



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Oxidación de colorantes presentes en aguas residuales de la
industria textil mediante el proceso de ozonización**

Tesis para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

CARLENI SARAI CASTELLANOS HENRIQUEZ

Ingeniera Químico Industrial

Director de Tesis:

JOSÉ APOLINAR CORTES

Dr. en Ciencias y Tecnología Ambiental

Co-Directora de Tesis:

Ma. DEL CARMEN CHÁVEZ PARGA

Dra. en Ciencias en Ingeniería Química

Morelia, Michoacán, agosto del 2023

RESUMEN

La industria textil utiliza 200 L agua por Kg de tela, en el proceso de tinción y lavado de fibras, en estos procesos se pierde un considerable porcentaje de colorantes, generando aguas residuales coloreadas, perjudiciales para los ecosistemas. En respuesta a esta problemática, se estudian nuevos procesos de tratamiento para la degradación de componentes recalcitrantes y/o coloreados, entre ellos, los procesos de oxidación avanzada, eficientes por la generación de intermediarios con alto poder oxidante capaces de destruir los grupos cromóforos de los colorantes. En esta investigación, se evaluó el proceso de oxidación avanzada con ozono (POA-O₃) para degradar el colorante directo Azul Ácido 9 (AA-9) y dos colorantes reactivos Remazol Amarillo RR GRAN (RA RR) y Procion Azul H-ERD (PA H-ERD) utilizados en la industria textil. Se utilizó un reactor de columna tipo batch, conectado a un sistema de ozonización con un medidor de potencia eléctrica y a un baño termostático para mantener la temperatura del sistema constante; el desarrollo de los experimentos para cada colorante se realizó con base en diseños ortogonales Taguchi L₈, considerando cuatro factores en dos niveles: masa inicial del colorante (20.16 mg y 41.58 mg), temperatura de reacción (25°C y 50°C), flujo volumétrico de la bomba de aire (74.01 L/h y 147.81 L/h) y el uso o no de empaque en el reactor. Se calcularon los porcentajes de remoción de color, las constantes cinéticas y el consumo eléctrico para cada prueba y se evaluó el coeficiente de transferencia de masa para el sistema gas-líquido. Los resultados muestran que, mediante el proceso de oxidación avanzada con ozono, es posible degradar el color con porcentajes superiores al 87.77% y tiempos de remoción que fluctúan entre 10 y 90 min. Las constantes cinéticas que se obtuvieron fueron de pseudo-primer orden y los mejores valores fueron, 0.3462 min⁻¹ para el AA-9, 0.0925 min⁻¹ para el RA RR y 0.3897 min⁻¹ para el PA H-ERD, los mejores consumos fueron 0.1723 KW-h/g, 0.3589 KW-h/g, 0.0682 KW-h/g para cada colorante respectivamente. El coeficiente de transferencia de masa se incrementó al usar empaque en el reactor, a temperatura de 25 °C y flujo de 147.81 L/h. El proceso de oxidación avanzada con ozono demostró ser eficiente para la remoción de los grupos cromóforos de los colorantes.

Palabras clave: *Procesos de Oxidación Avanzada, Ozonización, Remoción de Color, Radical Hidroxilo, Colorantes Textiles*

ABSTRACT

The textile industry uses 200 L of water per Kg of fabric, in the fiber dyeing and washing process; in these processes considerable percentage of dyes is lost, which generates colored wastewater, harmful to ecosystems. In response to this problem, we study new treatment processes for the degradation of recalcitrant, colored components, such as advanced oxidation processes, which are efficient due to the generation of intermediates with high oxidizing power capable of destroying the chromophore groups of the dye. In this investigation, the advanced oxidation process with ozone (AOP-O₃) was evaluated and degraded to the direct dye Acid Blue 9 (AA-9) and to two reactive dyes Remazol Yellow RR GRAN (RA RR) and Procion Blue H-ERD (PA H-ERD) used in the textile industry. A batch type column reactor was used, connected to an ozonation system with an electric energy meter and a thermoregulatory bath that maintains the system temperature constant; the development of the experiments for each dye was carried out based on Taguchi L₈ orthogonal designs, considering four factors at two levels: initial mass of the dye (20.16 mg and 41.58 mg), reaction temperature (25°C and 50°C), volumetric flow of the air pump (74.01 L/h and 147.81 L/h) and the use or not of packing in the reactor. Color removal percentages, kinetic constants, electrical consumption were calculated for each test and the mass transfer coefficient for the gas-liquid system was evaluated. The results show that, through the advanced oxidation process with ozone, it is possible to degrade the color with percentages higher than 87.77% and removal times that fluctuate between 10 and 90 min. The kinetic constants obtained were of pseudo-first order, and the best values were 0.3462 min⁻¹ for AA-9, 0.0925 min⁻¹ for RA RR and 0.3897 min⁻¹ for PA H-ERD, the best consumptions were 0.1723 KW-h/g, 0.3589 KW-h/g, 0.0682 KW-h/g for each dye respectively. The mass transfer coefficient increased using packing in the reactor, at a temperature of 25 °C and a flow rate of 147.81 L/h. The advanced oxidation process with ozone proved to be efficient for the elimination of the chromophoric groups of the dyes.

Keywords: *Advanced Oxidation Processes, Ozonation, Color Removal, Hydroxyl Radical, Textile Dyes*

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) quien facilitó los recursos económicos para mi estadía en México.

Al personal docente y administrativo de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la Universidad Michoacana San Nicolás Hidalgo por brindarme el apoyo necesario para el ingreso y permanencia en su programa de estudio.

A la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana San Nicolás Hidalgo por facilitarme sus instalaciones y laboratorios donde realicé las investigaciones.

A mis asesores Dr. José Apolinar Cortés por su confianza, apoyo incondicional, por convertirse en un gran mentor y maestro para mí y Dra. Ma. Del Carmen Chávez Parga, por el acompañamiento durante esta investigación, gracias a ustedes, quienes me ayudaron para conseguir el éxito académico y profesional de este programa de estudios.

A los miembros de la mesa sinodal Dr. Horacio González Rodríguez, Dr. Roberto Guerra González, Dr. Javier Lara Romero, por todos sus aportes y sugerencias que contribuyeron al perfeccionamiento de esta investigación.

A los compañeros estudiantes del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental por su apoyo durante las jornadas de trabajo. A mis compañeros de generación que contribuyeron al desarrollo del conocimiento durante las discusiones en clases.

Al Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, por haberme brindado la oportunidad desde mi primer correo, donde expresé mi interés en formar parte de este programa de estudios. Por su apoyo en agilizar los trámites necesarios para facilitar mi traslado desde Honduras a México, con el propósito de cursar la maestría.

A mis compañeros de licenciatura Raúl Geovanni Peña, Brandon Elkjaer Martínez, Tesla Patricia Bonilla por acompañarme en mi proceso de postulación a la maestría.

DEDICATORIA

A la Divinidad que guía e ilumina mi camino y es mi fortaleza en esta existencia.

A mis padres, Carlos Humberto Castellanos y Nelcy Arely Henríquez por apoyarme en mis sueños de vida, por amarme incondicionalmente y enseñarme a buscar el éxito en la vida sustentado en principios morales y éticos desde mi niñez.

A mis abuelos maternos, Santos Marina Tovar y César Armando Henríquez por su amor incondicional y consentirme a cumplir todos mis sueños en cada paso de mi vida.

A la memoria de mis abuelos paternos, Carmela Castellanos y José Membreño.

A mi hermana Nataly Gissel Castellanos Henríquez y mi cuñado René Armando Gutiérrez por ser mis confidentes y cómplices.

A mis tías, padrinos, primas y primos, sobrinas y sobrinos por haberme motivado a seguir adelante a lo largo de mi vida.

A aquellas amistades que son familia por elección y han sido parte de diferentes procesos en mi vida, brindándome su apoyo moral y cariño incondicional.

A mi pareja, Jose Carlos Cardoza Portillo, por ser el principal apoyo y motivación constante en mi vida, por su amor y por convertirse en el mejor compañero en este camino que hemos recorrido juntos.

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Planteamiento del Problema	3
3	Justificación	4
4	Marco Teórico Conceptual	5
4.1	Tintorería.....	5
4.1.1	Tipos de Fibras.....	5
4.1.2	Tipos de Colorantes	6
4.2	Agua	7
4.2.1	Contaminación del Agua.....	7
4.2.2	Aguas Residuales	7
4.2.3	Características del Agua Residual	8
4.3	Espectroscopía UV-Vis	8
4.4	Tratamiento de Aguas Residuales	9
4.4.1	Procesos de Oxidación Avanzada.....	10
4.4.2	Ozono	11
4.4.3	Ozonización como Proceso de Oxidación Avanzada	11
4.5	Cinética de Reacción.....	13
4.6	Procesos de Transferencia para un Sistema Gas-Líquido	14
5	Antecedentes	16
6	Estado del Arte.....	18
7	Preguntas de Investigación.	23
8	Hipótesis	24
9	Objetivos.....	25
9.1	Objetivo General	25
9.2	Objetivos Específicos.....	25

10	Metodología	26
10.1	Configuración del Reactor.....	26
10.2	Proceso de Ozonización.....	27
10.3	Caracterización del Sistema Aire-Ozonizador	27
10.4	Diseño del Experimento	28
10.5	Espectroscopia UV-Vis	28
10.5.1	Espectros y Curvas de Calibración	29
10.6	Remoción de Color y Constante Cinética.....	29
10.7	Consumo Eléctrico	30
10.8	Demanda Química de Oxígeno.....	30
10.9	Colorante Directo Azul Ácido 9.....	31
10.10	Colorantes Reactivos	32
10.11	Remoción del Colorante Directo AA-9 y Colorantes Reactivos RA RR y PA H-ERD 32	
10.12	Coefficiente de Transferencia del Sistema Gas-Líquido	33
11	Resultados y Análisis.....	36
11.1	Aire-Ozonizador	36
11.2	Espectro y Curva de Calibración del Colorante Directo AA-9	36
11.3	Resultados de la Remoción del Colorante Directo	38
11.3.1	Colorante Azul Ácido 9	38
11.4	Espectro y Curva de Calibración de Colorantes Reactivos	47
11.5	Resultados de la Remoción de los Colorantes Reactivos	49
11.5.1	Colorante Remazol Amarillo RR GRAN	49
11.5.2	Colorante Procion Azul H-ERD	58
11.6	Coefficiente de Transferencia	67

11.7	Resumen de Resultados y Análisis	72
12	Conclusiones	76
13	Sugerencias	77
14	Referencias Bibliográficas	78
15	ANEXOS	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Arreglos Ortogonales Taguchi de Dos Niveles	28
Tabla 2 Factores para el Diseño del Experimento	33
Tabla 3 Diseño Ortogonal Taguchi L ₈ para la Remoción de los Colorantes	33
Tabla 4 Flujo de la Mezcla Aire-Ozonizador Suministrada al Sistema.....	36
Tabla 5 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante AA-9).....	38
Tabla 6 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante AA-9).....	39
Tabla 7 Parámetros Medidos para el Arreglo Ortogonal L ₈ (Colorante AA-9).....	44
Tabla 8 Diseño Taguchi L ₈ con su Variable Respuesta (Colorante AA-9)	44
Tabla 9 Constante Cinética en Orden Decreciente y Factores del Diseño L ₈ (Colorante AA-9) .	45
Tabla 10 Consumo Eléctrico por Cada Gramo de Colorante AA-9 Removido.....	46
Tabla 11 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante RA RR).....	49
Tabla 12 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante RA RR).....	49
Tabla 13 Parámetros Medidos para el Arreglo Ortogonal L ₈ (Colorante RA RR).....	55
Tabla 14 Diseño Taguchi L ₈ con su Variable Respuesta (Colorante RA RR).....	55
Tabla 15 Constante Cinética en Orden Decreciente y Factores del Diseño L ₈ (Colorante RA RR)	56
Tabla 16 Consumo Eléctrico por Cada Gramo de Colorante RA RR Removido.....	57
Tabla 17 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante PA H-ERD).....	58
Tabla 18 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante PA H-ERD).....	58
Tabla 19 Parámetros Medidos para el Arreglo Ortogonal L ₈ (Colorante PA H-ERD).....	64
Tabla 20 Diseño Taguchi L ₈ con su Variable Respuesta (Colorante PA H-ERD).....	64
Tabla 21 Constante Cinética en Orden Decreciente y Factores del Diseño L ₈ (Colorante PA H-ERD)	65

Tabla 22 Consumo Eléctrico por Cada Gramo de Colorante PA H-ERD Removido	66
Tabla 23 Parámetros de Cada Prueba y Coeficiente Global de Transferencia de Masa.....	70
Tabla 24 Coeficiente de Transferencia de Masa y Constante Cinéticas de los Colorantes para Cada Prueba del Experimento.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 a) Reactor Tipo Bach b) Reactor Tipo Bach con Empaque	26
Figura 2 Esquema General del Proceso de Ozonización	27
Figura 3 Estructura del Colorante Azul Ácido 9	31
Figura 4 Espectro de Colorante Azul Ácido 9 a Diferentes Concentraciones	37
Figura 5 Curva de Calibración de Colorante Azul Ácido 9.....	37
Figura 6 Curvas de Remoción de Color a) Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 1 (20.16 mg) y b) Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 2 (41.58).....	40
Figura 7 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 1 (20.16 mg) a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4.....	41
Figura 8 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 2 (41.58 mg) a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8.....	42
Figura 9 Constantes Cinéticas para Cada Prueba del Experimento (Colorante AA-9)	43
Figura 10 Gráfica de Efectos Principales para Medias (Colorante AA-9)	45
Figura 11 Espectros de Colorantes Reactivos a) Remazol Amarillo RR GRAN y b) Procion Azul H-ERD	47
Figura 12 Curva de Calibración de Colorante a) Remazol Amarillo RR GRAN y b) Procion Azul H-ERD	48
Figura 13 Curvas de Remoción de Color a) Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 1 (20.16 mg) y b) Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 2 (41.58).....	51
Figura 14 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 1 (20.16 mg) a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4.....	52
Figura 15 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 2 (41.58 mg) a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8.....	53
Figura 16 Constante Cinética para Cada Prueba del Experimento (Colorante RA RR).....	54
Figura 17 Gráfica de Efectos Principales para Medias (Colorante RA RR).....	56
Figura 18 Curvas de Remoción de Color a) Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 1 (20.16 mg) y b) Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 2 (41.58)	60
Figura 19 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 1 (20.16 mg) a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4.....	61

Figura 20 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 2 (41.58 mg) a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8.....	62
Figura 21 Constante Cinética para Cada Prueba (Colorante PA H-ERD).....	63
Figura 22 Gráfica de Efectos Principales para Medias (Colorante PA H-ERD)	65
Figura 23 Coeficiente Global de Transferencia de Masa para cada Prueba a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4.....	68
Figura 24 Coeficiente Global de Transferencia de Masa para cada Prueba a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8.....	69
Figura 25 Coeficiente Global de Transferencia de Masa para Cada Prueba	70



Oxidación de colorantes presentes en aguas residuales de la industria textil mediante el proceso de ozonización

1 Introducción

La industria textil utiliza grandes cantidades de agua durante el proceso de tinción y lavado de fibras, alrededor de 200 litros de agua por cada kilogramo de tela son requeridos durante el proceso industrial (Cardoso, Bessegato, & Boldrin Zanoni, 2016); derivado de esto se generan aguas residuales, las cuales pueden ser vertidas en los cuerpos receptores sin su debido tratamiento. La principal característica de las aguas residuales textiles, se debe a la presencia de colorantes que se pierden durante el proceso de teñido.

Más de 700,000 toneladas de colorantes y pigmentos son producidos anualmente en todo el mundo (Al-Ghouti *et al.*, 2010); según el anuario estadístico nacional de ingenieros químicos el volumen de producción en México fue de 321,949 toneladas, en el año 2022 (ANIQ, 2022), de las cuales un porcentaje se pierde en los efluentes dependiendo de las características de cada colorante, de su método de aplicación y del grado de fijación a las fibras. Se estima que el grado de fijación para los colorantes reactivos varía desde el 50-90% y para los colorantes directos desde el 70-95%, lo que significa que parte de estos colorantes utilizados para la tinción de fibras naturales como la celulosa, la lana y la seda, forman parte de las aguas residuales (López Miguel, 2015).

La ausencia de supervisión en los procesos industriales textiles conlleva a la liberación de químicos que dañan los biomas, contaminan los suelos y pueden causar graves efectos en caso de ingesta, tanto para animales como para humanos (Zaruma Arias *et al.*, 2018). Respecto a las industrias, el tratamiento de las aguas residuales textiles es costoso, representa para las fábricas una alta cuota mensual en mantenimiento del proceso y una elevada inversión inicial. Las leyes ambientales para descarga de aguas residuales establecen los parámetros de regulación para el tratamiento y desecho de estas. Vigilar el cumplimiento de dichas regulaciones es responsabilidad socioambiental de las empresas, autoridades locales y de la comunidad y sus habitantes.

En respuesta a esta problemática se buscan nuevas alternativas de tratamiento con la capacidad de degradar estos componentes recalcitrantes presentes en el agua residual de la industria textil que

se resisten a tratamientos convencionales, para que el proceso productivo sea ambientalmente seguro, protegiendo el recurso hídrico de vital importancia para la vida y sostenibilidad del planeta. Estos procesos llamados Procesos de Oxidación Avanzada tienen en común la generación del Radical Hidroxilo (OH^\bullet), que se caracteriza por poseer un alto potencial para la oxidación de las moléculas de los colorantes. En esta investigación se aplicó el proceso de oxidación avanzada para la remoción de tres colorantes utilizados en la industria textil.

2 Planteamiento del Problema

En la actualidad, la industria textil desempeña un papel fundamental en la economía global, brindando una amplia gama de productos que van desde prendas de vestir hasta textiles para el hogar y la industria. Sin embargo, este floreciente sector industrial también está asociado con una serie de desafíos ambientales, siendo uno de los más preocupantes la generación de aguas residuales contaminadas con colorantes y otros compuestos químicos.

La manufactura de textiles implica el uso intensivo de agua y una variedad de productos químicos, incluidos los colorantes utilizados para teñir las fibras. Estos colorantes pueden ser orgánicos o sintéticos, y muchos de ellos presentan características altamente persistentes y difíciles de degradar. Como resultado, cuando las aguas residuales de la industria textil son liberadas sin un adecuado tratamiento, pueden contaminar gravemente los cuerpos de agua receptores, alterando su calidad y afectando negativamente a los ecosistemas acuáticos y a la salud humana.

El agua residual textil se caracteriza por variaciones significativas en sus parámetros, y por poseer una alta concentración de colorantes, del orden del 5% hasta el 50% de los colorantes se pierden durante el proceso de tinción. (López Miguel, 2015). Esto provoca contaminación, eutrofización de los cuerpos de agua y representa una amenaza potencial por ser contaminantes tóxicos, cancerígenos y/o mutagénicos (Caudillo Flores, 2017). Se estima que del total del agua utilizada en el mundo más del 80% del agua residual de origen municipal e industrial se vierte en el medio ambiente sin recibir tratamiento (UNESCO, 2020).

Por lo tanto, en esta investigación se aplicó el Proceso de Oxidación Avanzada con ozono como una vía para la oxidación de los colorantes utilizados en la industria textil presentes en el agua residual.

