la microalga en el experimento anterior, en este tercer experimento podemos observar que la microalga se mantuvo viva y aunque su crecimiento fue mínimo, se ve, que siempre mantuvo su crecimiento constante.

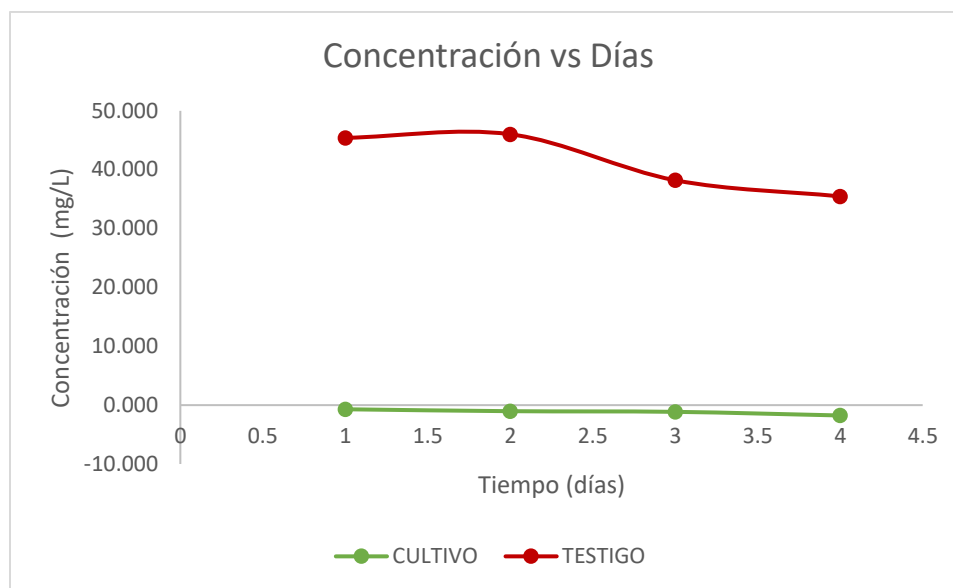


Figura 4.25. Concentración del colorante en presencia de luz UV, crecimiento de la microalga en el tercer experimento.

La remoción del colorante fue constante, sin embargo, se puede analizar que, para este cuarto experimento, una cantidad de 1.0 gramo de microalga elimina mejor al colorante que una cantidad de 1.5 gramos; esto pudo deberse a diversos factores, como:

- a) La microalga tuvo mejor superficie (área del reactor) para realizar la remoción en el biorreactor con 1.0 gramo de biomasa.
- b) La asimilación de nutrientes en el biorreactor con 1.0 gramos de biomasa fue mejor, lo que provocó una buena degradación del colorante.
- c) La luz absorbida para realizar el proceso de fotosíntesis en el reactor con 1.0 gramos de biomasa fue la necesaria, lo que generó un entorno óptimo para el metabolismo y crecimiento.
- d) La microalga en el reactor de 1.0 gramos de biomasa, asimiló mejor el pH ácido, favoreciendo a la descomposición y por tanto a la eliminación del colorante. (Tristán, 2012).

Por lo tanto, la cantidad de 1.0 gramos de biomasa tuvo un efecto significativo en la eliminación del colorante Rojo Congo, observando así, en la **figura 4.26**, una alta eficiencia en la asimilación y eliminación de este.

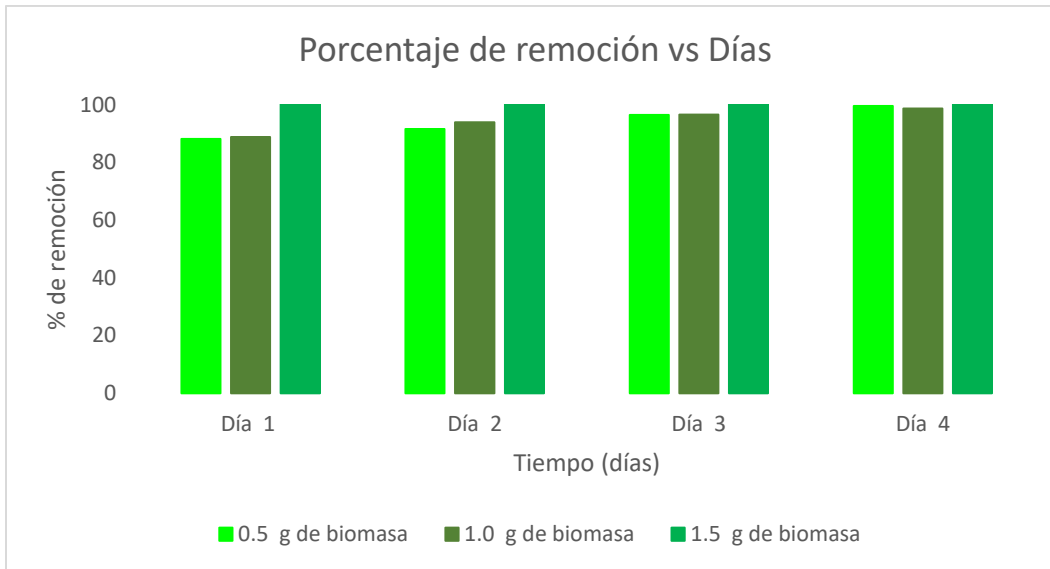


Figura 4.26. % de remoción del colorante Rojo Congo.