3 Justificación

La creciente demanda de recursos hídricos en el mundo se intensifica a medida que la población aumenta y sus patrones de consumo se vuelven más exigentes, lo que conduce inevitablemente a la sobreexplotación de recursos vitales para la industria. La agudización de este tema genera conflictos significativos en los países en vías de desarrollo, donde el acceso al agua potable y el tratamiento de aguas residuales son limitados. Específicamente, las descargas de aguas residuales textiles sin el debido tratamiento representan un problema grave en las naciones con este tipo de industria, debido a que afectan la salud de los ecosistemas naturales y tienen un gran impacto en el medio ambiente y la salud humana, del 17 al 20% de la contaminación del agua dulce es causada por efluentes textiles (Gupta *et al.*, 2015).

En la actualidad las plantas de tratamiento cuentan con procesos convencionales como tratamientos físicos, químicos y biológicos. Respecto a los procesos de oxidación avanzada (ozonización), aun no se implementan de manera significativa en los países dedicados a la producción textil.

Sobre el tratamiento con ozono, las aplicaciones se han centrado en utilizarlo como tratamiento terciario, únicamente para eliminar contaminantes remanentes que hayan quedado después de los procesos convencionales; en esta investigación se evalúa el poder de remoción de color, del ozono sobre colorantes reales de la industria textil, como lo son: el colorante directo Azul Ácido 9 (AA-9) utilizado para la tinción de lana y seda y dos colorantes reactivos, Procion Azul H-ERD (PA H-ERD) y Remazol Amarillo RR GRAN (RA RR) que se utilizan para la tinción de algodón.

4 Marco Teórico Conceptual

4.1 Tintorería

En la industria textil se pueden procesar diferentes tipos de fibras para la elaboración de hilos y telas a las que posteriormente se les da el color y la tonalidad deseada. Las principales fibras utilizadas en la actualidad en la industria son las fibras de origen natural como el algodón, o las de origen sintético como poliéster.

4.1.1 Tipos de Fibras

Las fibras textiles se clasifican en dos grupos principales:

- **Fibras Naturales.**

Montoya Valencia (2005) define que las fibras naturales como su nombre lo indica, son de origen natural, ya sea de plantas o animales. Aquellas que son originadas de plantas se denominan fibras celulósicas y las de animales se les llaman fibras proteicas. Una de las fibras naturales más utilizadas es el algodón, con cadenas moleculares en forma de espiral, con una composición constituida por 94% de celulosa. La unidad básica de la celulosa es la glucosa y su reactividad química se debe a los grupos (OH), los cuales reaccionan rápidamente ante la humedad, colorantes y demás acabados. Entre las fibras proteicas más comunes se encuentra la lana y la seda, compuestas principalmente por aminoácidos, conteniendo carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y en el caso de la lana también contiene azufre; la proteína presente en la lana es la queratina formada por cadenas moleculares flexibles, mientras que en la seda se encuentra la fibroína. Estas fibras tienen las características de tener un comportamiento anfótero debido a que posee en su molécula grupos reactivos tanto básicos como ácidos.

- **Fibras Sintéticas**

Montoya Valencia (2005) establece que, las fibras sintéticas se fabrican comenzando con la combinación de monómeros, para formar un compuesto químico complejo llamado polímero; estas fibras van a presentar diferencias entre ellas dependiendo de la manera cómo se elabore el polímero, de los elementos que se usan, así como, del proceso de hilatura. Las fibras sintéticas son poliamidas, poliacríticas, poliéster, poliolefina, poliuretano, polivinilo.

En la tintorería de textiles también, se clasifican los tipos de colorantes a utilizar según su capacidad de unirse fuertemente a la fibra y que esta, no pierda el color en posteriores lavados caseros. Estos colorantes tienen la capacidad de transferir el color que poseen o, producirlo mediante reacciones; su aplicación depende exclusivamente de las fibras a colorear.

4.1.2 Tipos de Colorantes

Marcano (2018) hace una clasificación de los colorantes según la técnica para su aplicación, esto se refiere principalmente, a la técnica que se utiliza para transferirlos o fijarlos en las diferentes fibras, centrandó esta investigación a dos tipos de colorantes utilizados en la industria textil, dentro de la cual se encuentran los colorantes reactivos y los colorantes directos.

- **Colorantes Reactivos**

Bajo este nombre se engloban aquellos que poseen en su molécula un grupo reactivo que se une a la fibra mediante enlaces covalentes formando ésteres o éteres. En ello se aprovechan las funciones hidroxilo del algodón y de la lana o el grupo amino de la lana, seda y otras poliamidas. Estos grupos reactivos contienen generalmente halógenos que son sustituidos por las funciones OH y NH de la fibra. Este es el caso de los colorantes porción que utilizan como grupos enlazantes a la fibra, derivados heterocíclicos nitrogenados como 2,3-dicloroquinoxalina, entre otros (Marcano, 2018, p. 33).

- **Colorantes Directos**

Aquellos que contienen grupos polares (RNH_3^+ , RSO_3^- , etc.), son aplicables directamente en solución y se adhieren a las fibras por interacciones electrostáticas o por la formación de sales. Por costumbre se conocen como colorantes directos aquellos aniónicos que tienen especial afinidad por fibras celulósicas. Dentro de este grupo se encuentran, los colorantes ácidos, que contienen grupos ácidos como: SO_3H , CO_2H , NO_2 , OH (fenólicos) y por lo tanto pueden teñir fibras con grupos básicos como la seda, la lana y la poliamida, fijándose por formación de sales (Marcano, 2018, p. 30).

Los procesos textiles, para poderse llevar a cabo necesitan grandes cantidades de agua. Esta sirve de medio para preparar las soluciones químicas de la tinción y ponerlas en contacto con las fibras, dejando una huella hídrica y generando grandes cantidades de residuos no biodegradables.

4.2 Agua

El agua es un elemento vital para la vida, uno de los más abundantes que generalmente se encuentra en estado líquido, cuyas propiedades físicas y químicas le permiten ser un componente vital para la naturaleza y sociedades, como habitad y de base para muchas actividades humanas, como factor productivo para la agricultura, como sistema de transporte de energía, materia orgánica y minerales. De los flujos de agua depende el mantenimiento de funciones ambientales sin las cuales no podría sostenerse la vida sobre la tierra (Toledo, 2006).

Uno de los problemas que se vive en la actualidad es la contaminación del agua, muchos creen que este recurso no dejará de existir, pero en realidad nuestros actos y la falta de conciencia nos está llevando a sobreexplotar las fuentes naturales de agua y contaminando los cuerpos receptores; no solo en los países industrializados, sino en todo el mundo.

El 70% de la superficie del planeta está compuesta por agua, el 2.5% es agua dulce, superficial y subterránea. Poco menos del 1% del agua de todo el planeta es agua dulce disponible para el consumo humano y el mantenimiento de los ecosistemas (Guerrero *et al.*, 2009).

4.2.1 Contaminación del Agua

La contaminación del agua es la acción de introducir algún material; o cualquier alteración en su composición química, física o biológica que determinan la calidad de la misma, de modo que no reúna las condiciones necesarias para el uso, al que se le hubiera destinado en su estado natural (Guadarrama Tejas *et al.*, 2016).

4.2.2 Aguas Residuales

También es importante definir a qué se denomina aguas residuales. Las cuales pueden dividirse según su origen; en este caso el enfoque va dirigido a las aguas que descarga la industria, después de utilizarla en sus procesos productivos y cuyas características han sido modificadas negativamente. Específicamente, sobre las aguas residuales de origen textil, según Bolaños Avalos (2010) debido a la gran diversidad de procesos que involucra la industria textil y, la variabilidad de productos químicos y colorantes que se emplean, caracterizar el agua y establecer un procedimiento de tratamiento en general es una tarea difícil debido a las fluctuaciones extremas en los parámetros.

4.2.3 Características del Agua Residual

Las características del agua residual son los parámetros que se miden para determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas, que expresan el nivel de contaminación que esta posee, o cuánto ha cambiado sus propiedades después de ser utilizada en el proceso textil. Algunos de estos parámetros deben ser analizados en el laboratorio y son indispensables para la aplicación de métodos de tratamiento, entre los que se enlistan los siguientes:

- **Parámetros Físicos:** estos parámetros determinan la calidad del agua de manera general y pueden estar ligados a otros más complejos, entre ellos está el color que “resulta de la presencia en solución de diferentes sustancias como iones metálicos naturales, humus y materia orgánica e inorgánica disuelta. La expresión color se debe considerar que define el concepto de “color verdadero”, esto es, el color del agua de la cual se ha eliminado la turbiedad” (Sereviche Sierra *et al.*, 2013, p.14). En las actividades textiles “La mayoría de los colorantes tienen un grado de agotamiento limitado, lo que significa que una parte del colorante añadido no queda fijado a la fibra y termina en las aguas residuales, aportando cierta coloración a las mismas” por lo tanto, está relacionado al tipo de colorante utilizado y su concentración residual (Vilaseca Vallvé, 2015, p.11).
- **Parámetros Químicos:** estos parámetros van más allá de las características del agua que podemos percibir a simple vista y se realizan mediante análisis rigurosos de laboratorio, entre ellos, la demanda química de oxígeno (DQO), que es una medida de la cantidad de oxígeno que se necesita para lograr la oxidación de sustancias de origen orgánico e inorgánico, para obtener productos relativamente inertes (Bolaños Avalos, 2010). Este parámetro engloba de manera general la contaminación del agua.

4.3 Espectroscopía UV-Vis

La espectroscopia ultravioleta y visible (UV-Vis) es una técnica que permite la identificación molecular de compuestos orgánicos e inorgánicos cuando presentan grupos cromóforos, es muy útil cuando se necesita dar un seguimiento a parámetros de aguas residuales textiles como el color y se fundamenta en la absorción de la radiación electromagnética a ciertas longitudes de onda. El espectro UV-Vis comprende una pequeña parte de todo el espectro electromagnético donde la luz atraviesa la muestra y la cantidad absorbida se mide mediante la diferencia entre la radiación

incidente (I_0) y la transmitida (I). La cantidad de luz absorbida se expresa como transmitancia (T) o absorbancia (A) y se definen a continuación:

$$T = \frac{I}{I_0}; \quad A = -\log(T) \quad (1)$$

La mayor parte de la absorción de los compuestos orgánicos en el espectro UV-Vis resulta de la presencia de enlaces π (es decir, insaturados). En el caso de los colorantes textiles poseen uno o más grupos cromóforos que, normalmente, contienen un enlace π .

La espectroscopia se ha convertido en una técnica básica de caracterización del color de la materia, y está relacionado con su absorptividad y reflexividad en función de su concentración como lo expresa la ley de Beer-Bouguer-Lambert:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-kbc} \quad (2)$$

Donde I_0 es la intensidad incidente, I es la intensidad transmitida, e es la base de los logaritmos naturales, k es una constante, b es el paso óptico y C es la concentración de la especie absorbente. Esta ecuación puede convertirse en una expresión lineal más conocida como la ley de Lambert-Beer tomando el logaritmo en la forma:

$$A = \epsilon bC \quad (3)$$

Donde ϵ es la absorción molar o coeficiente de extinción molar característico de cada sustancia. Mediante la aplicación de estas leyes se puede realizar la cuantificación de cualquier sustancia donde la absorbancia es proporcional a su concentración (Owen, 2000).

4.4 Tratamiento de Aguas Residuales

Algunos años atrás, se dejaba en manos de la naturaleza la acción de remediar la contaminación de las aguas por causas antropogénicas, ahora se viven las consecuencias de la poca conciencia que se tenía. Debido a esto, en la actualidad existen legislaciones donde se establecen los niveles máximos permisibles para la descarga de aguas y, se hace obligatorio para las industrias ambientalmente responsables el tratamiento de estas. Las tecnologías y las investigaciones han ido evolucionando, se han desarrollado procesos de tratamiento para aguas residuales, cuyo objetivo

es eliminar los contaminantes o aquellos cambios que sufrió el agua utilizada en los procesos productivos, de tal manera que, al ser devuelta a la naturaleza, contenga el menor porcentaje de estos y no represente una amenaza para la salud de los cuerpos receptores.

“El tratamiento de aguas residuales es una serie de operaciones físicas, químicas y biológicas que remueven el material suspendido, coloidal o disuelto” (Bolaños Avalos, 2010, p.49)

En la actualidad existen nuevas técnicas de tratamiento, debido a los altos índices de contaminación, las plantas de tratamiento convencionales con métodos físicos, químicos y biológicos no resultan eficientes para la eliminación de la contaminación, es por ello que recientemente se implementan en países en vías de desarrollo los llamados procesos o métodos de oxidación avanzada.

4.4.1 Procesos de Oxidación Avanzada

Los estudios acerca de los procesos de oxidación avanzada datan desde 1987. El concepto fue establecido por Willian H Glaze junto a otros investigadores que estudiaron diferentes procesos, denominados de oxidación avanzada. Estos procesos implican la generación de un intermediario muy activo, que generalmente tiene un poder oxidante mucho mayor y ofrece la opción de destruir completamente los contaminantes orgánicos (Glaze & Kang, 1988).

Los procesos de oxidación se basan en procesos químicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo (OH[•]) alguno de ellos más conocidos como son la fotocatalisis y el uso de ozono y otros menos conocidos como el Fenton, que consiste en la incorporación de sales de hierro (Iriarte Mendívil, 2020, p.24).

Algunas de las ventajas de estas tecnologías es que son eficientes para compuestos recalcitrantes que se resisten a tratamientos biológicos, consiguiendo generalmente la destrucción completa de la materia orgánica, cambia de fase al contaminante y lo transforma químicamente, usualmente no genera lodos que necesiten de un tratamiento o disposición final y no se forman subproductos de reacción o lo hacen en bajas concentraciones (Doménech *et al.*, 2001).

4.4.2 Ozono

El ozono fue descubierto por el científico holandés Van Marum en el año de 1783. El nombre fue atribuido años después por el químico Schönbein, que notó el olor distintivo y lo nombró ozono, tomado de la palabra griega *ozein* que significa oler. El ozono (O_3) es una forma alotrópica del oxígeno elemental y está constituido por tres átomos de oxígeno. Es un gas azul con un olor picante característico cuando se encuentra a concentraciones entre 0.08 y 0.1 ppm (López Cepero Gonzáles, 2011).

El ozono es un poderoso oxidante y desinfectante, se utiliza para el tratamiento de efluentes textiles por su capacidad de oxidar las moléculas de colorante, también se usa como agente blanqueador y en la remoción de sabores y olores. Su empleo en el tratamiento de aguas no deja ningún residuo, gracias a su forma inestable es ligeramente soluble en el agua. El ozono se obtiene mediante el paso de aire seco u oxígeno por una descarga eléctrica de alto voltaje y alta frecuencia (Bolaños Avalos, 2010).

4.4.3 Ozonización como Proceso de Oxidación Avanzada

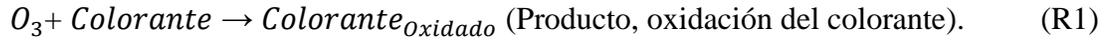
La oxidación por ozono u ozonización es un proceso de oxidación avanzado que en sus inicios se utilizaba exclusivamente para la potabilización de agua, pero debido a sus numerosas y eficientes aplicaciones se ha implementado en el tratamiento de aguas residuales de diferentes orígenes, mejorando su biodegradabilidad haciendo más fácil el tratamiento biológico convencional. Algunas de sus utilidades y aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales son: se utiliza como desinfectante o biocida, como oxidante clásico para remover contaminantes orgánicos, y se implementa antes o después de otros tratamientos para ayudar en otras operaciones unitarias como la coagulación, la floculación y sedimentación (Patiño *et al.*, 2012).

El ozono oxida la molécula del colorante orgánico de forma directa ($E^0=2.07V$) (reacción 1) o indirecta en la que se produce la formación del radical hidroxilo (reacciones 2-6) este radical hidroxilo tiene un poder oxidante ($E^0=2.80V$) mayor que el ozono y le confiere una mejor eficacia en la oxidación de las moléculas, por abstracción de un protón para formar peroxiradicales y finalmente convertirse en dióxido de carbono y agua (reacciones 7-9) o por adición y transferencia de electrones de las cuales se obtienen otros productos orgánicos (reacciones 10-12). Cuando se produzca un exceso de radicales hidroxilos se desencadenan reacciones de recombinación y se forma peróxido de hidrogeno, oxígeno y ozono (reacciones 13-16). (Szpykowicz *et al.*, 2001);

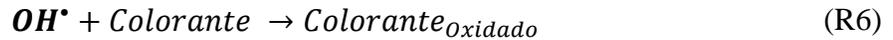
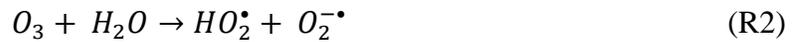
(Muniyasamy *et al.*, 2019); (Gul & Ozcan Yildirim, 2009); (Garcés Giraldo, Mejía Franco, & Santamaría Arango, 2004)

Mecanismo de oxidación directa e indirecta:

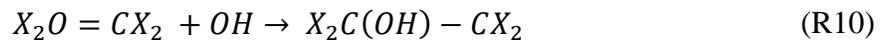
- Oxidación directa:



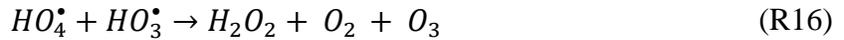
- Oxidación indirecta:



- El radical hidroxilo formado reacciona con las moléculas orgánicas:



- El destino del OH[•] sin reaccionar puede ser por recombinación:



4.5 Cinética de Reacción

La cinética de una reacción es el estudio de la velocidad que describe que tan rápido se consumen los reactivos para formar los productos, esta velocidad de reacción depende del mecanismo de como ocurra y de muchos factores que aceleren o ralenticen la reacción. Si se tiene la siguiente reacción:



La velocidad puede expresarse en términos de consumo de reactivos con la (ecuación 4) o en términos de formación de productos (ecuación 5)

$$-r_A = -\frac{1}{a} \frac{\Delta(A)}{\Delta t} = -\frac{1}{b} \frac{\Delta(B)}{\Delta t} \quad (4)$$

$$-r_A = \frac{1}{c} \frac{\Delta(C)}{\Delta t} = \frac{1}{d} \frac{\Delta(D)}{\Delta t} \quad (5)$$

La ley de velocidad describe la manera en que van cambiando estas concentraciones conforme se van descomponiendo los reactivos con el tiempo (ecuación 6):

$$-r_A = k(A)^x(B)^y \quad (6)$$

Donde: k es la constante de velocidad, (A) y (B) son las concentraciones de los reactantes y x , y son los órdenes de reacción. El orden de una reacción se define en términos de la concentración de los reactivos y no de los productos.

Para reacciones de primer orden, en donde un reactivo se transforma a productos, o se cuenta con dos reactivos, pero uno de ellos está en mayor proporción respecto del otro y es el que determina la velocidad de la reacción (pseudo-primer orden). Si se tiene una reacción donde el reactivo A se transforma a productos (reacción 18).



La expresión de velocidad en función del consumo del reactivo se expresa como el cambio de la concentración en función del tiempo o de la constante cinética por la concentración en el tiempo (ecuación 7) (Levespiel, 2004).

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (7)$$

4.6 Procesos de Transferencia para un Sistema Gas-Líquido

Los procesos de transferencia de masa tienen lugar cuando se establece un movimiento de dos o más componentes cuyas concentraciones varían de un punto a otro.