En la figura 4.27 se observa la estructura de la microalga en presencia del colorante rojo Congo, en esta, se puede percibir que la célula no sufre ninguna alteración.

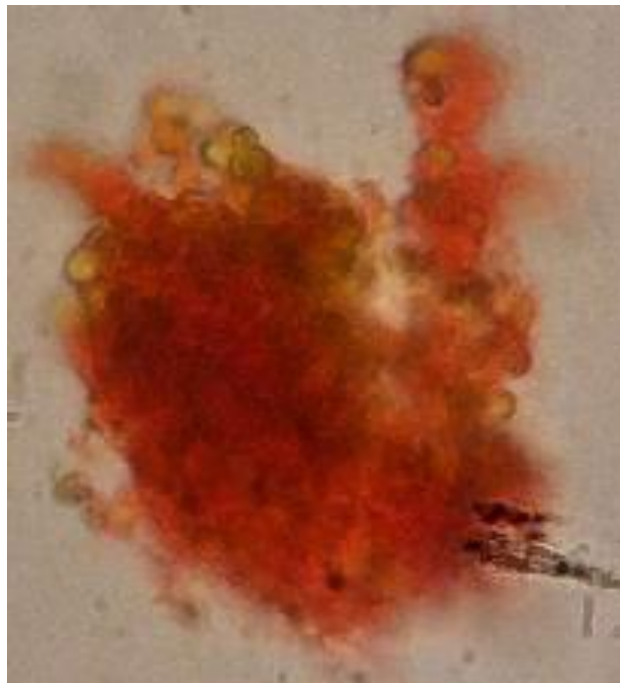


Figura 4.27. Estructura de la microalga en presencia del colorante rojo Congo en el tercer experimento.

d) Cuarto experimento

Se utilizaron los desechos del cuarto ensayo de ozonación, en el cual, la concentración final fue de 33.511 mg/L, para este experimento se ajustó la concentración a 33.914 mg/L. Los residuos estuvieron guardados del 02 de septiembre de 2022 hasta el 07 de noviembre de 2022, cuando se midió la concentración para trabajar con esta solución, este valor no había cambiado, únicamente con fines experimentales se agregaron 0.403 gramos más de colorante, ya que se iba a ajustar el pH de diferente forma en el colorante y en la microalga. Para la solución de colorante se ajustó el pH en 6.17 y el pH de la microalga se ajustó en un pH 9.33; como se observa en la **figura 4.28**, la microalga *Chlorella* tiene la capacidad de regular el pH del medio en que se encuentra debido a su metabolismo fotosintético, ya que, durante este proceso la microalga produce oxígeno y consume dióxido de carbono, esto provoca que al consumir dióxido de carbono la microalga ayuda a equilibrar el medio en cual se encuentra, manteniendo así sus niveles óptimos para su crecimiento y desarrollo; agregado a esto, esta microalga tiene la capacidad de secretar bicarbonato, lo cual también contribuye a regular el pH en su entorno (Hernández, 2012)

Por lo descrito anteriormente, es posible trabajar con soluciones ácidas, siempre y cuando el medio donde se encuentre la microalga *Chlorella vulgaris* sea básico.

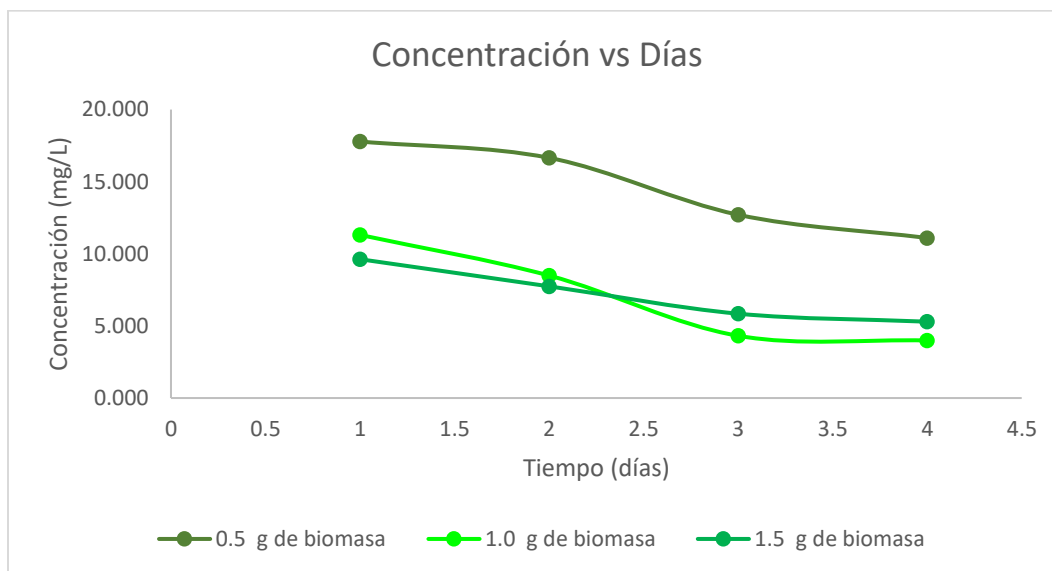


Figura 4.28. Concentración del colorante a lo largo de los días, en el cuarto ensayo.

En la figura anterior, se cumple la proporción en la que la concentración depende del tiempo, así mismo, 1.0 gramos de biomasa sigue siendo la mejor opción para eliminar este colorante del agua.