Existen dos tipos de transferencia de masa: transferencia molecular de masa, llamada también difusión en donde la masa se transfiere por medio del movimiento molecular y transferencia por convección, en donde la transferencia ocurre debido al movimiento de una de las especies (Rodríguez Espinoza, Alfaro Cruz, & Jamanca Gonzáles, 2017).

En un proceso de tratamiento con ozono existen transferencia de masa entre una fase gaseosa y una fase líquida y se describe a través de la teoría de la doble capa o doble película, establecida por Lewis y Whitman, cada una representa una resistencia a la transferencia de masa, pero existe un equilibrio en la interfase gas-líquido donde existe una presión parcial y una concentración del soluto en la interfase (P_{Ai} y C_{Ai}). A cierta distancia de la interfase se encuentra la capa límite del gas a una presión parcial $P_{A,G}$; de la misma manera una capa límite del líquido a una concentración $C_{A,L}$. La transferencia de masa empleando el coeficiente correspondiente a la fuerza impulsora; en el gas se da por las diferencias en las presiones parciales (ecuación 8) y en el líquido por la diferencia de concentraciones (ecuación 9) (Welty, Wicks, Wilson, & Rorrer, 2008).

$$N_A = K_G(P_{A,G} - P_{Ai}) \quad (8)$$

$$N_A = K_L(C_{Ai} - C_{A,L}) \quad (9)$$

Para gases que son ligeramente solubles en el líquido la transferencia se da por la difusión del gas soluto en la película del líquido. Debido a que es imposible conocer las condiciones en la interfase, se definen las condiciones de equilibrio donde, P_A^* es la presión parcial que estaría en equilibrio con $C_{A,L}$ y C_A^* es la concentración que estaría en equilibrio con $P_{A,G}$, entonces $C_{Ai}=C_A^*$, siendo C_A^* la concentración de saturación del gas disuelto en el líquido en equilibrio con la presión parcial $P_{A,G}$. De esta manera obtenemos la transferencia de masa en términos de la diferencia de la concentración de saturación y la del soluto en el líquido (ecuación 10).

$$N_A = K_L(C_A^* - C_{A,L}) \quad (10)$$

5 Antecedentes

El proceso de tratamiento del agua por oxidación con ozono fue estudiado hace muchos años, se conoce que las investigaciones más antiguas sobre las aplicaciones del ozono comenzaron a finales del siglo XIX, en tratamientos de aguas municipales en Alemania, Holanda y Francia. “Ohmuller observó que el ozono destruía eficazmente las bacterias del tifus y del cólera en la instalación industrial instalada por Frolich en Martinikenfeld. Como consecuencia del hallazgo, se construyeron las instalaciones de Wiesbaden y Paderborn en 1896” (López-cepero Gonzáles, 2011, p.5).

Para el siglo XX Hoigné & Bader (1983) describen el proceso de ozonización que involucra dos especies: el ozono que es un gas con alto poder oxidante y la formación del radical hidroxilo. El ozono forma reacciones de oxidación generalmente complejas en el agua, solo una parte del ozono reacciona directamente con los contaminantes disueltos. Otra parte puede descomponerse antes de la reacción, tales descomposiciones son catalizadas por iones de hidróxido y otros solutos. De este modo, se forman oxidantes secundarios altamente reactivos, como los radicales OH^{\bullet} , los cuales reaccionan inmediatamente con los solutos presentes, esta segunda reacción es la que ocurre en los procesos de oxidación avanzada.

Chu & Ma (2000) estudiaron de manera cuantitativa la ozonización directa y la indirecta por radicales libres a diferentes tipos de colorantes. El experimento se realizó en diferentes condiciones, ajustando la dosis de ozono, el pH de la reacción y la concentración del colorante. La cinética de la reacción tuvo un comportamiento de pseudo-primer orden y, la velocidad de reacción disminuye a medida que aumenta la relación tinte/ozono. Al incrementar el pH de la reacción, el ozono se descompone en radicales hidroxilo, que tienen mayor poder oxidante que el ozono, en cambio cuando el pH es bajo, el ozono actúa como el único oxidante, disminuyendo así la velocidad de descomposición de los colores.

Guelli Ulson de Souza *et al.* (2010) aplicaron la ozonización como primera fase y un tratamiento por medio de degradación biológica como fase posterior, estudiando parámetros como el color y la demanda química de oxígeno (DQO). Obteniendo valores satisfactorios de remoción de color, aun cuando este se encontraba en concentraciones altas (500 mg/L). La reacción con un comportamiento cinético de pseudo-primer orden con respecto a la concentración del colorante,

obtuvo una eficiencia de eliminación superior al 96%. Respecto a la DQO existe una tendencia de disminución con el aumento de tiempo de ozonización. Concluyendo que la ozonización como pre-tratamiento, es un proceso potencial, para eliminación de colorantes azo y biodegradabilidad de las aguas residuales.

Anteriormente se proponía en su mayoría, utilizar el método de oxidación con ozono combinado con otras formas de tratamiento del agua, debido a que la generación de ozono era costosa y requería grandes cantidades de energía. “Como el ozono es muy caro, una buena estrategia es la utilización de la ozonización como pretratamiento, ya que los productos de la oxidación parcial con ozono son generalmente más fácilmente biodegradables que sus precursores” (Bes Monge *et al.*, 2015, p.14).

Santiago Correa (2016) elaboró un estudio sobre el proceso ozono-fenton para el tratamiento del agua residual textil, sobre el cual describe que “el proceso consiste en la generación de O₃ a partir del aire y su posterior burbujeo a la muestra; este proceso no tiene impacto significativo sobre la DQO de las muestras, sin embargo, es muy efectivo para la remoción de color” (Correa Sánchez, 2016, p. 5).

Leiva *et al.* (2018) implementa la ozonización para eliminación de sólidos suspendidos totales, demanda química y bioquímica de oxígeno, así como grasas y aceites, obteniendo porcentajes de remoción de 60%, 80%, 90% y 90% respectivamente; concluyendo que los más oxidados fueron DBO y grasas y aceites a los 50 min de reacción. Leiva *et al.* (2018) en su estudio también comprueba el porcentaje de remoción de DBO del 90% en el mismo tiempo.

6 Estado del Arte

En 2019 varias instituciones chinas de investigación, incluyendo la Academia China de Ciencias liderada por Yin *et al.* (2019) realizaron un estudio de caso en el que, utilizan una combinación de procesos para el tratamiento del agua, iniciando por la floculación y sedimentación, filtrado de arena, seguido por la oxidación con ozono, procesos de Ultrafiltración (UF) y Osmosis Inversa (RO); en la primera etapa de tratamiento. La segunda etapa incluye una unidad de ozonización, filtro de arena, UF y RO. Dado que mencionan que la ozonización por sí sola no es capaz de limpiar el agua de manera completa. Además, aseguran que su estudio es el primero que también toma en cuenta el factor del gasto al momento de aplicarlo en una planta de tratamiento industrial, y no se queda en análisis de laboratorio. Los resultados obtenidos en la investigación llevaron a los investigadores a concluir que el ozono puede eliminar completamente el color. Las tasas de remoción de los tanques de aireación de ozono primario y secundario fueron $69,4 \pm 6,98\%$ y $75,36 \pm 7,39\%$, respectivamente. La Ultrafiltración elimina principalmente la turbidez. El tratamiento con Ósmosis Inversa muestra la tasa de eliminación más alta. Las tasas de eliminación de Demanda Química de Oxígeno, color y SO_4^{2-} fueron superiores al 99%. La tasa de eliminación del sistema de reutilización secundario de agua reciclada es más alta que la del sistema primario, debido a la alta dosis de ozono y al uso de una nueva membrana de ósmosis inversa. Respecto al proceso de electrocoagulación, el ozono alcanzó 100% de eliminación del color.

Hu *et al.* (2019) investigadores de la Universidad Politécnica de Hong Kong, menciona que la adsorción de los tintes por la tela sintética es deficiente, por lo que deben lavarse utilizando mucha agua, para evitar que la tela libere color al momento de ser usada. Cabe mencionar que parte de las telas que se colorean son sintéticas. En su investigación, implementaron ozonización catalítica para reutilizar los efluentes gastados del proceso de lavado y disminuir la dependencia del agua. Los resultados demostraron que el catalizador magnético utilizado en este estudio, promovió significativamente la remoción del tinte en los efluentes gastados. En comparación con la ozonización simple. En términos de eliminación de DQO se incrementó notablemente en un 25%, mediante la ozonización catalítica con MnFe_2O_4 . Por consiguiente, la eficacia mejorada de la ozonización catalítica podría permitir que los efluentes tratados se reciclen dos veces para limpiar los colores o tintes sueltos que no se adhirieron a los tejidos.

El-Hassani *et al.* (2019) plantean un método de tratamiento para estudiar el efecto de ozonización por sí sola y de la ozonización catalítica. El sistema emplea un nanocatalizador de hidróxido de doble capa o hidróxidos dobles laminares basado en Ni (Ni-LHD). Los efectos se estudiaron mediante demanda química de oxígeno (DQO), métodos UV-Vis y cromatografía iónica, bajo la influencia de diferentes factores operativos. Las moléculas del colorante se mineralizaron por completo sobre la superficie del catalizador. La ozonización no catalítica eliminó el 30% de DQO y la catalítica el 72%, en un tiempo de reacción de 60 minutos y una cinética de pseudo-primer orden. Las condiciones del catalizador permanecieron estables después del proceso.

Iriarte Mendívil (2020) quien menciona que justamente la ozonización es una nueva tendencia, no por ser descubierta recientemente sino por ser aplicada. En el año 2020, debido a la crisis del COVID-19 se produjeron muchas investigaciones en torno a la utilización del ozono como desinfectante del aire en zonas hospitalarias, sin embargo, en el tratamiento de aguas residuales se avanzó poco.

Bilinska *et al.* (2020) implementa ozonización catalítica para la remoción de contaminantes en aguas que serán reutilizadas en el proceso productivo. La técnica fue aplicada junto a otras etapas de tratamiento. Los principales parámetros en estudio fue la demanda química de oxígeno y el carbono orgánico total cuyos valores iniciales fueron DQO: 3340 mg/L y COT: 1790 mg/L. La primera fase consistió en someter el agua a electrocoagulación, con un porcentaje de eliminación de, color 84%, DQO 38.4% y COT 41%; la electrocoagulación dio lugar a la aparición de subproductos que impidieron mayor eficiencia en estos últimos. La ozonización catalítica se empleó para la segunda fase. El catalizador utilizado fue carbón activado. La investigación demuestra la eficiencia de este sistema de tratamiento en la remoción de color, así como la reducción de los otros parámetros, alcanzando porcentajes de eliminación de 63% para DQO y 61% de COT.

Sepideh Bakht *et al.* (2020) también implementan ozonización simple y ozonización catalizada con carbón activado, como una tecnología avanzada de oxidación, además se evaluó el efecto del ion cloruro. Pues según su experimento al agregar pequeñas concentraciones de NaCl la reducción del tinto aumentó a diferencia de la ozonización simple que no tuvo ningún efecto cuando se agregó la sal. Respecto al efecto de la temperatura, al elevarla promovía la eliminación de DQO.

Concluyendo que la ozonización catalizada con carbón activado resulta ser una técnica prometedora para el tratamiento de aguas residuales salinas.

Sergey (2020) en su investigación titulada “La aplicación de Ozono para reducir la intensidad del color de soluciones acuosas de colorantes utilizados en la industria textil”, menciona los tiempos y las cantidades exactas que necesitó para lograr la efectividad al momento de eliminar el color del agua residual textil, utilizando únicamente ozono sin tratamientos posteriores, concluye que, sin importar el grupo cromóforo del colorante, el ozono trabaja eficazmente. La dosis de ozono necesaria para reducir la intensidad del color en 5-10 veces según el grado de dilución de las soluciones de tinte son 0.25-0.75 mg de ozono/mg del tinte. Y a dosis más altas de ozono, se produjo la decoloración completa.

Una tecnología novedosa fue implementada recientemente, para incrementar la transferencia de masa del ozono con la solución, para la oxidación de los procesos de las aguas residuales, de textiles sintéticos. Se utilizó un reactor con agitador que contaba con deflectores de bloques, revestidos con óxidos de Fe-Co como catalizadores, se colocaron placas en las paredes y en la tapa, al interior del reactor, para intensificar el proceso de degradación. El reactor contaba con entrada y salida de gas en la parte inferior y superior respectivamente. Algunas de las aportaciones de este estudio son, la interacción de la fase líquida con la gaseosa aumento uniformemente, a una velocidad de agitación de 500 revoluciones por minuto. Respecto al efecto del volumen, a baja velocidad de agitación, el coeficiente de transferencia disminuyó al aumentar el volumen de líquido. Respecto al rendimiento de los catalizadores, la constante de velocidad de decoloración aumentó 21% a alta velocidad de agitación y 34% a baja velocidad de agitación. Concluyendo que los catalizadores de óxido metálicos promueven la degradación del colorante (Yang *et al.*, 2021).

Turhan (2021) utilizó el ozono para degradar los colorantes dispersos Violeta 93 (DV93) Azul 79 (DB79) y Anaranjado 30 (DO30), los cuales son comercializados por Setas (Tekirdag, Turquía). Los colorantes fueron disueltos en agua tratada con ósmosis inversa y desionizada, mezclados durante 30 minutos. El proceso de tratamiento se realizó burbujeando el ozono en el fondo de un reactor, durante lapsos de 0 a 120 minutos. Se encontró que los niveles de DQO bajaron en un 61,5%; 72,88%; 77,43%, para cada colorante por separado, la decoloración se logró en 16 minutos para el DV93, 12 minutos para el DB79 y 9 minutos para el DO30.

Las investigaciones de procesos avanzados de oxidación siguen siendo estudiados para su aplicación, recientemente los estudios nos demuestran que el interés debido a la gran eficiencia en la remoción de color, por estos métodos resulta prometedor, Mohan & Oke (2021) implementan ozonización como pretratamiento, llamado pre-ozonización, posterior a este, utilizan un tratamiento biológico. El estudio se realizó sobre efluentes reales tomados de una industria textil en la India y, de efluentes sintéticos preparados en el laboratorio a base de colorantes reactivos, compuesto por los tres colores primarios. Con el fin de comparar los efectos de oxidación sobre la muestra sintética y la muestra real, que se caracteriza por ser altamente recalcitrante, debido a todos los auxiliares textiles utilizados. Primero miden el rendimiento del proceso de ozonización por sí solo. Para el efluente sintético se eliminó 96.13% del color y 67.40% de DQO. Para efluentes reales se eliminó el 94.6% de color y 67.4% de DQO. El rendimiento del reactor aeróbico se midió por sí solo, con los efluentes reales, con porcentajes de eliminación de 54.2% y 68.7% para el color y DQO respectivamente. Evidenciando que el tratamiento con ozono es eficientemente superior a un tratamiento biológico, a los microorganismos les es más difícil romper con los anillos aromáticos en las moléculas complejas. El sistema completo de pre-ozonización seguido por el reactor biológico obtuvo porcentajes de eliminación de 98.6% para el color y 91.6% de DQO. El tratamiento completo eliminó casi el 100% la presencia de color y DQO, concluyendo que la ozonización en conjunto a otros métodos de tratamiento es una alternativa eficaz.

Bhad *et al.* (2022), aplican la ozonización simple para la degradación de efluentes sintéticos preparados con el colorante azul reactivo 4, cuyo grupo cromóforo es antraquinónico, la aplicación del método se realizó a diferentes concentraciones iniciales del colorante y a diferentes pH en el cual se obtuvo la mayor remoción a una concentración inicial de 60 mg/L y un pH de 12, eliminando el 87% del color. También aplicaron el método combinado ozono con peróxido de hidrógeno (5g/L) obteniendo la máxima remoción a un pH de 10 con un porcentaje de eliminación del 92% y cinéticas de pseudo-primer orden, concluyendo que el proceso de ozonización y el proceso combinado son efectivos para la eliminación del color en efluentes sintéticos de industria textil.

Las altas concentraciones de colorantes en el agua residual y debido a su persistencia en el medio, hacen que los procesos de tratamiento para la eliminación del color sean procedimientos complejos y de alto costo, por lo que el agua es liberada a los cuerpos receptores sin el debido control;

mediante éste estudio se busca determinar las mejores condiciones de eliminación de color cuando se presentan variaciones en la concentración del colorante, temperatura del agua residual, flujo de ozono alimentado y uso de reactor con y sin sistema de empaque. Las mejores condiciones de eliminación de color se determinaron en función de la cinética de reacción y consumo de energía.

7 Preguntas de Investigación.

Con la presente investigación se dio respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿En qué magnitud impacta la adición de ozono en la decoloración del agua y cuál es el porcentaje de eliminación del color?
- ¿Cuáles son las condiciones más eficientes para el proceso de remoción de color mediante la ozonización?
- ¿Cuál es el consumo energético durante el proceso de ozonización?

8 Hipótesis

Cuando se aplique el proceso de oxidación avanzada con ozono en un reactor de burbujeo, la velocidad de remoción de los colorantes directo, Azul Ácido 9 y reactivos, Procion Azul H-ERD y Remazol Amarillo RR GRAN, se incrementará por efecto del control de la temperatura de reacción, flujo de ozono suministrado al sistema, y uso de empaque en el reactor.

9 Objetivos

9.1 Objetivo General

- Evaluar el proceso de oxidación avanzada con ozono para la remoción de los colorantes, directo Azul Ácido 9 y reactivos Remazol Amarillo RR GRAN y Procion Azul H-ERD, presentes en el agua residual.

9.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la remoción de color mediante la aplicación de ozono en un reactor de burbujeo.
- Determinar las velocidades de remoción de los colorantes utilizados en la industria textil.
- Identificar la mejor combinación de factores en función de las velocidades de remoción de color.
- Determinar el consumo energético del proceso de oxidación avanzada con ozono.
- Evaluar el coeficiente de transferencia de masa para el sistema gas-líquido en el reactor de burbujeo.

10 Metodología

La ingeniería ambiental lleva implícito un espíritu de responsabilidad social, además del desarrollo científico para la industria. Por ello, esta investigación como parte de un programa de ciencias, es principalmente de carácter cuantitativa-experimental.

10.1 Configuración del Reactor

El reactor utilizado para el proceso de ozonización está fabricado en vidrio de dimensiones de 3.7 cm de diámetro y 33 cm de altura, teniendo un volumen útil de 354.82 mL. Rodeado de una pared con un espacio anular de 8 mm por el que circula agua para mantener el sistema a una temperatura constante. Al fondo del reactor se encuentra instalado un sistema de difusión para inyectar el ozono.

El volumen empleado para cada prueba fue de 300 mL de solución cuando no se utilizó empaque. Con el objetivo de aumentar el área de contacto del ozono en el líquido, en algunas pruebas sí se usó empaque, fabricado de pequeñas esferas de vidrio de diámetro de 5 mm, cuya cantidad ocupa un volumen de 300 mL, con una porosidad del 42%, es decir que, el volumen de la solución cuando se usó empaque es de 126 mL.

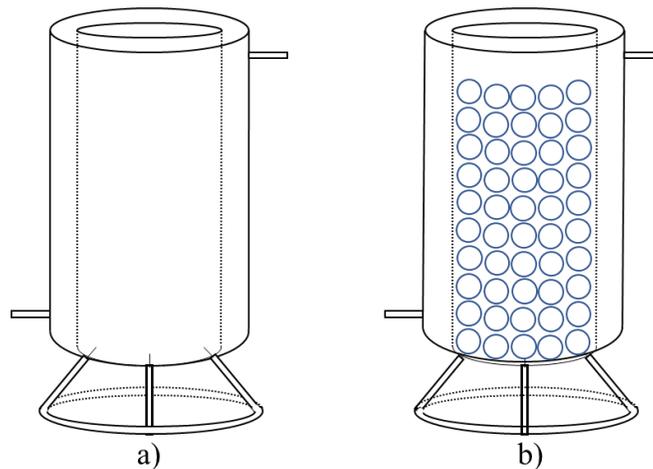


Figura 1 a) Reactor Tipo Bach b) Reactor Tipo Bach con Empaque

10.2 Proceso de Ozonización

El esquema general del proceso de ozonización consistió en, una fuente de aire que alimenta un ozonizador conectado al reactor de columna de vidrio. En el fondo del reactor está instalado el difusor que permite la inyección y distribución uniforme del gas, para dejarlo reaccionar en determinado tiempo. El reactor está rodeado de una pared con cavidad para la recirculación de agua a determinada temperatura. El proceso de ozonización fue el mismo para cada muestra preparada. El baño de termocirculación o termoregulación de la marca POLYSCIENCE®, modelo MX07R-20-AA1B, capaz de mantener el sistema de reacción a una temperatura constante. El número de pruebas y los factores involucrados se realizaron mediante diseños de experimentos, los cuales son explicados posteriormente. Adicionalmente el sistema cuenta con un Wattímetro de la marca STEREN® que mide la potencia eléctrica requerida por el sistema aire-ozono en Watts (W), y se calculó el consumo eléctrico del proceso de ozonización. El esquema de ozonización se muestra en la siguiente figura:

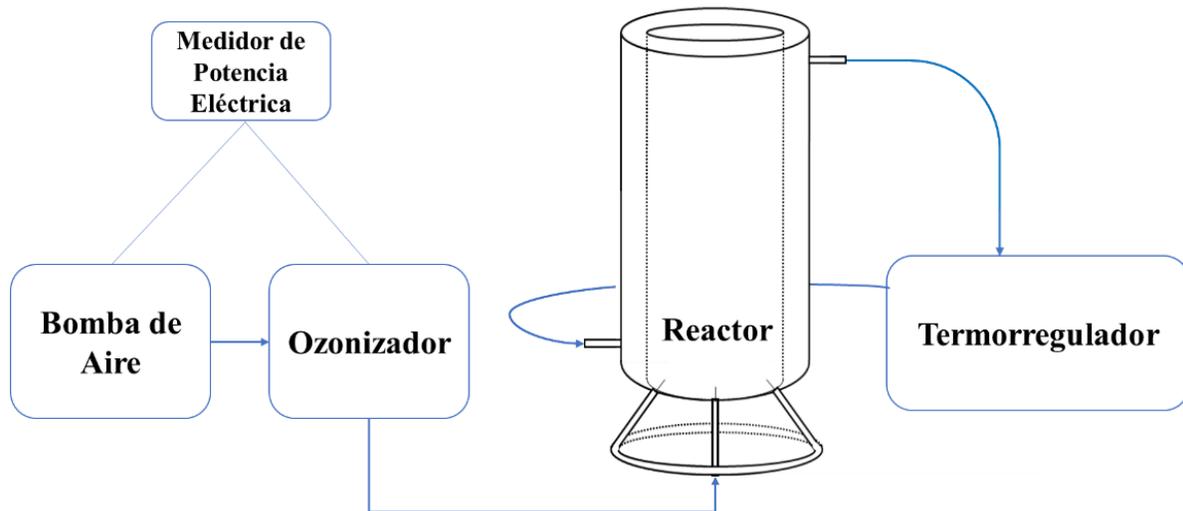


Figura 2 Esquema General del Proceso de Ozonización

10.3 Caracterización del Sistema Aire-Ozonizador

La primera etapa de esta investigación consistió en la caracterización del sistema bomba de aire-ozonizador para evaluar cuánto flujo volumétrico de la mezcla ozono-aire se suministraría al sistema. La fuente de aire está impulsada por una bomba marca HAGEN®, modelo OPTIMA cuyo flujo puede ser regulado en varios niveles, de los cuales se tomaron dos puntos de referencia. El

generador de ozono utiliza aire como fuente de oxígeno, el ozono es producido mediante la acción ionizante del oxígeno generada por una descarga eléctrica de corona. El ozonizador utilizado es de la marca CLEAR WATER®, modelo MICROZONE 300, con un interruptor ON / OFF y un regulador ajustable de la variación de la tensión eléctrica desde la mínima a la máxima producción. La bomba de aire está conectada al ozonizador y para medir el flujo volumétrico inyectado se utilizó una probeta de 1000 mL, se midió el tiempo de desplazamiento de 800 mL del fluido en dos puntos de referencia marcados en la bomba de aire. El diámetro de la burbuja se midió con un papel milimétrico y mediante una captura en cámara lenta se determinaron sus proporciones.

10.4 Diseño del Experimento

Todos los experimentos planteados en esta investigación se realizaron mediante diseños ortogonales Taguchi que permiten estudiar la configuración óptima de los factores de control en el proceso (Taguchi & Clausing, 1990). Esta herramienta estadística indica el número de arreglos y el orden de los factores que llevará cada prueba. En todos los casos se utilizó un arreglo ortogonal de dos niveles. Dependiendo de la cantidad de factores en estudio así fue el arreglo ortogonal. En la siguiente tabla se muestra los arreglos ortogonales de Taguchi en función del número de factores.

Tabla 1 Arreglos Ortogonales Taguchi de Dos Niveles

Número de factores a analizar	Arreglo ortogonal	Número de corridas
Entre 2 y 3	L ₄	4
Entre 4 y 7	L ₈	8
Entre 8 y 11	L ₁₂	12
Entre 12 y 15	L ₁₆	16
Entre 16 y 31	L ₃₂	32
Entre 32 y 63	L ₆₄	64

Fuente: Peace, G.S. (1993). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Massachusetts: Addison Wesley.

Los experimentos fueron sometidos a Análisis Taguchi en el software Minitab ® para calcular la mejor combinación en base a los factores y la relación señal-ruido planteada en la respuesta.

10.5 Espectroscopia UV-Vis

El análisis del parámetro de color se realizó en un espectrofotómetro marca THERMO SCIENTIFIC®, modelo EVOLUTION 300 UV-VIS, se midió la absorbancia de las soluciones a

concentraciones conocidas de cada uno de los colorantes y se generaron las curvas de calibración mediante la Ley de Lambert-Beer. De esta manera se pudo determinar la concentración de las soluciones durante el proceso de ozonización.

10.5.1 Espectros y Curvas de Calibración

Para cada colorante se prepararon 7 soluciones a concentraciones de 2,4,6,8,10,16 y 20 mg/L; se midió la absorbancia en función de la concentración en la región del espectro de 400 nm a 700 nm para el colorante directo y de 350 nm a 700 nm para los colorantes reactivos, se generó el espectro para cada solución de cada colorante; se construyeron las curvas de calibración a partir de la banda de absorción máxima en la región visible del espectro y se determinó la pendiente de la recta, también llamada *factor de calibración* (ecuación 3).

10.6 Remoción de Color y Constante Cinética

El seguimiento del proceso de remoción de color durante la ozonización se realizó tomando muestras del reactor cada 2 min o 5 min, midiendo la absorbancia de la misma y calculando su concentración. Se construyeron las curvas de remoción de color en función del tiempo, así como las constantes cinéticas determinadas a través de modelo de pseudo-primer orden descrito en la sección 4.5 en el que se expresa la velocidad de reacción en función del consumo de reactivos (ecuación 7).

Al sustituir la velocidad como el cambio de concentración en función del tiempo y generar una integral desde el tiempo cero al tiempo t de la ecuación se obtiene:

$$-\frac{dC}{dt} = k(C) \quad (11)$$

$$-\ln \frac{C_t}{C_0} = kt \quad (12)$$

Integrando la ecuación 11, se transforma en una ecuación lineal (ecuación 12) donde $-\ln \frac{C_t}{C_0}$ corresponde al eje de las ordenadas y t al eje de las abscisas, k es la constante cinética y se pudo calcular mediante la pendiente de la recta expresada en unidades de (tiempo⁻¹).

También se calculó el porcentaje de remoción de color al final de cada prueba, mediante la ecuación 13 en función de las concentraciones iniciales y finales de cada colorante.

$$\% \text{ de remoción de color} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (13)$$

Donde: C_0 es la concentración del color inicial en mg/L

C_t es la concentración del color en el tiempo que alcanzó su valor mínimo (mg/L)

10.7 Consumo Eléctrico

En cada prueba se midió la potencia requerida en Watts (W) del sistema aire-ozono durante el tiempo de ozonización para obtener el consumo por unidad de masa de colorante removido, cuando se ha eliminado más del 87% del color (ecuación 14):

$$\text{Consumo electrico} = \frac{\text{Potencia promedio} \times \text{tiempo}}{\text{masa inicial} - \text{masa final}} \times \frac{1}{60} \quad (14)$$

Donde el consumo eléctrico esta medido en KW-h/g de colorante removido

10.8 Demanda Química de Oxígeno

Con el fin de evaluar la eliminación de toda la materia oxidable en el proceso de ozonización, se midió el parámetro de demanda química de oxígeno (DQO) a la concentración inicial de colorante, y a la concentración final después del tratamiento. La determinación se realizó en un espectrómetro marca HACH®, modelo DR2800, mediante el método HACH 8000 del manual de análisis de calidad de agua versión en español y se calculó su porcentaje de eliminación (ecuación 15).

$$\% \text{ de eliminación de } DQO = \frac{DQO_0 - DQO_t}{DQO_0} \times 100\% \quad (15)$$

Donde: DQO_0 es la cantidad de oxígeno consumida en mg/L O_2 antes del tratamiento

DQO_t es la cantidad de oxígeno consumida en mg/L O_2 después del tratamiento

10.9 Colorante Directo Azul Ácido 9

Para la primera etapa de la investigación (debido a que se conoce su estructura) se utilizó un colorante directo Azul Ácido 9 (AA-9), la estructura de este colorante se encuentra en la figura 3, cuya fórmula química es: $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$, identificado con el código 42090 por el Color Index con peso molecular de 792.86 g/mol y de acuerdo a su clasificación química se puede encontrar dentro de los colorantes con grupo cromóforo trifenilmetano (Khataee & Khataee, 2008). De los colorantes reactivos (debido a que son mezclas de muchos colorantes) se desconocen sus combinaciones y estructuras moleculares.

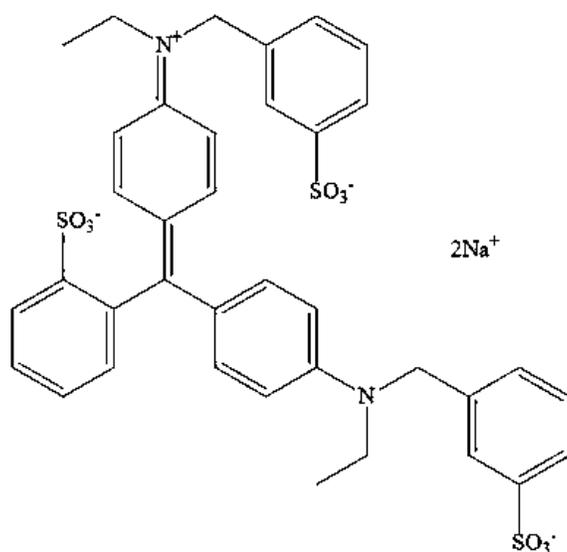


Figura 3 Estructura del Colorante Azul Ácido 9

Modificada en el programa ChemDraw Fuente: Jaramillo, A. C., Echavarría, A. M., & Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia*, 75-91.

Uno de los principales objetivos de todo método de tratamiento es la mineralización completa de los componentes, alcanzando su descomposición total, de tal manera que fue indispensable evaluar no solo la remoción de color, sino de toda la materia oxidable que se generan a partir de la ruptura de la molécula orgánica. Como se conoce la molécula y se espera la mineralización completa se puede tener un aproximado de cuánto ozono se está inyectando al sistema. La primera parte del proceso se basa en la oxidación directa, donde el ozono se descompone en oxígeno molecular y un radical de oxígeno (reacción 19), este radical de oxígeno reaccionara con el colorante (reacción 20) obteniendo así una reacción global balanceada (reacción 21), por cada mol de colorante se

necesitan 100 moles del radical oxígeno (O^\bullet) proveniente del ozono para alcanzar la mineralización completa.



10.10 Colorantes Reactivos

Se tomaron dos tipos de colorante reactivos, amarillo y azul cuyos nombres comerciales son Remazol Amarillo RR GRAN (RA RR) y Procion Azul H-ERD (PA H-ERD) respectivamente, obtenidos de la casa comercial DyStar. Se tomaron dos de los tres colorantes primarios pues de la combinación (tricomía) de estos nace la gama de infinidad de matices y tonalidades requeridas en los procesos textiles.

10.11 Remoción del Colorante Directo AA-9 y Colorantes Reactivos RA RR y PA H-ERD

En estos experimentos se planteó la masa de colorante en dos niveles, tomando un rendimiento de fijación de los colorantes de 80-90% lo que significa que del 10-20% quedan en solución en el agua y, son los responsables de la presencia del color en las aguas residuales. Debido a que los procesos de tinción se realizan a altas temperaturas, se incluyó el factor de temperatura. También se evaluó el flujo volumétrico de la bomba de aire en dos niveles, y el uso o no del empaque dentro del reactor descrito en la sección 10.1 y del cual va a depender el volumen y la concentración de la muestra. Los factores en dos niveles se describen en la siguiente tabla de los cuales se generó la matriz de experimentos.

Tabla 2 Factores para el Diseño del Experimento

Factores	Nivel 1	Nivel 2
Colorante (mg)	20.16	41.58
Temperatura (°C)	25	50
Flujo de la bomba (L/h)	1 (74.01)	2 (147.81)
Empaque	No	Si

En la tabla 3 se planteó el diseño del experimento con un arreglo ortogonal Taguchi L₈.

Tabla 3 Diseño Ortogonal Taguchi L₈ para la Remoción de los Colorantes

N° de Prueba	Color (mg)	Temperatura (°C)	Flujo de la bomba (L/h)	Empaque
1	20.16	25	1 (74.01)	No
2	20.16	25	2 (147.81)	Si
3	20.16	50	1 (74.01)	Si
4	20.16	50	2 (147.81)	No
5	41.58	25	1 (74.01)	Si
6	41.58	25	2 (147.81)	No
7	41.58	50	1 (74.01)	No
8	41.58	50	2 (147.81)	Si

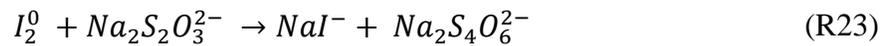
El proceso de ozonización se realizó por separado para cada colorante, se le dio seguimiento al cambio de concentración de color en función del tiempo para calcular su constante cinética de reacción, se tomó la concentración final de cada prueba y se determinó el porcentaje de remoción de color (ecuación 13), así como el cálculo del consumo energético de cada prueba (ecuación 14). Se realizó el análisis Taguchi en el software Minitab ® para conocer el factor de mayor influencia en el proceso y la mejor combinación de los factores. De cada experimento se tomó la mejor prueba y se determinó el porcentaje de eliminación de DQO (ecuación 15).

10.12 Coeficiente de Transferencia del Sistema Gas-Líquido

Los diseños experimentales para la remoción de colorantes, fueron planteados en experimentos ortogonales Taguchi L₈, con un total de 8 pruebas para cada colorante; cada prueba tiene características únicas de operación planteadas en la tabla 3, para el cálculo del coeficiente solo se tomaron en cuenta, los parámetros de temperatura, flujo de la bomba y el uso o no de empaque en

el reactor. Dado que el sistema está compuesto por las fases gas-líquido, se estudió el efecto de la variación de estos parámetros en el fenómeno de transporte de masa que existe entre ambas fases. Para determinar el coeficiente de transferencia global de masa que determina el fenómeno de transporte es necesario conocer las concentraciones del ozono disuelto en el líquido.

La concentración de ozono en el líquido se determinó mediante el Método Yodométrico, en el cual se produce la reacción de Ozono en presencia de Yoduro de Potasio al 3% P/V para formar Yodo Diatómico (reacción 22). El yodo producto de la reacción fue valorado con Tiosulfato de Sodio estandarizado mediante el método estándar AOAC Official Method 993.20 (reacción 23).



De esta manera se pudo calcular la concentración de yodo formado mediante la titulación con tiosulfato de sodio (ecuación 16).

$$C_{I_2} = \frac{N_{Na_2S_2O_3} * V_{gastado}}{V_{muestra}} * \frac{126.9 \text{ g}}{1 \text{ eq}} * \frac{1 \text{ mol}}{253.5 \text{ g}} \quad (16)$$

Donde: C_{I_2} es la concentración de I_2 formado y esta expresada en mol/L de solución, utilizando el peso equivalente y el peso molecular del yodo.

Mediante la estequiometria de la reacción 22 se calculó la concentración de ozono que se está suministrando al sistema hasta alcanzar la saturación en determinado tiempo calculada mediante la ecuación 17.

$$C_{O_3} = C_{I_2} * \frac{1 \text{ mol de } O_3}{1 \text{ mol de } I_2} * \frac{48 \text{ g}}{1 \text{ mol}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \quad (17)$$

Donde: C_{O_3} es la concentración de O_3 que se solubilizó en el agua y reaccionó con el yoduro de potasio para formar yodo y esta expresada en mg/L.

Una vez determinadas las concentraciones de ozono en el líquido en función del tiempo hasta la saturación, se calculó el coeficiente global de transferencia de masa mediante el modelo

matemático planteado en la sección 4.6, en donde se expresa el transporte de masa en función de las concentraciones (ecuación 10).

Si se multiplica el coeficiente de transferencia por el área interfacial por unidad de volumen y expresamos la transferencia de masa por unidades de tiempo (ecuación 18), obtenemos una expresión matemática en términos de la tasa de transferencia del gas respecto del tiempo, el coeficiente global de transferencia de masa y la diferencia de concentraciones (ecuación 19):

$$N_A = \frac{dM}{dt} = K_L a V (C_A^* - C_{A,L}) \quad (18)$$

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_A^* - C_{A,L}) \quad (19)$$

Donde $\frac{dC}{dt}$ es la velocidad de transferencia de ozono en el agua en mg/L min

$K_L a$ es el coeficiente global de transferencia de masa en min^{-1}

C_A^* es la concentración de ozono disuelto a saturación mg/L

$C_{A,L}$ es la concentración de ozono disuelto en el líquido mg/L

Integrando la ecuación 19 obtenemos una expresión matemática con la forma de una ecuación lineal.

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C_A^* - C} = K_L a \int_0^t dt \quad (20)$$

$$\ln \frac{C_A^* - C_0}{C_A^* - C} = K_L a t \quad (21)$$

Donde $\ln \frac{C_A^* - C_0}{C_A^* - C}$ corresponde al eje de las ordenadas; t al eje de las abscisas y $K_L a$ se obtuvo a través del cálculo de la pendiente de la recta.