La luz UV no tuvo influencia en este experimento, con lo cual se puede concluir que, cuando se trabaja con pH ácido, la luz UV tiene gran influencia en el colorante y cuando se trabaja bajo condiciones básicas, la luz UV no tiene gran influencia. **Figura 4.29.** Además, el crecimiento del cultivo fue constante, indicando una vez más, que el crecimiento de la microalga es mejor en condiciones alcalinas y básicas.

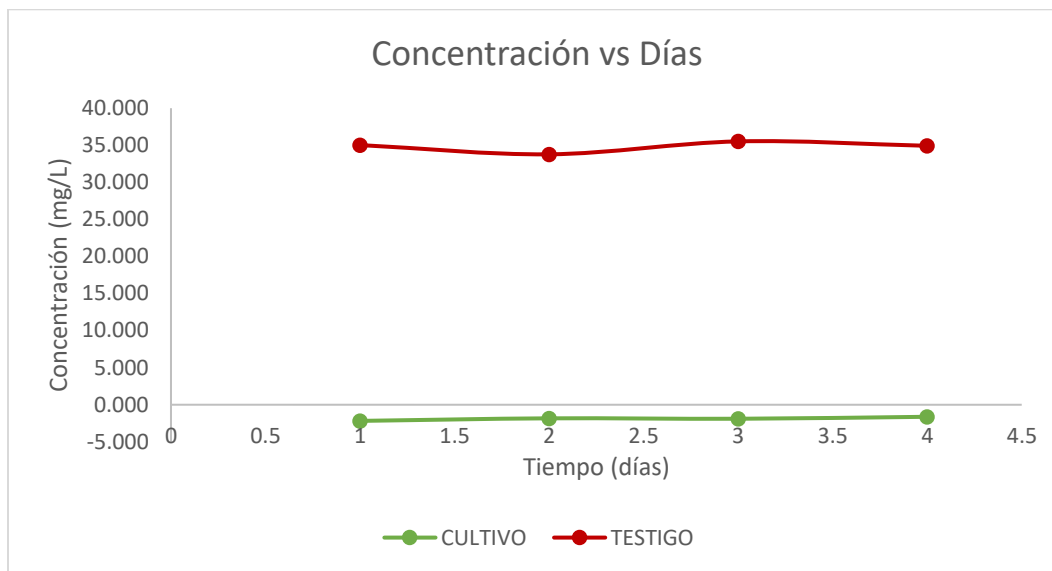


Figura 4.29. Influencia de la luz UV sobre el colorante y crecimiento del alga en el cuarto experimento.

Al comparar el primer experimento de biorremediación con el cuarto experimento, se infiere que, un pH básico en este proceso hace que se obtengan resultados favorables, en la **figura 4.30**, la concentración del colorante es constante y disminuye gradualmente conforme pasaron los días de la semana.

En la **figura 4.31**, se observa que la estructura de la microalga estuvo intacta y se aprecia como se retiene el colorante en la pared celular de la microalga.

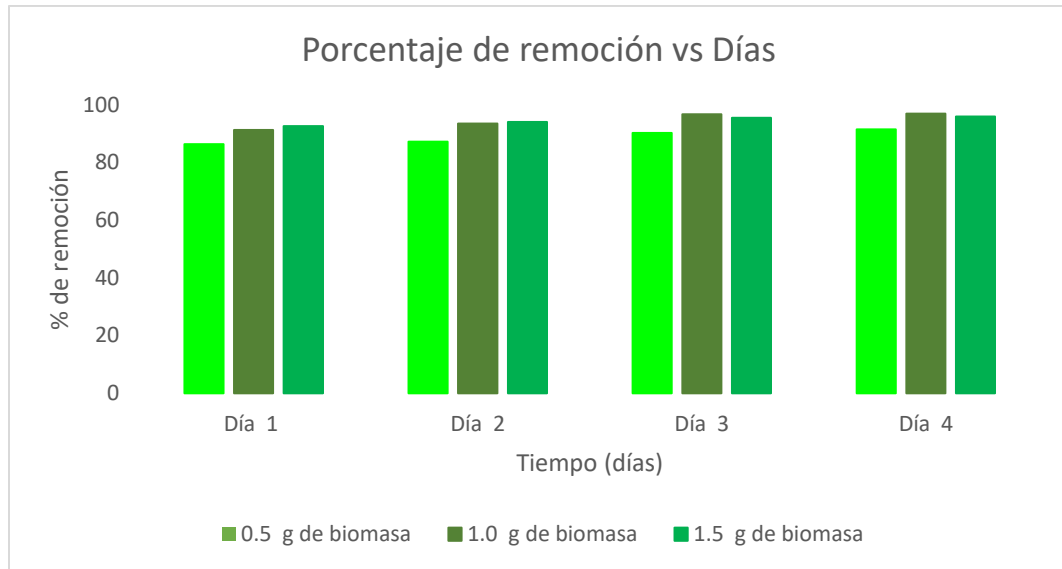


Figura 4.30. Remoción del colorante en el cuarto experimento.