11 Resultados y Análisis

11.1 Aire-Ozonizador

La evaluación del flujo volumétrico de salida en el sistema aire-ozonizador, tomado en dos puntos de la bomba de aire se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Flujo de la Mezcla Aire-Ozonizador Suministrada al Sistema

	Punto 1	Punto 2
Tiempo (s):	36.42	18.82
	39.69	19.51
	38.86	20.08
	40.68	19.53
Promedio (s)	38.91	19.49
Flujo (mL/s)	20.56	41.06
Flujo (L/h)	74.01	147.81

En la tabla de resultados se observa que a medida que se ajusta el flujo de la bomba va creciendo el flujo volumétrico de aire-ozono que se está inyectando al sistema, debido a que se requiere de menor tiempo para desplazar los 800 mL de agua; en el punto 1 se tiene un flujo volumétrico de 74.01 L/h con un diámetro de burbuja de 4-5 mm y en el punto 2 un flujo de 147.81 L/h con un diámetro de burbuja de 7-8 mm.

11.2 Espectro y Curva de Calibración del Colorante Directo AA-9

En la figura 4 se observan los resultados de los espectros a las diferentes concentraciones del colorante Azul Ácido 9 (AA-9), en los cuales se presentan las siguientes bandas de absorción, a 630 nm se obtiene en pico máximo de absorción, en el orden de los 560 nm se observa un hombro dentro del espectro y a 420 nm se observa un pico de absorción secundario.

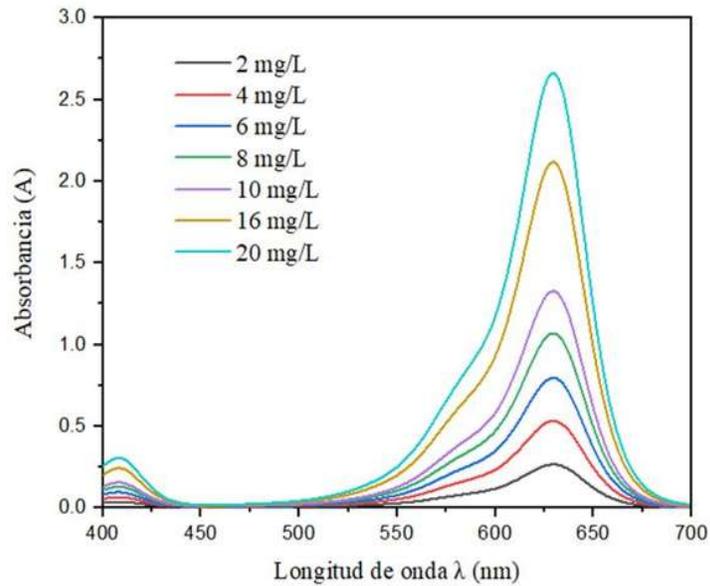


Figura 4 Espectro de Colorante Azul Ácido 9 a Diferentes Concentraciones

La curva de calibración fue generada considerando las absorbancias a 630 nm (la longitud de onda de máxima absorción) a diferentes concentraciones de colorante, en donde se observa un comportamiento lineal, debido a que las concentraciones utilizadas para la correspondiente curva, se encuentran dentro de la Ley de Lambert-Beer (figura 5).

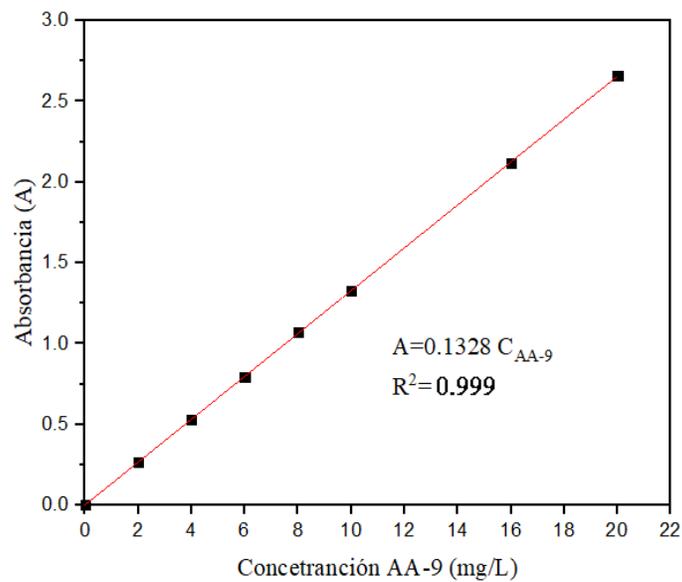


Figura 5 Curva de Calibración de Colorante Azul Ácido 9

De la figura 5 se generó la línea de tendencia, obteniendo un coeficiente de regresión de 0.999 y la ecuación de la línea de tendencia donde $A=0.1328C_{AA-9}$ mediante esta ecuación se puede calcular de manera indirecta la concentración del colorante remanente durante el proceso de oxidación avanzada (ecuación 22).

$$C_{AA-9} = \frac{\text{Absorbancia}}{0.1328} \quad (22)$$

Donde la concentración queda expresada en mg/L.

11.3 Resultados de la Remoción del Colorante Directo

11.3.1 Colorante Azul Ácido 9

Las pruebas del experimento para la remoción del colorante AA-9 se realizaron por duplicado, en las siguientes tablas se muestran los cambios en la concentración en función del tiempo, así como la desviación estándar muestral para cada prueba. En la tabla 5 para las pruebas 1, 2, 3 y 4 y en la tabla 6 para las pruebas 5, 6, 7 y 8.

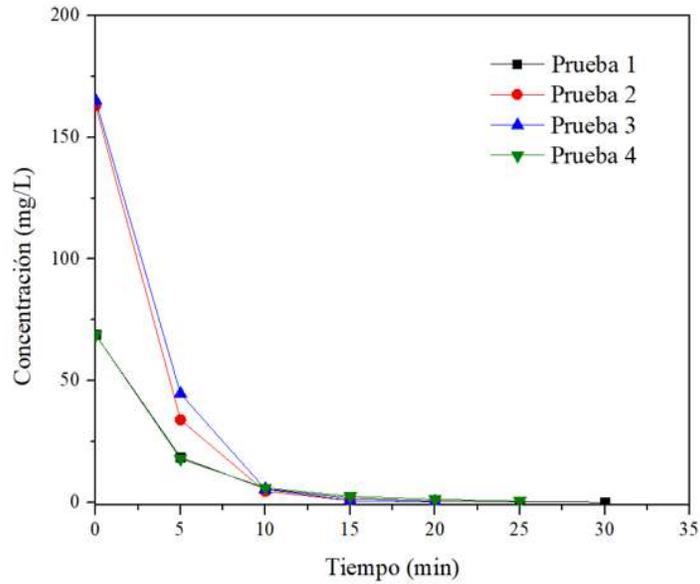
Tabla 5 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante AA-9)

Tiempo (min)	Prueba 1 Concentración (mg/L)	Prueba 2 Concentración (mg/L)	Prueba 3 Concentración (mg/L)	Prueba 4 Concentración (mg/L)
0	68.89 +/- 0.0027	163.00 +/- 0.0339	165.13 +/- 0.0060	68.82 +/- 0.0011
5	18.55 +/- 0.0105	33.99 +/- 0.0729	44.71 +/- 0.1093	17.97 +/- 0.0445
10	5.63 +/- 0.0068	4.62 +/- 0.0123	5.49 +/- 0.0308	6.04 +/- 0.0042
15	1.82 +/- 0.0007	0.82 +/- 0.0030	0.83 +/- 0.0050	2.59 +/- 0.0025
20	0.61 +/- 0.0012	0.17 +/- 0.0001	0.19 +/- 0.0001	1.33 +/- 0.0001
25	0.34 +/- 0.0022	-	-	0.71 +/- 0.0013
30	0.13 +/- 0.0005	-	-	-

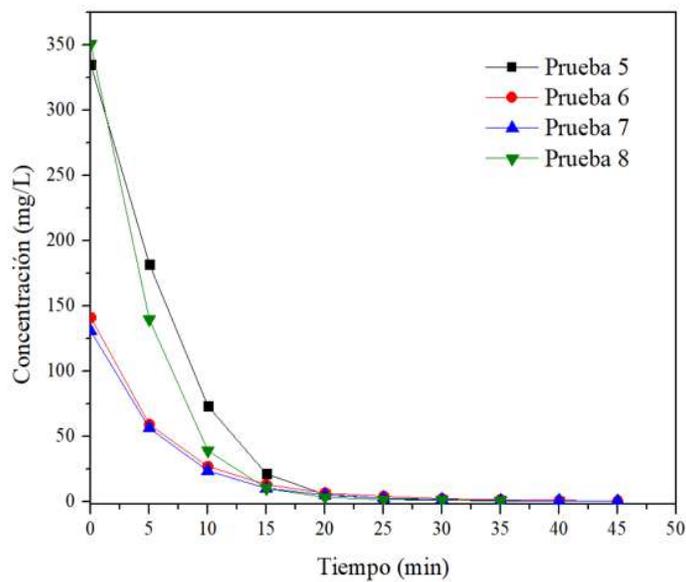
Tabla 6 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante AA-9)

Tiempo (min)	Prueba 5 Concentración (mg/L)	Prueba 6 Concentración (mg/L)	Prueba 7 Concentración (mg/L)	Prueba 8 Concentración (mg/L)
0	334.93 +/- 0.0724	141.10 +/- 0.0151	130.65 +/- 0.1042	350.72 +/- 0.0155
5	182.12 +/- 0.0255	59.09 +/- 0.0569	56.24 +/- 0.0208	139.58 +/- 0.0894
10	73.31 +/- 0.0186	26.95 +/- 0.0579	23.65 +/- 0.0624	38.97 +/- 0.0494
15	21.32 +/- 0.0084	13.06 +/- 0.0388	10.11 +/- 0.0432	10.00 +/- 0.0174
20	5.45 +/- 0.0063	6.54 +/- 0.0136	5.02 +/- 0.0240	3.28 +/- 0.0091
25	2.46 +/- 0.0080	4.09 +/- 0.0126	2.54 +/- 0.0139	1.55 +/- 0.0071
30	1.09 +/- 0.0041	2.22 +/- 0.0075	1.55 +/- 0.0108	1.13 +/- 0.0052
35	0.55 +/- 0.0016	1.44 +/- 0.0095	0.79 +/- 0.0062	0.34 +/- 0.0002
40	0.15 +/- 0.0002	0.91 +/- 0.0023	0.67 +/- 0.0081	-
45	-	0.50 +/- 0.0018	0.46 +/- 0.0151	-

Las curvas se presentan en las siguientes figuras. La figura 6 a) incluye las curvas de remoción del colorante en función del tiempo para las pruebas de la 1 a la 4 donde la masa inicial es en el nivel 1 (20.16 mg) y la figura 6 b) para las pruebas de la 5 a la 8 donde la masa inicial es el nivel 2 (41.58 mg). En las cuales se observa un incremento en el tiempo para las pruebas con la masa inicial en el nivel 2 respecto a las pruebas con masa inicial en el nivel 1. Se observa que en las pruebas donde se utilizó empaque (2, 3, 5 y 8) el tiempo es menor respecto a las pruebas donde no se utilizó empaque. El menor tiempo de remoción de color para las pruebas con masa inicial en el nivel 1, fue de 20 min para las pruebas 2 y 3 con una concentración final de 0.17 mg/L y 0.19mg/L, respectivamente; seguido de la prueba 4 con tiempo de 25 min y concentración final de 0.71 mg/L y finalmente la prueba 1, con un tiempo de 30 min y una concentración final de 0.13 mg/L. Para las pruebas con la masa inicial en el nivel 2, el menor tiempo lo obtuvo la prueba 8, con 35 min y concentración final de 0.34 mg/L; en segundo lugar, la prueba 5, con 40 min y concentración final de 0.15 mg/L, finalmente las pruebas 6 y 7 con 45 min y concentraciones finales de 0.50 mg/L y 0.46 mg/L, respectivamente.



a)

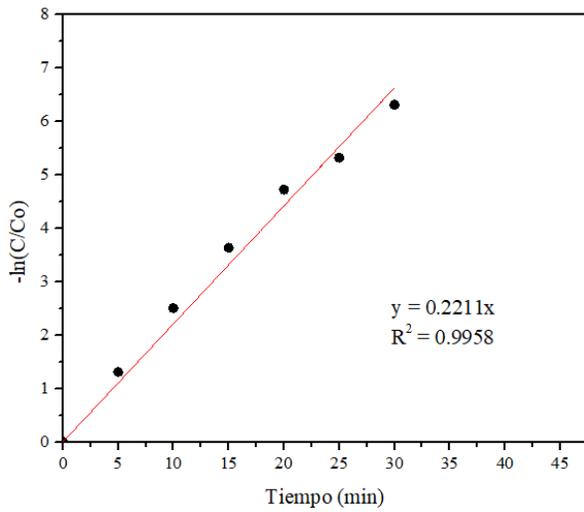


b)

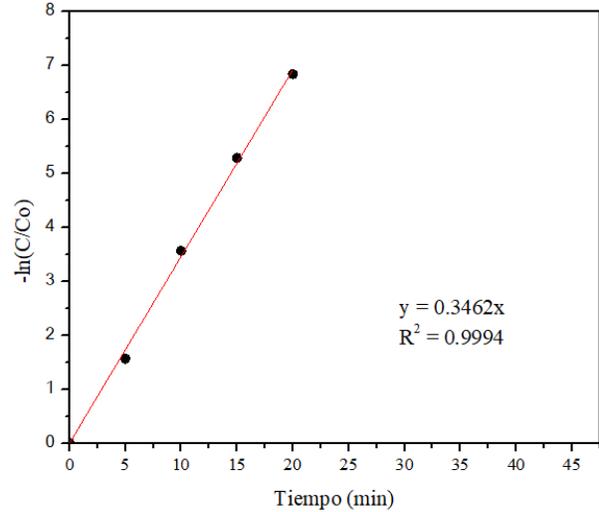
Figura 6 Curvas de Remoción de Color a) Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 1 (20.16 mg) y b) Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 2 (41.58)

Las curvas de remoción del colorante para cada prueba del experimento ortogonal L_8 (figura 6) tienen un comportamiento no lineal y en las figuras 7 y 8 las curvas se ajustan a un modelo de tipo

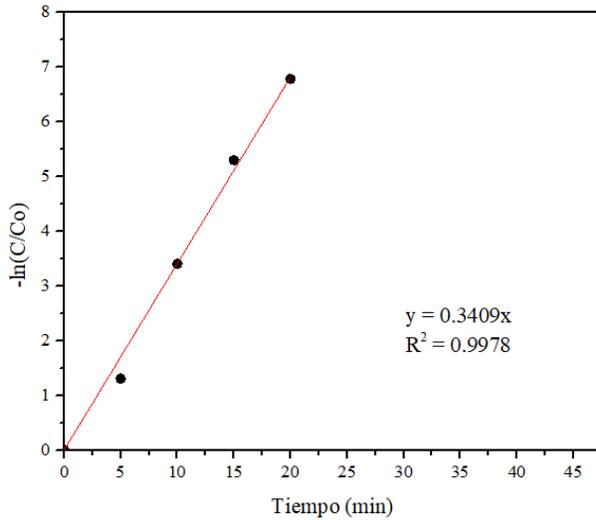
logarítmico con cinética de reacción de pseudo-primer orden, para cada prueba con coeficientes de regresión superiores a 0.9897.



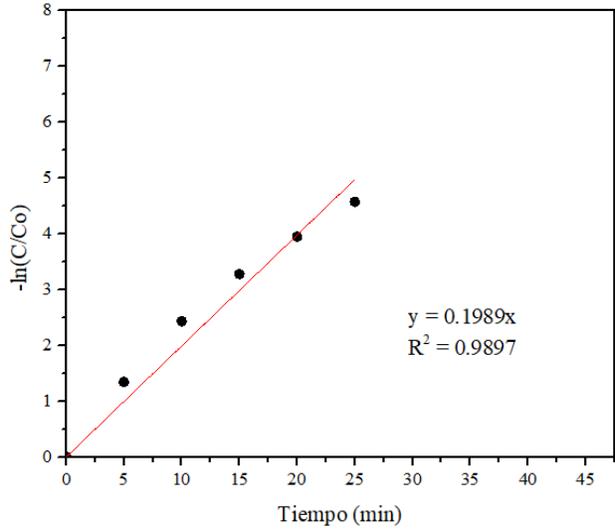
a)



b)

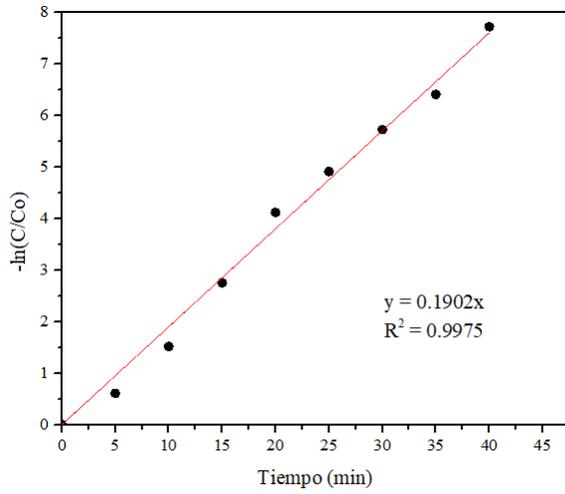


c)

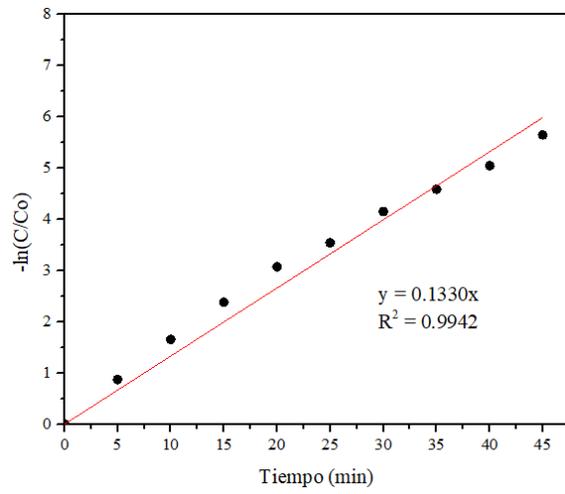


d)

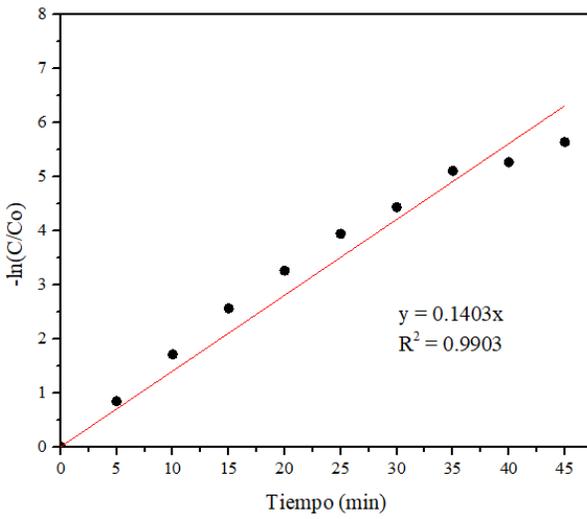
Figura 7 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 1 (20.16 mg)
a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4



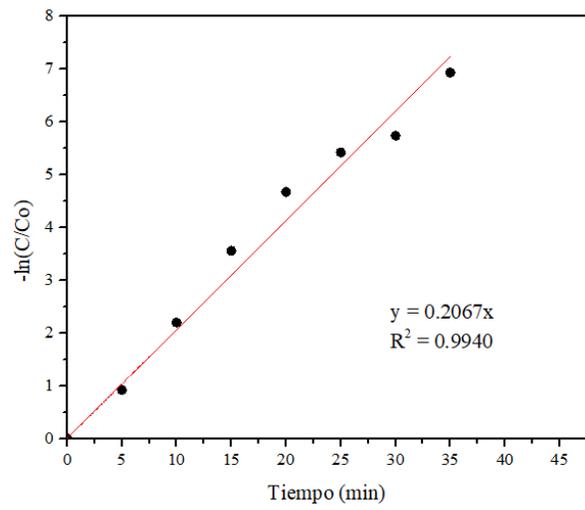
a)



b)



c)



d)

Figura 8 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante AA-9 en el Nivel 2 (41.58 mg)
a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8

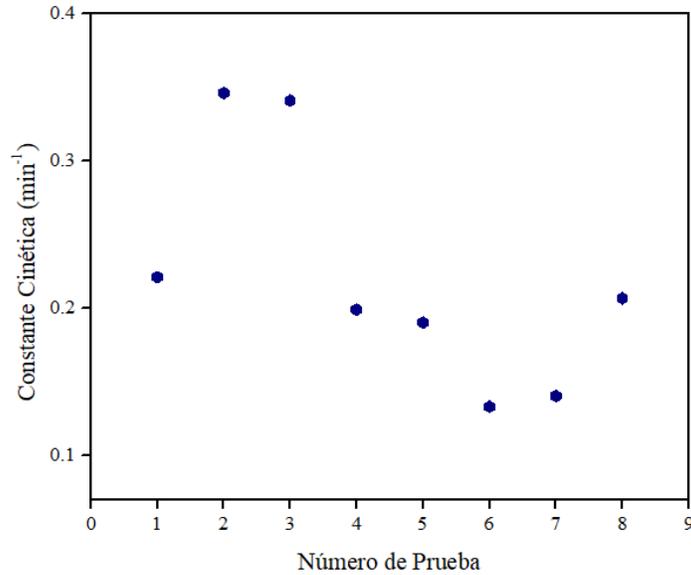


Figura 9 Constantes Cinéticas para Cada Prueba del Experimento (Colorante AA-9)

En la figura 9 se grafican las constantes cinéticas en función del número de prueba. Las primeras cuatro corresponden a la masa inicial de colorante de 20.16 mg, donde la mejor prueba es la **2** con flujo de la bomba en el punto 2 (147.81 L/h), uso de empaque y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.3462 min⁻¹; seguida de la prueba **3**, con flujo de la bomba en el punto 1 (74.01 L/h), con empaque y una temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.3409 min⁻¹; luego la prueba **1** con flujo 1, sin empaque y una temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.2211 min⁻¹ y finalmente la prueba **4** con flujo 2, sin empaque, y una temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.1989 min⁻¹. En el caso de las cuatro pruebas restantes donde la masa inicial del colorante es 41.58 mg, la mejor prueba fue la prueba **8** con un flujo de la bomba en el punto 2, con empaque y una temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.2067 min⁻¹; seguida por la prueba **5** con flujo 1, con empaque y una temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.1902 min⁻¹; luego la prueba **7**, con flujo de la bomba en el nivel 1, sin empaque y una temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.1403 min⁻¹; finalmente la prueba **6**, con flujo 2, sin empaque y una temperatura de 25°C, con constante cinética de 0.1330 min⁻¹.

En la tabla 7 se presenta un resumen de las concentraciones iniciales de cada prueba, en donde la concentración varía de acuerdo al uso o no del empaque como se explica en la sección 10.1, el tiempo de cada prueba, así como la concentración y la masa del colorante remanente al final del proceso de ozonización. Se observa que la tendencia de las concentraciones y las masas finales

son menores para las pruebas donde la masa inicial del colorante es menor, obteniendo los mejores porcentajes de remoción en menos de 30 min.

Tabla 7 Parámetros Medidos para el Arreglo Ortogonal L_8 (Colorante AA-9)

N° de Prueba	Volumen de la solución (L)	C_0 (mg/L)	Tiempo (min)	C_t (mg/L)	Remoción de color (%)	Masa Final de colorante (mg)
1	0.3	67.2	30	0.13	99.82	0.0375
2	0.126	160	20	0.17	99.89	0.0220
3	0.126	160	20	0.19	99.89	0.0236
4	0.3	67.2	25	0.71	98.97	0.2134
5	0.126	330	40	0.15	99.96	0.0186
6	0.3	138.6	45	0.50	99.65	0.1491
7	0.3	138.6	45	0.46	99.64	0.1394
8	0.126	330	35	0.34	99.90	0.0432

Los resultados del experimento se sometieron a un análisis Taguchi en el software Minitab ® en donde se utilizó la constante cinética como variable de respuesta (tabla 8), con la relación señal ruido de: más grande es mejor. En la figura 10 se muestra el nivel de impacto de los factores en el proceso de decoloración.

Tabla 8 Diseño Taguchi L_8 con su Variable Respuesta (Colorante AA-9)

N° de Prueba	Masa de Colorante (mg)	Temperatura (°C)	Flujo de la bomba (L/h)	Empaque	Cinética (min^{-1})
1	20.16	25	1 (74.01)	No	0.2211
2	20.16	25	2 (147.81)	Si	0.3462
3	20.16	50	1 (74.01)	Si	0.3409
4	20.16	50	2 (147.81)	No	0.1989
5	41.58	25	1 (74.01)	Si	0.1902
6	41.58	25	2 (147.81)	No	0.1330
7	41.58	50	1 (74.01)	No	0.1403
8	41.58	50	2 (147.81)	Si	0.2067

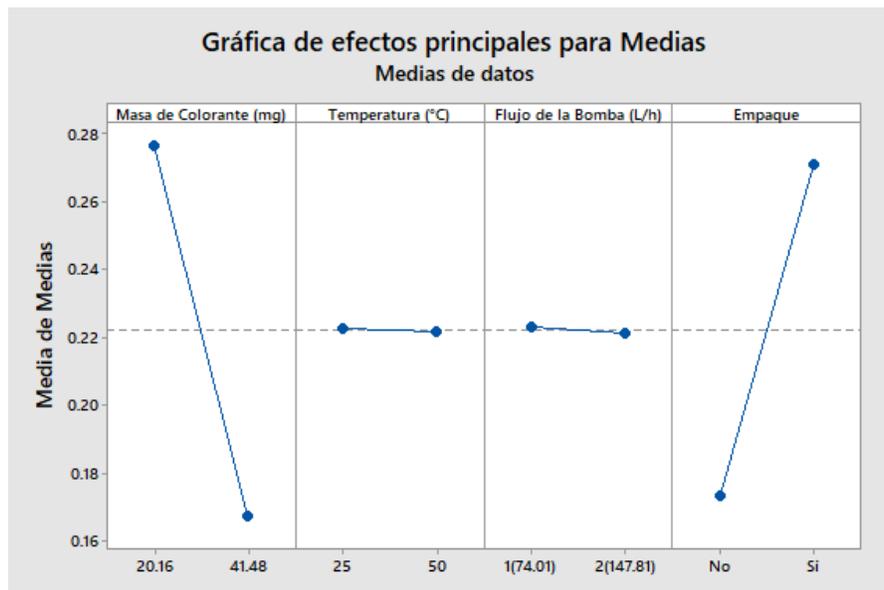


Figura 10 Gráfica de Efectos Principales para Medias (Colorante AA-9)

De acuerdo con el gráfico de efectos principales, la masa de colorante (20.26 mg) es el factor que presenta mayor impacto, por estar relacionado a la cantidad de colorante a degradar; en segundo lugar, se encuentra el uso de empaque que aumenta el área de contacto y la distancia del recorrido del gas en el líquido; quedando en última posición y con el mismo nivel de impacto a la temperatura (25 °C) del sistema y el flujo de la bomba (74.01 L/h).

En la tabla 9 se presenta la constante cinética en orden decreciente para el análisis de significancia de los factores para el colorante directo AA-9

Tabla 9 Constante Cinética en Orden Decreciente y Factores del Diseño L_8 (Colorante AA-9)

N° de Prueba	Constante Cinética (min^{-1})	Masa inicial de colorante (mg)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Flujo de la Bomba (L/h)	Empaque
2	0.3462	20.16	25	2 (147.81)	Si
3	0.3409	20.16	50	1 (74.01)	Si
1	0.2211	20.16	25	1 (74.01)	No
8	0.2067	41.58	50	2 (147.81)	Si
4	0.1989	20.16	50	2 (147.81)	No
5	0.1902	41.58	25	1 (74.01)	Si
7	0.1403	41.58	50	1 (74.01)	No
6	0.1330	41.58	25	2 (147.81)	No

De acuerdo con los valores de las constantes cinéticas obtenidas de las pruebas experimentales y con base en el análisis de efectos principales para medias, en la prueba 2 se obtuvo el mayor valor de 0.3462 min^{-1} , esto es debido a que se tiene menor masa de colorante (efecto 1), uso de empaque en el reactor (efecto 2), temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y aunque el flujo es el nivel 2, es uno de los factores con menos influencia en el proceso. La prueba 6 fue la prueba de la menor constante cinética con un valor de 0.1330 min^{-1} debido a que se tiene mayor masa de colorante a degradar (efecto 1), no se usó empaque en el reactor (efecto 2), temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y el flujo en el nivel 2, demostrando que los factores de masa de colorante y uso de empaque son los de mayor significancia en el proceso.

De estos experimentos se tomó la mejor prueba en función de la constante cinética (prueba 2) y se le hizo análisis de DQO al inicio y al final del proceso y se calculó el porcentaje de DQO (ecuación 15), eliminando el 48.23% de la demanda química de oxígeno (materia oxidable). De este parámetro se puede deducir que el ozono está atacando las moléculas de colorante en el grupo cromóforo trifenilmetano, pero no alcanza la mineralización completa de la molécula y por esa razón hay materia que está demandando oxígeno para ser oxidada.

Finalmente se realizó el cálculo del consumo energético (ecuación 14) para la producción de ozono en cada prueba (tabla 10).

Tabla 10 Consumo Eléctrico por Cada Gramo de Colorante AA-9 Removido

N° de Prueba	Tiempo (min)	Potencia requerida (W)	Consumo eléctrico (KW-h/g de colorante)
1	30	10.51	0.2612
2	20	13.25	0.2193
3	20	10.41	0.1723
4	25	13.39	0.2797
5	40	10.96	0.1758
6	45	13.86	0.2509
7	45	10.10	0.1828
8	35	13.72	0.1927

En la tabla 10, se observa que el consumo promedio de las primeras cuatro pruebas (0.2331 KW-h/g) es más alto, respecto a las últimas cuatro (0.2005 KW-h/g) a pesar de que la masa es casi el

doble, no todos los tiempos se duplican al aumentar la cantidad de colorante a degradar, es decir que el consumo eléctrico se ve ligeramente afectado al aumentar la masa de colorante. En función del consumo energético la mejor prueba es la 3, con un consumo de 0.1723 KW-h/g de colorante removido, esta prueba tiene el puesto número dos de las ocho pruebas del experimento en función de las constantes cinéticas con un valor de 0.3409 min^{-1} .

11.4 Espectro y Curva de Calibración de Colorantes Reactivos

En la figura 11 a) se presenta el espectro de absorción para el colorante Remazol Amarillo RR GRAN (RA RR) a diferentes concentraciones, en el que se observa que el pico máximo de absorción es a los 419 nm. En la figura 11 b) se presenta el espectro de absorción para el colorante Procion Azul H-ERD (PA H-ERD) a diferentes concentraciones, en éste se observa que en el orden de 615 nm se presenta el pico máximo de absorción.

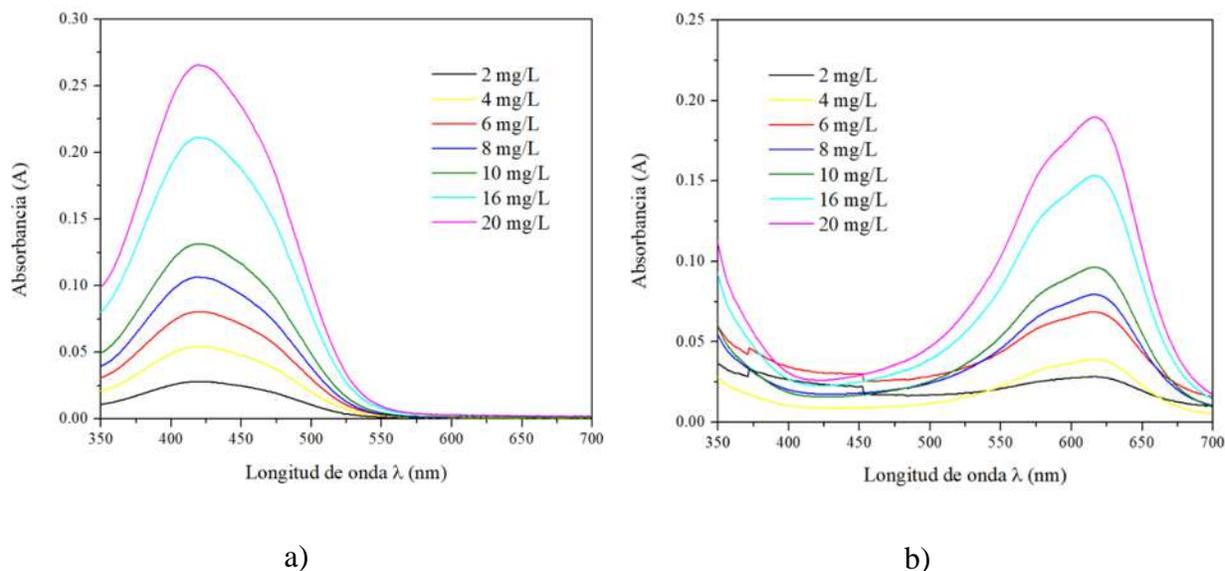
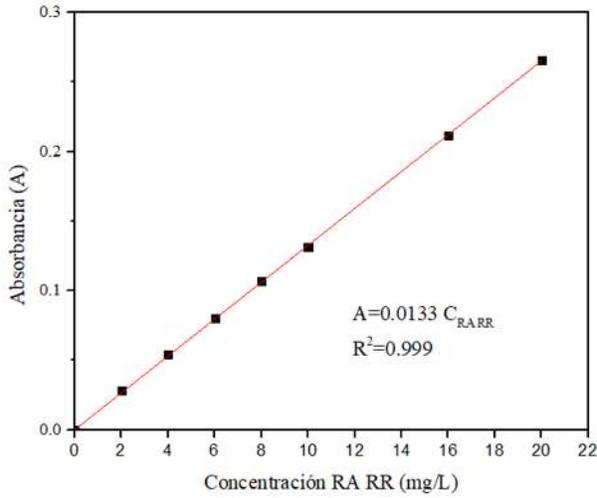
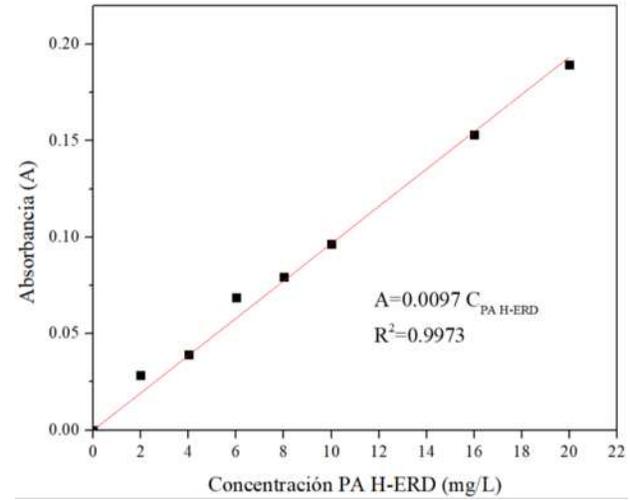


Figura 11 Espectros de Colorantes Reactivos
a) Remazol Amarillo RR GRAN y b) Procion Azul H-ERD

Las curvas de calibración se generaron considerando las absorbancias en los puntos máximos de las diferentes concentraciones para cada colorante. Las gráficas tienen un comportamiento lineal, indicando que las concentraciones utilizadas se encuentran dentro de la Ley de Lambert-Beer (figura 12).



a)



b)

Figura 12 Curva de Calibración de Colorante a) Remazol Amarillo RR GRAN y b) Proción Azul H-ERD

Se generó la línea de tendencia para cada curva (figura 12 a) y b)), obteniendo la ecuación de la línea de tendencia donde $A=0.0133C_{RA\ RR}$ con un coeficiente de regresión de 0.999 para el colorante RA RR y donde $A=0.0097C_{PA\ H-ERD}$ con un coeficiente de regresión de 0.9973 para el colorante PA H-ERD. De esta manera se puede calcular la concentración del colorante remanente durante y después del proceso de ozonización (Ecuación 23 y 24)

Para el colorante Remazol Amarillo RR GRAN

$$C_{RA\ RR} = \frac{\text{Absorbancia}}{0.0133} \quad (23)$$

Donde la concentración queda expresada en mg/L.

Para el colorante Proción Azul H-ERD.

$$C_{PA\ H-ERD} = \frac{\text{Absorbancia}}{0.0097} \quad (24)$$

Donde la concentración queda expresada en mg/L.

11.5 Resultados de la Remoción de los Colorantes Reactivos

11.5.1 Colorante Remazol Amarillo RR GRAN

Las pruebas del experimento para el colorante RA RR se realizaron por duplicado, el cambio en la concentración en función del tiempo y la desviación estándar muestral se presentan en las siguientes tablas. En la tabla 11 para las pruebas de la 1 a la 4 y en la tabla 12 para las pruebas de la 5 a la 8.