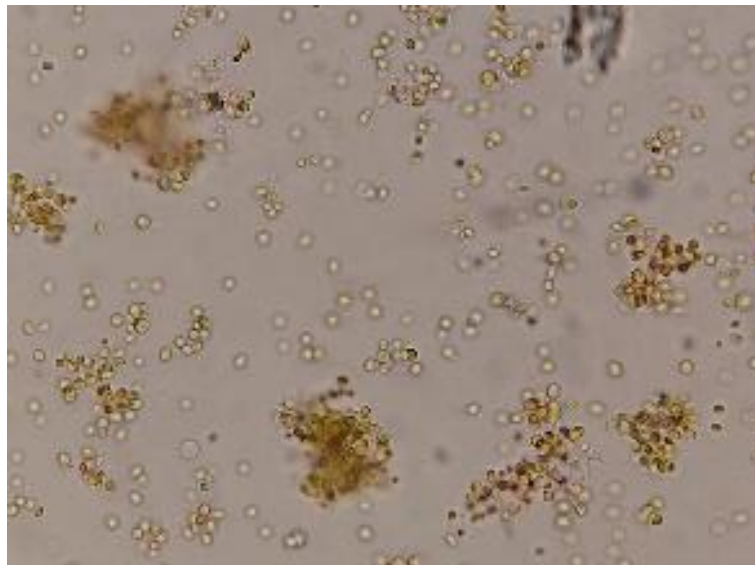


Figura 4.31. Microalga en el proceso de remoción del colorante en el cuarto experimento.

En resumen, durante los cuatro ensayos, aunque las condiciones se modificaron, para trabajar con colorante rojo Congo las condiciones que mejor dieron resultado son:

- a) Concentraciones de colorante no mayores a 150 mg/L, esto para eliminar al colorante casi por completo.
- b) Soluciones con pH básico, lo cual permite un mejor desarrollo de la microalga.

- c) Evitar la exposición del colorante a la luz por más de 4 horas antes de llevar las soluciones al tratamiento.

Al comparar el porcentaje **tabla 4.22** de remoción de los experimentos en donde se agregó 0.5 gramos de biomasa, se observa que el tercer experimento arroja los mejores resultados, las condiciones de este ensayo nos indican que se debe trabajar con microalga *Chlorella vulgaris* con pH ácido en la solución del colorante, pero, que el cultivo de microalga debe poseer un pH alcalino. Así mismo, un gramo de biomasa puede ser suficiente para tratar concentraciones de colorante que no superen los 80 g/mL de concentración de colorante. Por último, el tercer experimento presenta los mejores porcentajes de remoción del colorante, significando que esta microalga es adecuada cuando se trabaja a pH 5.0, con una concentración de 45 mg/L de colorante.

Tabla 4.22. Porcentajes de remoción obtenidos.

No. Experimento	[0.5] (g) de biomasa	[1.0] (g) de biomasa	[1.5] (g) de biomasa
1°	8.329 %	13.707 %	6.259 %
2°	36.000 %	93.996 %	25.921 %
3°	70.671 %	88.664 %	100.00 %
4°	28.546 %	64.712 %	44.993 %

Como se describió en la metodología, para separar la biomasa del alga en un medio acuoso sin afectarla, se utilizó el método de coagulación, usando el biocoagulante “quitosano”, **figura 4.32**. Por ello, para determinar si este biopolímero tiene influencia en la eliminación del colorante en el proceso de biorremediación, se agregó en un biorreactor 400 ml de colorante rojo Congo con una concentración de 45.910 mg/L y un pH 9.49, además se agregaron 6 ml de Quitosano al 10% de Ácido acético y finalmente se midió la concentración del colorante.



Figura 4.32. Microalga *Chlorella vulgaris* con quitosano.

En la **tabla 4.23**, se observan los valores arrojados para la medición de la concentración del colorante con quitosano, también, los valores medidos de pH cada día a lo largo de la experimentación.

El valor de pH se modifica ligeramente al paso de los días, sin embargo, esto no se debe a la influencia del quitosano, sino, al proceso de fotosíntesis que realiza la microalga, ya que, este proceso implica la conversión de dióxido de carbono y agua en glucosa y oxígeno de la luz solar (en este caso, la luz de las lámparas), durante el proceso se libera una gran cantidad de oxígeno en el ambiente, lo cual disminuye la concentración de dióxido de carbono y aumenta la concentración de oxígeno, por consiguiente se produce una disminución en la concentración de protones en el ambiente aumentando así el pH (González, 2018).

Por otro lado, la concentración tuvo ligeras variaciones y los cambios fueron muy inconstantes, indicando que las variaciones se debieron principalmente a la mala limpieza de la celda de vidrio utilizada para medir la absorbancia en el espectrofotómetro y no a la influencia del quitosano en la muestra. Aunque en concentraciones más altas de quitosano, podría acidificar el medio debido a la liberación de protones por parte del polímero y tendría un efecto negativo en la supervivencia y el crecimiento de las células de *Chlorella vulgaris*, especialmente si el pH se vuelve demasiado ácido, esta experimentación se realizó con una concentración muy baja de este biopolímero, por lo tanto, no hubo influencia en el proceso

Tabla 4.23. Concentración y pH de las soluciones con quitosano.

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
pH	7.64	7.63	8.47	8.45	8.64
Concentración mg/L	45.91	40.35	43.79	47.26	48.16

MODELO CINÉTICO DE LA MICROALGA *CHLORELLA VULGARIS*

Para realizar el estudio de la rapidez de reacción de la remoción del colorante rojo Congo a través de microalga *Chlorella vulgaris*, se midió la absorbancia de la remoción del colorante, durante el proceso de biorremediación, para obtener la concentración del colorante en función del tiempo de reacción.

Químicamente no se ha encontrado una reacción que describa la reacción de la microalga *Chlorella vulgaris* con el colorante rojo Congo; biológicamente, esta microalga tiene la capacidad de adsorber o fijar al colorante en su superficie celular, a esta capacidad se le denomina **biosorción**, esto ocurre cuando existe presencia de carboxilos, hidroxilos y grupos amínicos en la superficie de la celular de la microalga **figura 4.33** (San Miguel,2015).



Figura 4.33. Biosorción de microalga, teñida de colorante rojo Congo, tras la remoción del colorante.

Tabla 4.24. Orden de reacción de los ensayos realizados.

No. Experimento	Día	Concentración del colorante (mg/L)	pH del medio	[0.5] (g)	[1.0] (g)	[1.5] (g)	Orden de reacción
1° pH Básico	Martes	130.43	9.11	2.25	2.31	2.11	PRIMER ORDEN
	Miércoles			2.14	2.19	2.08	
	Jueves			2.13	2.16	2.06	
	Viernes			2.07	2.00	1.99	
	% de Remoción			8.32	13.70	6.25	
2° pH Ácido	Martes	77.86	5.57	0.72	0.66	0.84	PRIMER ORDEN
	Miércoles			0.58	0.42	0.79	
	Jueves			0.48	0.18	0.68	
	Viernes			0.42	0.09	0.64	
	% de Remoción			36.00	93.99	25.92	
3° pH Ácido	Martes	45.29	5.27	0.32	0.30	0.02	PRIMER ORDEN
	Miércoles			0.24	0.19	0.01	
	Jueves			0.13	0.13	0.00	
	Viernes			0.06	0.08	0.00	
	% de Remoción			70.67	88.66	100.00	
4° pH Ácido	Martes	33.91	6.17	0.36	0.25	0.22	PRIMER ORDEN
	Miércoles			0.34	0.20	0.18	
	Jueves			0.27	0.12	0.15	
	Viernes			0.24	0.12	0.14	
	% de Remoción			28.54	64.71	44.99	

Este orden de reacción lo siguen todos los ensayos realizados, **tabla 4.24**, por lo que se puede concluir que para la remoción de colorante rojo Congo con microalga *Chlorella vulgaris* el orden de reacción es de uno.

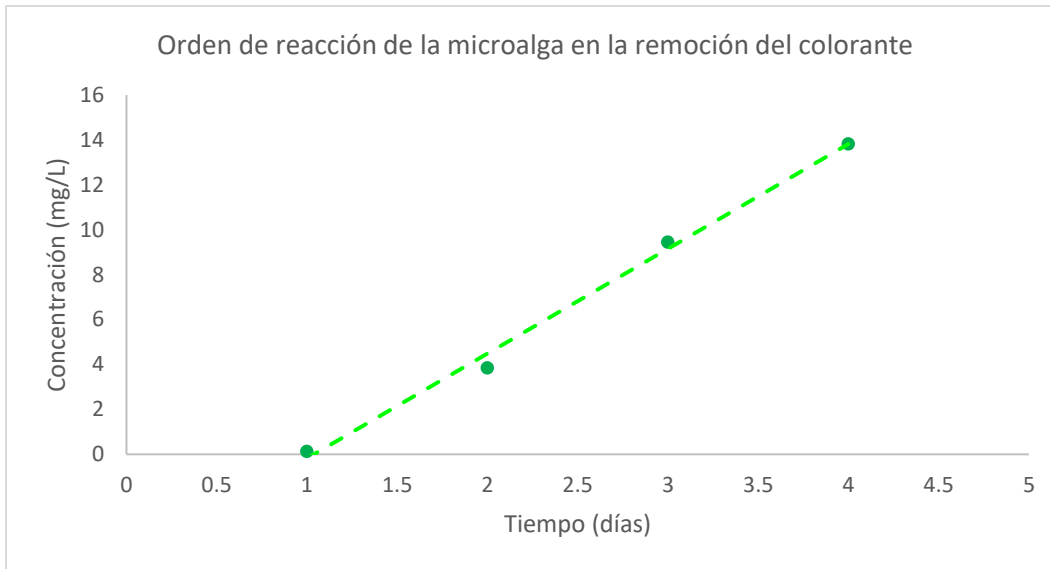


Figura 4.34. Cinética de la reacción de la microalga *Chlorella vulgaris* con el colorante rojo Congo en el primer ensayo.

En la figura anterior se analizan el ensayo de biorremediación con microalga *Chlorella vulgaris*, en un ensayo alcalino, porque es la condición óptima para la remoción y el crecimiento de la microalga.

En esta, se puede observar que el ensayo sigue una cinética de primer orden, ya que, la velocidad de reacción del colorante rojo Congo depende directamente de la concentración molar inicial del pigmento.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se logró cumplir con los objetivos planteados:

1. Determinar la eficiencia del proceso de ozonación en la remoción de un colorante tipo azo, siendo este proceso una alternativa viable.
2. Se establecieron las condiciones óptimas de operación lo que permitió un excelente porcentaje de remoción.
3. Incorporar las variables como tiempo de contacto, concentración inicial de la solución, pH y cantidad de ozono suministrado al reactor, que ayudaron a un buen desempeño del proceso.
4. Se estableció que el modelo cinético del proceso de ozonación es de primer orden.
5. El proceso de ozonación, se puede aplicar como pretratamiento a un proceso biológico, garantizando excelente remoción sin afectar el proceso biológico.
6. La combinación de un proceso de oxidación avanzada y la de un proceso biológico son una excelente herramienta viable y prometedora para la remoción de colorantes del tipo azo provenientes de la industria textil.