Tabla 11 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante RA RR)

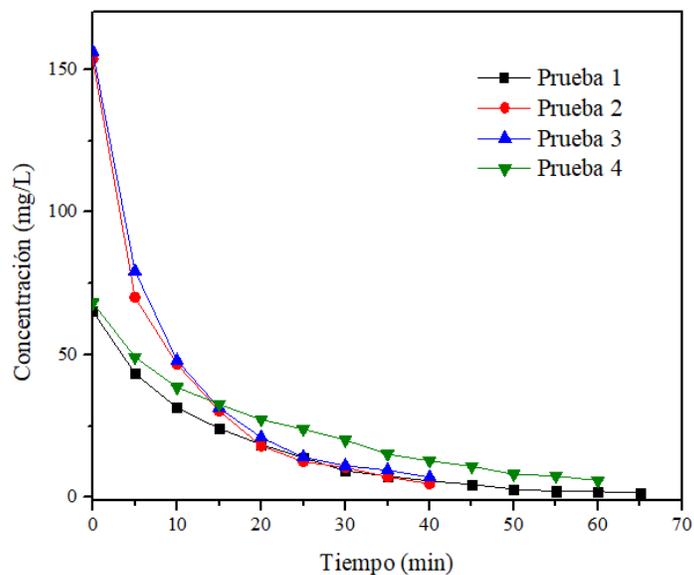
Tiempo (min)	Prueba 1 Concentración (mg/L)	Prueba 2 Concentración (mg/L)	Prueba 3 Concentración (mg/L)	Prueba 4 Concentración (mg/L)
0	65.23 +/- 0.0003	153.62 +/- 0.0076	156.20 +/- 0.0037	68.20 +/- 0.0070
5	43.47 +/- 0.0058	70.13 +/- 0.0174	79.33 +/- 0.0092	49.19 +/- 0.0040
10	31.42 +/- 0.0110	46.70 +/- 0.0080	48.00 +/- 0.0051	38.62 +/- 0.0058
15	24.18 +/- 0.0154	30.33 +/- 0.0046	31.33 +/- 0.0052	32.63 +/- 0.0027
20	18.52 +/- 0.0145	18.04 +/- 0.0022	21.05 +/- 0.0028	27.31 +/- 0.0024
25	13.93 +/- 0.0133	12.55 +/- 0.0012	14.08 +/- 0.0037	23.91 +/- 0.0001
30	9.35 +/- 0.0099	10.47 +/- 0.0004	11.08 +/- 0.0016	20.12 +/- 0.0012
35	7.49 +/- 0.0089	7.24 +/- 0.0015	9.54 +/- 0.0026	15.15 +/- 0.0028
40	5.75 +/- 0.0067	4.81 +/- 0.0039	7.05 +/- 0.0008	12.81 +/- 0.0010
45	4.55 +/- 0.0048	-	-	10.89 +/- 0.0011
50	2.93 +/- 0.0016	-	-	8.13 +/- 0.0017
55	2.16 +/- 0.0017	-	-	7.57 +/- 0.0004
60	2.08 +/- 0.0008	-	-	5.90 +/- 0.0005
65	1.56 +/- 0.0003	-	-	-

Tabla 12 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante RA RR)

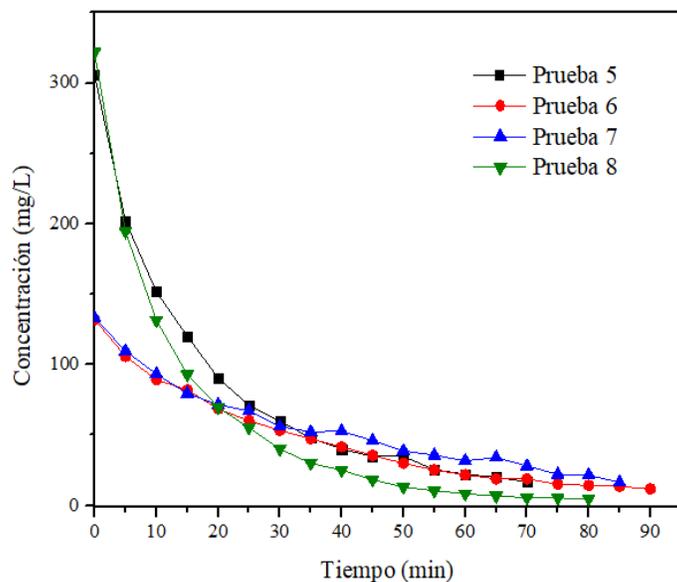
Tiempo (min)	Prueba 5 Concentración (mg/L)	Prueba 6 Concentración (mg/L)	Prueba 7 Concentración (mg/L)	Prueba 8 Concentración (mg/L)
0	305.92 +/- 0.0091	131.99 +/- 0.0011	133.18 +/- 0.0002	321.67 +/- 0.0097
5	201.90 +/- 0.0021	105.92 +/- 0.0001	109.63 +/- 0.0108	194.49 +/- 0.0106
10	151.74 +/- 0.0080	89.35 +/- 0.0011	93.38 +/- 0.0099	131.52 +/- 0.0288
15	120.05 +/- 0.0152	81.99 +/- 0.0092	79.52 +/- 0.0204	92.96 +/- 0.0251
20	90.57 +/- 0.0103	68.48 +/- 0.0013	71.46 +/- 0.0195	69.54 +/- 0.0176
25	70.98 +/- 0.0040	60.25 +/- 0.0051	67.12 +/- 0.0275	55.27 +/- 0.0129
30	59.94 +/- 0.0047	53.27 +/- 0.0031	56.08 +/- 0.0161	40.15 +/- 0.0085
35	47.92 +/- 0.0113	47.32 +/- 0.0039	52.24 +/- 0.0127	29.95 +/- 0.0133

40	40.05 +/- 0.0110	41.69 +/- 0.0053	52.82 +/- 0.0105	25.08 +/- 0.0087
45	34.78 +/- 0.0043	35.51 +/- 0.0039	45.97 +/- 0.0160	18.19 +/- 0.0053
50	34.87 +/- 0.0096	29.97 +/- 0.0058	38.81 +/- 0.0079	13.13 +/- 0.0053
55	25.40 +/- 0.0049	25.21 +/- 0.0035	35.70 +/- 0.0152	10.54 +/- 0.0060
60	22.16 +/- 0.0001	21.72 +/- 0.0044	31.65 +/- 0.0082	8.33 +/- 0.0046
65	20.07 +/- 0.0020	18.96 +/- 0.0039	34.08 +/- 0.0243	6.72 +/- 0.0036
70	16.84 +/- 0.0077	18.72 +/- 0.0013	28.06 +/- 0.0180	5.57 +/- 0.0043
75	-	15.12 +/- 0.0027	22.13 +/- 0.0074	5.35 +/- 0.0030
80	-	14.28 +/- 0.0000	21.50 +/- 0.0070	4.79 +/- 0.0011
85	-	13.49 +/- 0.0015	16.36 +/- 0.0034	-
90	-	11.75 +/- 0.0005	-	-

En la figura 13 a) se incluyen las curvas de remoción del colorante en función del tiempo para las pruebas de la 1 a la 4 donde la masa inicial es 20.16 mg (nivel 1). En la figura 13 b) se incluyen las curvas para las pruebas de la 5 a 8 donde la masa inicial de colorante es 41.58 mg (nivel 2). Se observa un aumento en el tiempo promedio de las curvas cuando la masa inicial es en el nivel 2 respecto del nivel 1 y un aumento en el tiempo en las pruebas en las que no se usa empaque (1, 4, 6 y 7) respecto de las pruebas donde sí se usa empaque en el reactor (2, 3, 5 y 8). Las pruebas con el menor tiempo en donde se alcanzó su máximo porcentaje de remoción fueron la 2 y 3 con concentraciones finales de 4.81 mg/L y 7.05 mg/L, respectivamente en un tiempo de 40 min; seguido de la prueba 4 con una concentración final de 5.90 mg/L en 60 min; en tercer lugar la prueba 1 con una concentración de 1.56 mg/L en 65 min; en cuarto lugar la prueba 5 con concentración final de 16.84 mg/L en un tiempo de 70 min; en quinto lugar la prueba 8 con concentración final de 4.79 mg/L en 80 min; seguido de la prueba 7 con una concentración final de 16.36 mg/L en 85 min y finalmente la prueba 6 con concentración final de 11.75 mg/L en 90 min.



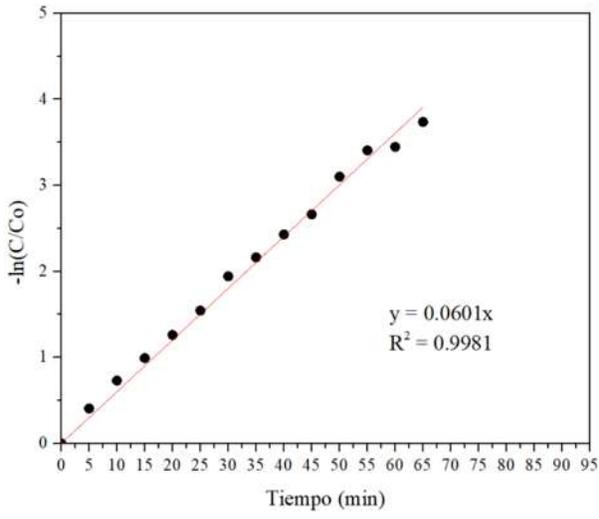
a)



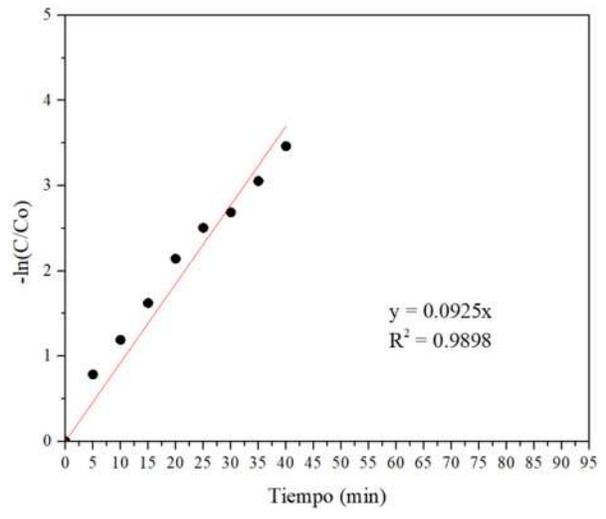
b)

Figura 13 Curvas de Remoción de Color a) Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 1 (20.16 mg) y b) Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 2 (41.58)

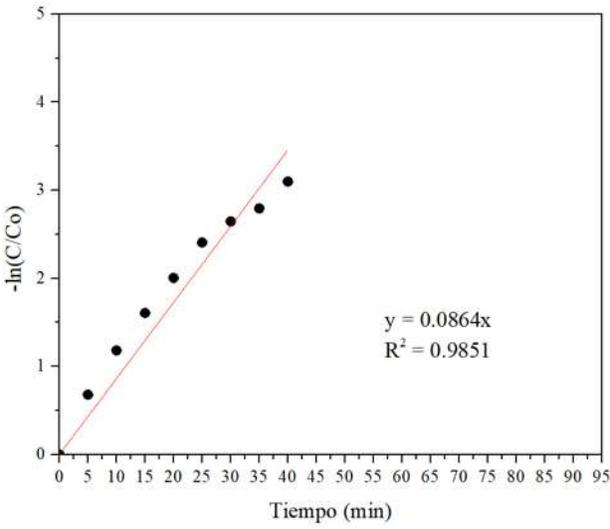
Las curvas se ajustan a un modelo de tipo logarítmico con una cinética de remoción del color de pseudo-primer orden para cada prueba del experimento con coeficientes de regresión superiores a 0.9851 (figura 14 y 15)



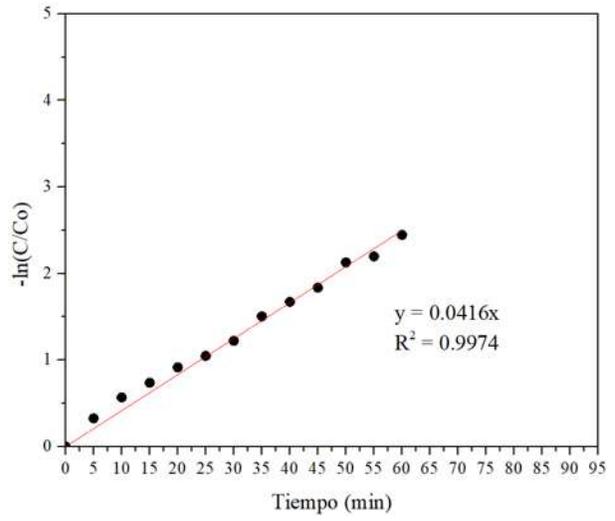
a)



b)

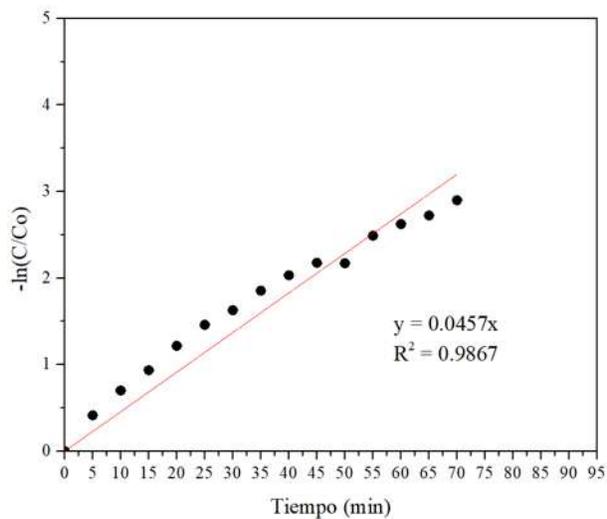


c)

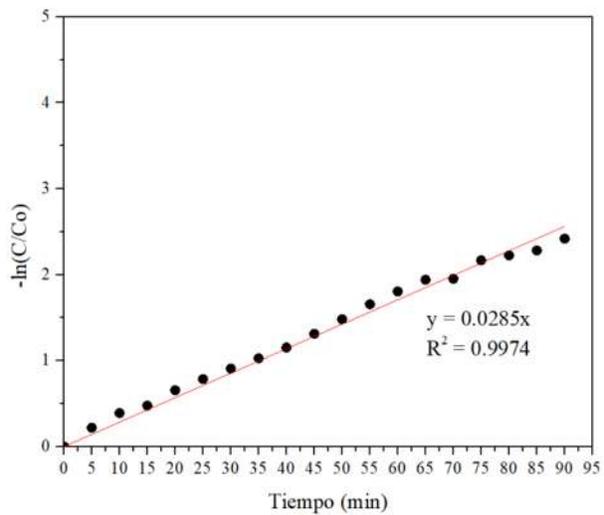


d)

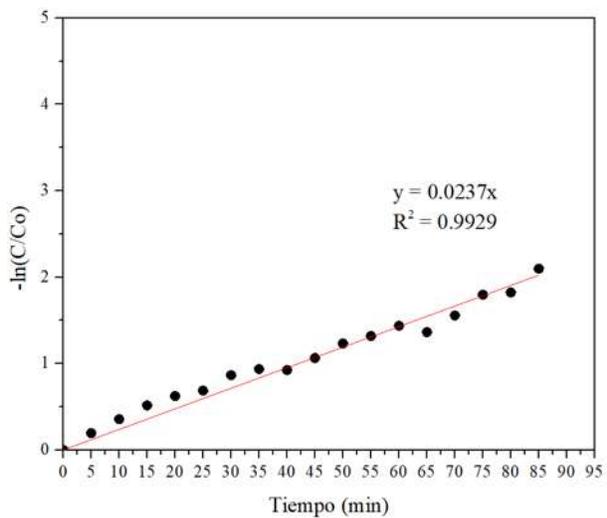
Figura 14 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 1 (20.16 mg)
a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4



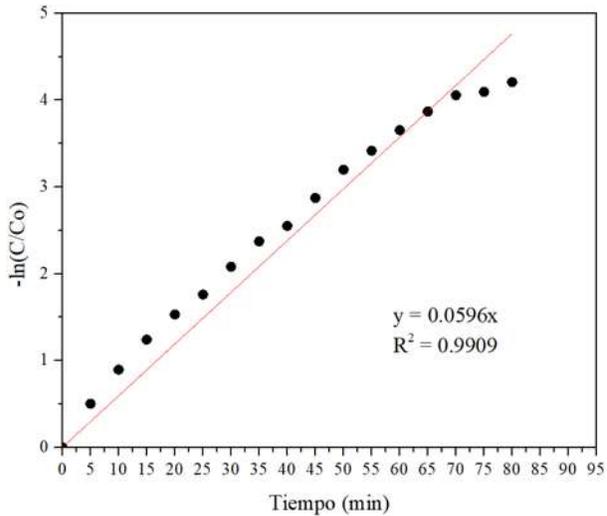
a)



b)



c)



d)

Figura 15 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante RA RR en el Nivel 2 (41.58 mg)
a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8

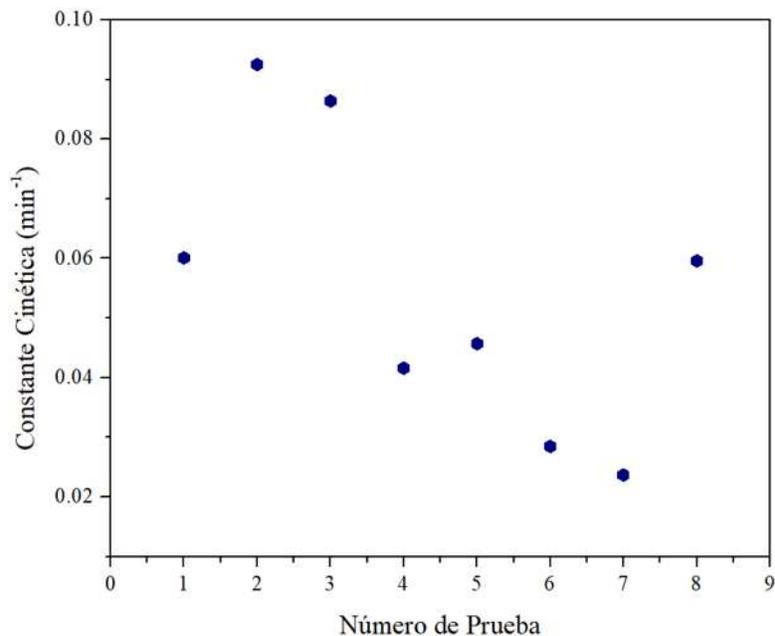


Figura 16 Constante Cinética para Cada Prueba del Experimento (Colorante RA RR)

En la figura 16 se observa que para las primeras cuatro pruebas con masa inicial de colorante de 20.16 mg; la de mejor prueba fue la **2** cuyos parámetros de operación fueron: flujo de la bomba en el punto 2 (147.81 L/h), uso de empaque en el reactor y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.0925 min⁻¹; en segundo lugar la prueba **3**, con flujo de la bomba en el punto 1 (74.01 L/h), uso de empaque y temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.0864 min⁻¹; en tercer lugar la prueba **1**, con flujo de la bomba en el punto 1, sin empaque en el reactor y temperatura de reacción de 25 °C, con constante cinética de 0.0601 min⁻¹; finalmente la prueba **4**, con flujo en el punto 2, sin empaque y temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.0416 min⁻¹. Para las pruebas donde la masa inicial de colorante es 41.58 mg; la mejor prueba fue la **8** con flujo de la bomba en el punto 2, uso de empaque en el reactor y temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.0596 min⁻¹; en segundo lugar la prueba **5**, con flujo en el punto 1, uso de empaque y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.0457 min⁻¹; en tercer lugar la prueba **6**, con flujo en el punto 2, sin empaque y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.0285 min⁻¹ y en cuarto lugar la prueba **7**, con flujo en el punto 1, sin empaque y temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.0237 min⁻¹.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las concentraciones iniciales y finales, en las que se tienen porcentajes de remoción desde 87.71% hasta el 98.51%. Se observa que las pruebas con masa inicial en el nivel 1 (20.16 mg) presentan menor tiempo de reacción y porcentajes de remoción de color relativamente superiores a las otras cuatro donde la masa inicial es en el nivel 2 (41.58 mg).

Tabla 13 Parámetros Medidos para el Arreglo Ortogonal L_8 (Colorante RA RR)

Nº de Prueba	Volumen de la solución (L)	C_0 (mg/L)	Tiempo (min)	C_t (mg/L)	Remoción de color (%)	Masa Final de colorante (mg)
1	0.3	67.2	65	1.56	97.62	0.4665
2	0.126	160	40	4.81	96.87	0.6065
3	0.126	160	40	7.05	95.49	0.8877
4	0.3	67.2	60	5.90	91.34	1.7714
5	0.126	330	70	16.84	94.50	2.1214
6	0.3	138.6	90	11.75	91.10	3.5237
7	0.3	138.6	85	16.36	87.71	4.9086
8	0.126	330	80	4.79	98.51	0.6035

Los resultados del experimento se sometieron a un análisis Taguchi en el software Minitab® en donde se utilizó la constante cinética como variable de respuesta (tabla 14), con la relación señal ruido planteada: más grande es mejor. En la figura 17 se muestra el nivel de impacto de los factores en el proceso de decoloración.