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES

- **Metodológicas:**

Si se desea hacer estudios posteriores abordando el tema de la eliminación de colorante rojo Congo, a través del método de oxidación avanzada “ozonación” empleando una metodología similar o en su caso diferente, se sugiere:

1. Realizar el tratamiento usado peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ya que esto hará la técnica aún más eficiente, debido a que el poder oxidativo será aún mayor.
2. Hacer disoluciones con concentraciones aún mayores para determinar en qué momento del proceso de ozonación el colorante alcanza el equilibrio químico, lo cual ayudaría en el análisis del comportamiento del colorante.
3. Aplicar un análisis cualitativo, es decir, poder identificar los productos formados a lo largo del proceso de ozonación, dentro del reactor de contacto de burbuja, para establecer si los productos que se van formando son más o menos tóxicos, si el producto final del proceso de ozonación puede ser desechado al alcantarillado sin que este sea peligroso para el medio ambiente y para determinar si los productos formados no reaccionan con otros si se desea aplicar un proceso para tratar los residuos del proceso de ozonación.
4. Utilizar otros colorantes azoderivados, los cuales puedan estar presentes en las aguas residuales, que puedan considerarse tóxicos para el ambiente y para los seres vivos.

Finalmente, es recomendable seguir estudiando los colorantes azoicos, ya que, están presentes en más del 90% de las cosas que utilizamos día con día. Además, con la situación actual sobre la crisis del agua que se está viviendo, es importante buscar alternativas que ayuden en el tratamiento de las aguas residuales, los cuales no produzcan más residuos para así evitar seguir contaminando.

Referencias bibliográficas

1. Aguilar, O., Hernández, C., & Gómez, R. (2010). Remoción de colorantes de efluentes de la industria textil. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana.
2. Allinger., Cava., Jongh., Johnson., Lebel & Stevens. (1971).
3. Aragón, D., & Garzón, M. (2020). Tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes utilizados en la industria textil mediante un proceso combinado de oxidación avanzada y un proceso biológico. Recuperado el 20 de marzo de 2023 de la base de datos de SIPAL.
4. Bachiller, L. (2021). El impacto de la industria textil sobre el agua. Recuperado el 20 de enero de 2023, de <https://www.iagua.es/blogs/laura-bachiller-soria/impacto-industria-textil-agua-1>
5. Bes Monge., Silva & Bengoa. (2016).
6. Calderón, D., Hernández, J., García, E., Rodríguez, R., & Osnaya, G. (2000). El ozono como molécula reactiva. Concepto actual. Medigraphic, 14: 115-123. Recuperado el 06 de mayo de 2023, de <https://www.medigraphic.com/pdfs/inper/ip-2000/ip002f.pdf>
7. Chicón, L. (2017). Ozono atmosférico. Recuperado el 12 de febrero de 2023 de la base de datos de CCH-UNAM.
8. Colindres, P. (2006). Eliminación de colorantes textiles mediante oxidación con ozono. Tesis de maestría. Instituto politécnico Nacional.
9. Comisión nacional del agua. (2019). Usos del agua. Recuperado el 22 de abril de 2023 de la base de datos de CONAGUA.
10. Cortés, A., López, F., Marengo, M. & Tejeda, G. (2007). El agua virtual y la huella hídrica. Recuperado el 29 de enero de 2023 de la base de datos de la CONAGUA.
11. Díaz, D. (2017). Estructura de la bencidina. Recuperado el 23 de abril de 2023, de <https://www.clubensayos.com/Ciencia/Estructura-de-la-bencidina/3934268.html>
12. Galvín, R. (2018). Ensayos con ozono (De análisis de agua y Ensayos de Tratamiento). Recuperado el 07 de mayo de 2023, de http://www.elaguapotable.com/Ensayos%20con%20Ozono%20_R.pdf
13. García, L. (2018). Problemáticas económicas del agua en México. Desigualdad, fugas, costos y concesiones han puesto en jaque al acceso a este vital líquido. Recuperado el 20 de enero de 2023 de la base de datos de DGDC, UNAM.

14. García, Yolanda. (2023). ¡Aguas con la moda no sostenible! Recuperado el 20 de abril de 2023 de la base de datos de CCH.
15. Garza, E. (1996). Los radicales libres. Beneficios y problemas. Gac. Med. Vol.132,183- 207.
16. Gilabert, E. (2020). Química textil. Tomo I: materias textiles. Valencia: Universitat Politècnica de València.
17. Hatch, G. (2017). La guerra del agua México-Estados Unidos. El río conchos y el tratado Internacional de aguas de 1944. Gaceta, UNAM. Recuperado el 21 de enero de 2023 de <https://www.gaceta.unam.mx/la-guerra-del-agua-mexico-estados-unidos/>
18. Henríquez, P. (2021, 07 de Agosto). Huella hídrica de la moda [en línea]. Meteored sección Actualidad. Recuperado 21 de enero de 2023 de <https://www.meteored.cl/noticias/actualidad/huella-hidrica-de-la-moda-el-agua-que-no-vemos.html#:~:text=Seg%C3%BAn%20un%20informe%20redactado%20por,de%205%20millones%20de%20personas.>
19. Iborra, M., Tejero, J., & Cunill, F. (2013). Reactores multifásicos. Barcelona. ERQ.
20. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Colección de estudios sectoriales y regionales. Conociendo la industria textil y de la confección. México.
21. Instituto Nacional de Normalización Textil A.C. (2010). Normas mexicanas. México: Autor.
22. Instituto mexicano de tecnología del agua. (2023). Agua, sequía y cambio climático. México.
23. Jones, D. (2021, 08 de noviembre). Reino unido autoriza el vertido de aguas residuales ante la escasez de químicos para tratarlas [en línea]. El economista Sección Economía. Recuperado el 28 de mayo de 2023, de <https://www.eleconomista.es/economia/noticias/11383819/09/21/Reino-Unido-autoriza-el-vertido-de-aguas-residuales-ante-la-escasez-de-quimicos-para-tratarlas.html>
24. Juárez, E. (2007). ¿Qué es el ozono? Recuperado el 06 de mayo de 2023, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/martinez_e_fl/capitulo2.pdf
25. Kai Ru., Yik Sung., Jurosh & Wihid. (2020). Chlorella vulgaris: una perspectiva sobre su potencial para combinar alta biomasa con bioproductos de alto valor. Ficológia aplicada, 1:1,2-11, DOI: 10.1080/26388081.2020.1715256

26. León, S. (2020). Los combustibles [en línea]. Junta de Castilla y León Sección Energía y minería. Recuperado el 17 de abril de 2023 de [https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustibles.html#:~:text=Combustibles%20gaseosos%3A%20hidrocarburos%20\(metano%2C,vegetal\)%2C%20coque%20y%20biomasa.](https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustibles.html#:~:text=Combustibles%20gaseosos%3A%20hidrocarburos%20(metano%2C,vegetal)%2C%20coque%20y%20biomasa.)
27. Lugo, G. (2022). Insuficiente, la inversión para conservar el agua. Gaceta, UNAM. Recuperado el 21 de enero de 2023 de <https://www.gaceta.unam.mx/insuficiente-la-inversion-para-conservar-el-agua/#:~:text=Las%20principales%20problem%C3%A1ticas%20asociadas,falta%20de%20ordenamiento%20y%20sobreexplotaci%C3%B3n.>
28. Maguey, H. (2018). Más de 80% del agua se va en uso agrícola y de la industria. Gaceta, UNAM. Recuperado el 21 de enero de 2023 de <https://www.gaceta.unam.mx/industria/#:~:text=La%20industria%20de%20producci%C3%B3n%20y,por%20100%20millones%20de%20habitantes.>
29. Martínez, S. (2021). Descomposición del ozono. Recuperado el 04 de mayo de 2023 de la base de datos de LENNTECH.
30. Martins, M., Salla, M., Marques, C., Moura, A., & Bolaños, M. (2020). Influencia de los catalizadores en la ozonización de aguas residual sintética. Revista internacional de contaminación ambiental, vol. 37, 53786, 2021. Recuperado el 19 abril de 2023, de <https://www.redalyc.org/journal/370/37072384022/html/>
31. Medina, A. (2013). ¿Qué cantidad de agua hace falta para fabricar ropa? [en línea]. Expansión Sección Empresas. Recuperado el 22 de febrero de 2023 de <https://www.expansion.com/2013/04/25/empresas/distribucion/1366907722.html>
32. Medina, A. (2019). La industria de la moda se adapta al cambio climático [en línea]. Expansión Sección Distribución y consumo. Recuperado el 22 de abril de 2023 de <https://www.expansion.com/empresas/distribucion/2019/04/15/5cb3668aca474138128b45ea.html>
33. Meneses, D. (2016). Desinfección con ozono. Recuperado el 04 de mayo de 2023 de la base de datos de IPN.
34. Morales, P. (2011). El coeficiente de correlación. Universidad Rafael Landívar, Guatemala. Recuperado el 29 de abril de 2023, de https://ice.unizar.es/sites/ice.unizar.es/files/users/leteo/materiales/01_documento_1_correlaciones.pdf

35. New Jersey Department of Health. (2007). Hoja Informativa sobre sustancias peligrosas. 12-19.
36. Osorio, F., Torres, J., & Sánchez, M. (2010). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes. Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Recuperado el 20 de enero de 2023. De https://books.google.com.mx/books?id=ukWBiJ8V1yEC&printsec=frontcover&dq=TECNICAS+DE+TRATAMIENTO+DE+AGUA+RESIDUAL&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=TECNICAS%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20RESIDUAL&f=false
37. Pacheco, O., & Cabal, V. (2019). Análisis del espectro de absorción de luz visible en rojo Congo y relación con la concentración [en línea]. Recuperado el 24 de abril de 2023 de la base de datos de la universidad Santiago de Cali, Colombia.
38. Patiño, V., Arroyave, S., & Marín, J. (2012) Oxidación electroquímica y ozonización aplicadas al tratamiento de agua de lavado de la producción de biodiesel [en línea]. Vol.23(2), 41-52. Recuperado el 02 de febrero de 2023, de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v23n2/art06.pdf>
39. Potro, V. (2020). Generadores de ozono/ Ozonificadores de agua. Recuperado el 18 de abril de 2023 de la base de datos de DROPFLU- Ingeniería en purificación de agua.
40. Qobilov, R. (2015). Cómo la industria soviética del algodón se bebió un mar entero. Recuperado el 20 de febrero de 2023 de la base de datos BBC.
41. Quesada, S. (2007). Manual de experimentos de laboratorio para Bioquímica. Recuperado el 22 de abril de 2023, de https://books.google.com.mx/books?id=8SAtkthrFEkC&pg=PR23&dq=que+es+la+longitud+de+onda+en+espectrofotometria&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi_-t5rX7AhWbKEQIHdFyCigQ6AF6BAqJEA#v=onepage&q=que%20es%20la%20longitud%20de%20onda%20en%20espectrofotometria&f=true
42. Quirós, F. (2005). Tratamiento de desinfección del agua potable. Chile, Canaleduca. Recuperado el 22 de enero de 2023, de <https://www.fundacioncanal.com/canaleduca/wp-content/uploads/2015/08/Tratamiento-de-desinfeccion-del-agua-potable2.pdf>
43. Ramalho, S. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona, España. Recuperado el 22 de enero de 2023, de

- https://books.google.com.mx/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=frontcover&dq=aguas+residuales&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=aguas%20residuales&f=false
44. Reyes, J., & Walton, H. (2005). Análisis químico e instrumental moderno. New York: Reverté.
 45. Robledo, R. (2020). Desinfectar con ozono. Vol.2, 54-64.
 46. Roca, A. (2015). Estudio cinético de la descomposición catalítica de ozono. Tesis de licenciatura. Universidad politécnica de Valencia.
 47. Rosal, R. (2019). Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Capítulo 51: Ozonización. Recuperado el 11 de abril de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Rosal/publication/330144584_Ozonizacion/links/5c4ef574458515a4c745dfaf/Ozonizacion.pdf
 48. Roth. (2022). Ficha de datos de seguridad del rojo Congo. Alemania.
 49. Ruiz, P. (2003). El agua. Recuperado el 02 de febrero de 2023 de la base de datos de la SEMARNAT.
 50. Sáenz, E. (2013). Tipos de reactores de ozonólisis. 47-50. Recuperado el 22 de enero de 2023 de la base de datos de LIBRARY.
 51. Sandoval, L. (2006). Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria textil. Recuperado el 20 de marzo de 2023 de la base de datos de SEMARNAT.
 52. Secretaría de desarrollo social. (1994, Enero), Gaceta ecológica. SEDESOL, Volumen VI, número 27. Recuperado el 08 de junio de 2023, de <https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/gacetas/GE27.pdf>
 53. Secretaría de gobernación. (1986). Colorantes permitidos para la comercialización en México. México: Autor.
 54. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. (2014). Agua-Calidad- México. Recuperado el 21 de abril de 2023.
 55. Sierra, I., Pérez, D., Gómez, S., & Morante, S. (2010). Análisis instrumental. Algunas herramientas de enseñanza-aprendizaje adaptadas al Espacio Europeo de Educación superior. España, netbibio. Recuperado el 02 de febrero de 2023, de <https://books.google.com.mx/books?id=7kqqf47xB1cC&pg=PA47&dq=ley+de+lambert+beer&hl=es->

- 419&sa=X&ved=2ahUKEwjZvs6a7LX7AhXSK0QIHcf8DGQQ6AF6BAgBEAI#v=onepage&q=ley%20de%20lambert%20beer&f=true
56. Solá, A. (2014, noviembre). Tensioactivos en la industria textil. Revista tecnología, vol. 3 N° 3, 138-151.
 57. Suarez, B. (2021). Tolerancia de los humanos al ozono. Recuperado el 04 de mayo de 2023 de la base de datos de LENNTECH.
 58. Timboe, I., Canuto, J. (2019). Informe de políticas de la ONU-AGUA sobre el cambio climático y el agua. Suiza: Sweden.
 59. Universidad Nacional Autónoma de México. (2020). El espectro electromagnético. México. Recuperado el 16 de febrero de 2023 de la base de datos de la facultad de química UNAM.
 60. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Cuautitlán. (2021). Colores para laboratorios de ciencias básicas. México.
 61. Valderrama, J. (2003). Información tecnológica para la determinación de OH. España, Centro de información tecnológica. Recuperado el 06 de febrero de 2023, de https://books.google.com.mx/books?id=S62Rp6zzr0QC&pg=PA15&dq=metodos+para+determinar+la+concentracion+de+OH+durante+el+proceso+de+ozonacion&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjVluCuzeH_AhXJO0QIHZnFDZgQ6AF6BAgHEAI#v=onepage&q&f=true
 62. Victoria, A. (2022). Día mundial del agua: ¿Cuánta agua hay en México y sus estados? [en línea]. El líder Sección Economía. Recuperado el 22 de enero de 2023 de <https://www.liderempresarial.com/dia-mundial-del-agua-cuanta-agua-hay-en-mexico-y-sus-estados/>
 63. Vilaclara, G. (2019). Agua y Biodiversidad. Ciclo de conferencias “El saber del agua”: El agua y la vida. Recuperado el 22 de enero de 2023 de la base de datos de FES-IZTACALA.
 64. Vilaseca, M., Grimau, V., Bouzán, C., & Crespi, M. (2015). Métodos de eliminación del color en efluente de tintura textil. Catalunya, España. Recuperado el 18 de febrero de 2023, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28332/Vilaseca,+Merc%E8.+M%E9todos+de+eliminaci%F3n+del+color+en+efluentes+de+tintura+textil.pdf?sequence=3>

65. Villalba, C., Bosio, E., Castro, G., & Guida, J. (2014). Estudio espectroscópico de las interacciones del rojo Congo en su matriz de alginato y caboximetil goma guar. *Revista the Journal of Argentine Chemical Society*, 52-56.