Tabla 14 Diseño Taguchi L_8 con su Variable Respuesta (Colorante RA RR)

Nº de Prueba	Masa de Colorante (mg)	Temperatura (°C)	Flujo de la bomba (L/h)	Empaque	Cinética (min^{-1})
1	20.16	25	1 (74.01)	No	0.0601
2	20.16	25	2 (147.81)	Si	0.0925
3	20.16	50	1 (74.01)	Si	0.0864
4	20.16	50	2 (147.81)	No	0.0416
5	41.58	25	1 (74.01)	Si	0.0457
6	41.58	25	2 (147.81)	No	0.0285
7	41.58	50	1 (74.01)	No	0.0237
8	41.58	50	2 (147.81)	Si	0.0596

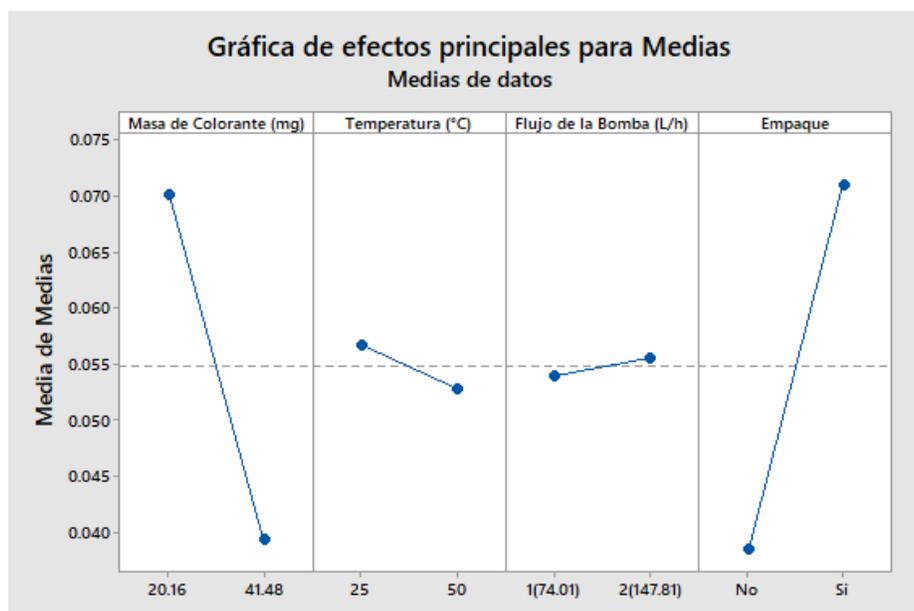


Figura 17 Gráfica de Efectos Principales para Medias (Colorante RA RR)

De acuerdo con el gráfico de efectos principales, el factor de mayor significancia en el proceso es el uso de empaque en el reactor, que aumenta el área de contacto y la distancia en el recorrido del gas, el segundo efecto es la masa de colorante (20.16 mg), que está relacionada con la cantidad de colorante a degradar, en tercer lugar la temperatura (25 °C) que tiene influencia en la solubilidad del gas en el líquido ; finalmente el flujo de la bomba (147.81 L/h), asociado a la cantidad de ozono suministrado al sistema.

En la tabla 15 se muestra el orden de las pruebas desde la mayor hasta la menor constante cinética con la respectiva variación de los factores en cada prueba.

Tabla 15 Constante Cinética en Orden Decreciente y Factores del Diseño L_8 (Colorante RA RR)

N° de Prueba	Constante Cinética (min^{-1})	Masa inicial de colorante (mg)	Temperatura (°C)	Flujo de la Bomba (L/h)	Empaque
2	0.0925	20.16	25	2 (174.81)	Si
3	0.0864	20.16	50	1 (74.01)	Si
1	0.0601	20.16	25	1 (74.01)	No
8	0.0596	41.58	50	2 (174.81)	Si
5	0.0457	41.58	25	1 (74.01)	Si
4	0.0416	20.16	50	2 (174.81)	No
6	0.0285	41.58	25	2 (174.81)	No
7	0.0237	41.58	50	1 (74.01)	No

De acuerdo con los valores obtenidos de las constantes cinéticas de las pruebas experimentales el orden de las primeras cuatro mejores pruebas es el mismo respecto al colorante AA-9, la mejor prueba fue la 2 con una constante cinética de 0.0925 min⁻¹ debido a que se usó de empaque efecto (efecto 1), tiene menor masa de colorante a degradar (efecto 2), temperatura de 25 °C (efecto 3) y el flujo es en el punto 2 (efecto 4). A diferencia del colorante AA-9 (donde los factores de temperatura y flujo tiene el mismo nivel de impacto) la prueba con la menor constante cinética para el colorante RA RR es la prueba 7 con una constante cinética de 0.0237 min⁻¹ debido a que no se utilizó empaque en el reactor (efecto 1), tiene mayor masa de colorante a degradar (efecto 2), la temperatura es de 50 °C (efecto 3) y el flujo es el en punto 1 (efecto 4), demostrando que los factores de temperatura y flujo de la bomba tienen efecto en el sistema pero no con la misma importancia que el uso de empaque y masa inicial de colorante.

Se tomó la prueba con la mejor constante cinética (prueba 2) para evaluar el porcentaje de eliminación de DQO (ecuación 15), eliminando el 19.35% de la demanda química de oxígeno (materia oxidable). Este porcentaje bajo de eliminación significa que las moléculas del colorante reactivo RA RR tiene más resistencia a la degradación mediante el proceso de oxidación avanzada con ozono.

En tabla 16 se muestra el tiempo del proceso de ozonización, la potencia promedio requerida y el consumo energético calculado (ecuación 14) para cada prueba.

Tabla 16 Consumo Eléctrico por Cada Gramo de Colorante RA RR Removido

N° de Prueba	Tiempo (min)	Potencia requerida (W)	Consumo eléctrico (KW-h/g de colorante)
1	65	10.67	0.5867
2	40	13.91	0.4741
3	40	10.38	0.3589
4	60	13.99	0.7605
5	70	10.67	0.3155
6	90	13.33	0.5254
7	85	10.14	0.3917
8	80	13.59	0.4420

En función del consumo energético la prueba 5 tiene el menor consumo de 0.3155 KW-h/g de colorante removido y está asociado a los gastos variables de operación; esta prueba ocupa el quinto lugar en función de la constante cinética con un valor de 0.0457 min^{-1} y un porcentaje de remoción de 94.50%. Debido a que la prueba 5 no es de las mejores velocidades de remoción, conviene aumentar el consumo energético; por ejemplo, en la prueba 3 el consumo fue 0.3589 KW-h/g de colorante removido y ocupa el segundo lugar en función de la constante cinética con un valor de 0.0864 min^{-1} con un porcentaje de remoción de 95.49%.

11.5.2 Colorante Procion Azul H-ERD

Las pruebas del experimento para el colorante PA H-ERD se realizaron por duplicado, el cambio en la concentración en función del tiempo y la desviación estándar muestral se presentan en las siguientes tablas. En la tabla 17 para las pruebas de la 1 a la 4 y en la tabla 18 para las pruebas de la 5 a la 8.

Tabla 17 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante PA H-ERD)

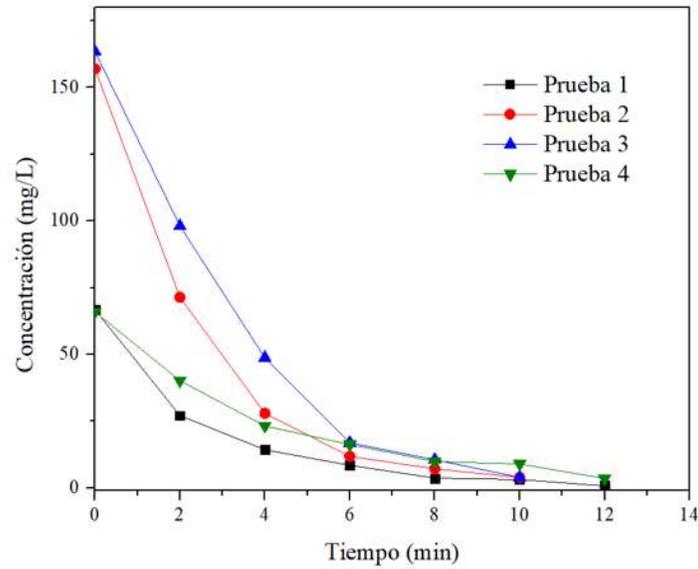
Tiempo (min)	Prueba 1 Concentración (mg/L)	Prueba 2 Concentración (mg/L)	Prueba 3 Concentración (mg/L)	Prueba 4 Concentración (mg/L)
0	66.77 +/- 0.0017	156.98 +/- 0.0012	163.45 +/- 0.0035	65.90 +/- 0.0038
2	27.10 +/- 0.0079	71.38 +/- 0.0024	98.09 +/- 0.0064	40.18 +/- 0.0022
4	14.25 +/- 0.0052	27.93 +/- 0.0058	48.76 +/- 0.0064	23.19 +/- 0.0035
6	8.46 +/- 0.0031	11.81 +/- 0.0023	16.92 +/- 0.0045	16.19 +/- 0.0014
8	3.64 +/- 0.0025	7.12 +/- 0.0030	10.53 +/- 0.0005	9.85 +/- 0.0001
10	3.12 +/- 0.0004	3.88 +/- 0.0005	3.95 +/- 0.0002	8.92 +/- 0.0023
12	0.75 +/- 0.0002	-	-	3.48 +/- 0.0007

Tabla 18 Cambio de la Concentración en Función del Tiempo y Desviación Estándar para Cada Prueba (Colorante PA H-ERD)

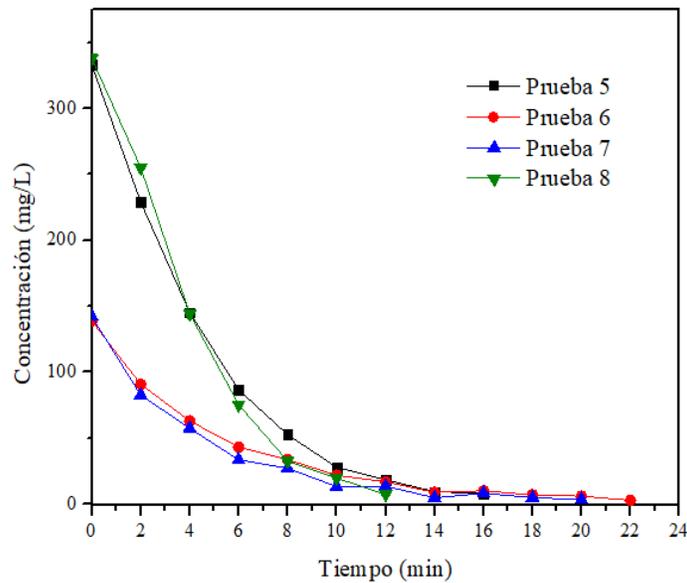
Tiempo (min)	Prueba 5 Concentración (mg/L)	Prueba 6 Concentración (mg/L)	Prueba 7 Concentración (mg/L)	Prueba 8 Concentración (mg/L)
0	332.83 +/-0.0018	138.76 +/-0.0008	142.12 +/-0.0039	337.87 +/-0.0100
2	228.87 +/-0.0258	90.85 +/-0.0034	82.56 +/-0.0127	255.09 +/-0.0028
4	145.22 +/-0.0359	63.04 +/-0.0060	57.57 +/-0.0144	144.24 +/-0.0020
6	86.68 +/-0.0305	43.16 +/-0.0055	33.53 +/-0.0133	75.41 +/-0.0036
8	52.65 +/-0.0290	33.73 +/-0.0035	27.19 +/-0.0094	32.59 +/-0.0003
10	27.97 +/-0.0166	21.80 +/-0.0074	13.34 +/-0.0063	19.77 +/-0.0018

12	18.36 +/-0.0142	16.94 +/-0.0031	13.61 +/-0.0056	7.29 +/-0.0005
14	9.44 +/-0.0045	8.89 +/-0.0033	4.76 +/-0.0022	-
16	8.07 +/-0.0055	10.14 +/-0.0016	8.20 +/-0.0016	-
18	-	6.99 +/-0.0009	4.91 +/-0.0038	-
20	-	6.07 +/-0.0007	3.40 +/-0.0035	-
22	-	2.94 +/-0.0006	-	-

Los resultados de la decoloración del PA H-ERD se presentan en las siguientes figuras. En la figura 18 a) se incluyen las curvas de remoción del colorante en función del tiempo para las pruebas de la 1 a la 4 donde la masa inicial es en el nivel 1 (20.16 mg), el menor tiempo para la remoción del color fue a los 10 min para las pruebas 2 y 3 con concentraciones finales de 3.88 mg/L y 3.95 mg/L, seguido de las pruebas 1 y 4 con 12 min y concentraciones finales de 0.75 mg/L y 3.48 mg/L. En la figura 18 b) se incluyen las curvas de remoción del colorante en función del tiempo para las pruebas de la 5 a 8 donde la masa inicial de colorante es en el nivel 2 (41.58 mg), el menor tiempo fue para la prueba 8 de 12 min con una concentración final de 7.29 mg/L, seguido de la prueba 5 de 16 min con una concentración final de 8.07 mg/L, en penúltimo lugar la prueba 7 con 20 min y concentración de 3.40mg/L y finalmente la prueba 6 con 22 min y concentración final de 2.94 mg/L. De igual manera que los otros colorantes se observa un aumento en el tiempo promedio de remoción para las pruebas con masa inicial en el nivel 2 en comparación a las pruebas con masa inicial es en el nivel 1. También se observa que el tiempo de remoción del color es más corto respecto de los otros colorantes (AA-9 y RA RR) indicando que los grupos cromóforos del colorante azul (PA H-ERD) son menos recalcitrantes y tienen menos resistencia a la mineralización de las moléculas.



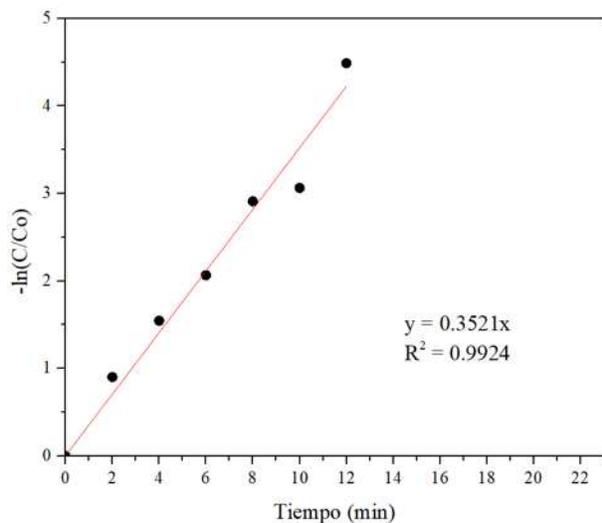
a)



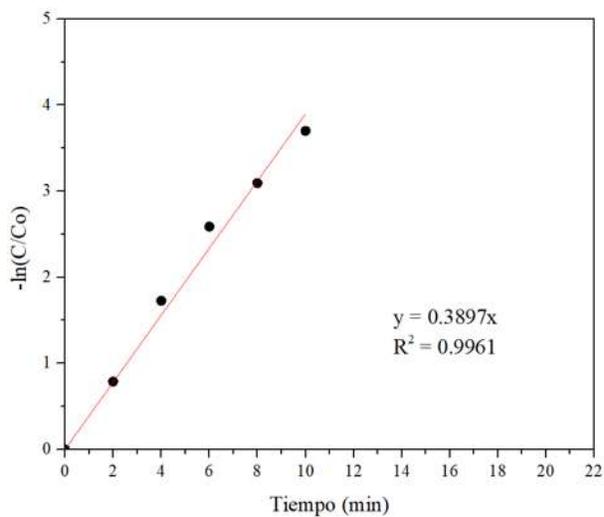
b)

Figura 18 Curvas de Remoción de Color a) Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 1 (20.16 mg) y b) Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 2 (41.58)

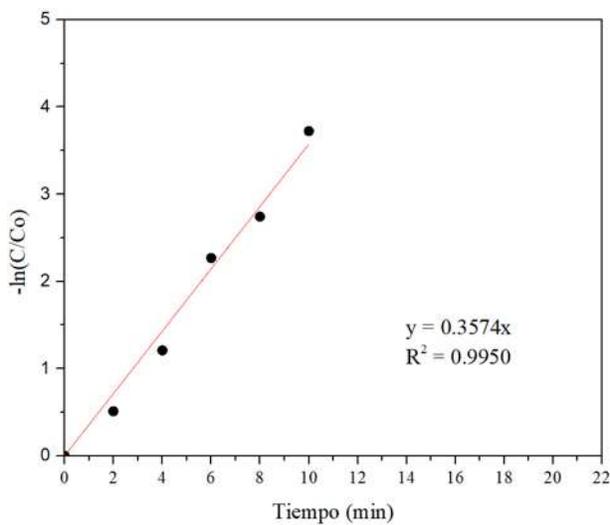
Las curvas se ajustan a un modelo de tipo logarítmico con una cinética de remoción de pseudo-primer orden para cada prueba del experimento con coeficientes de regresión superiores a 0.9866 (figura 19 y 20).



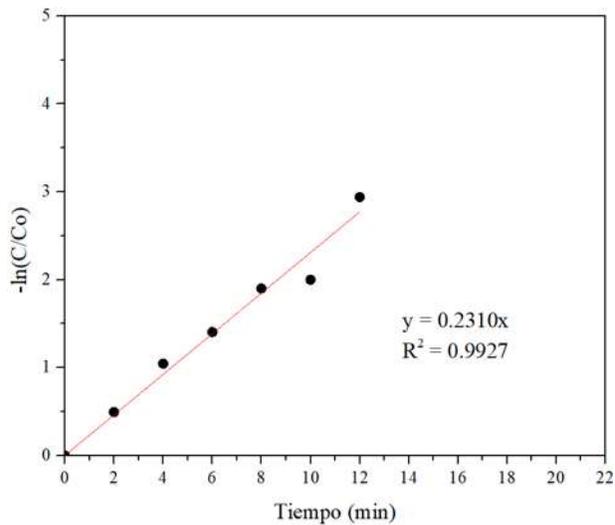
a)



b)

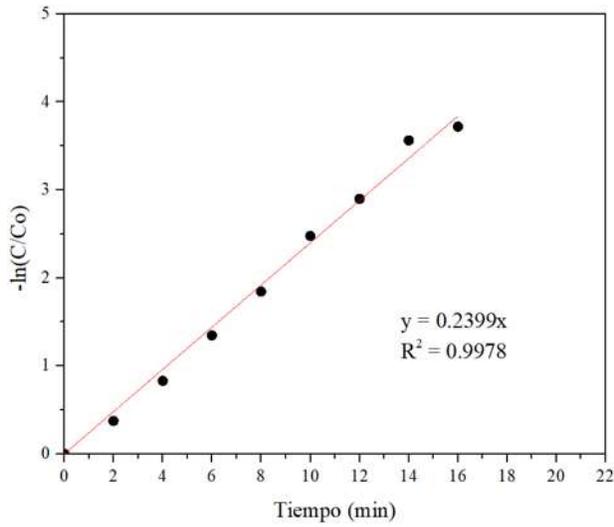


c)

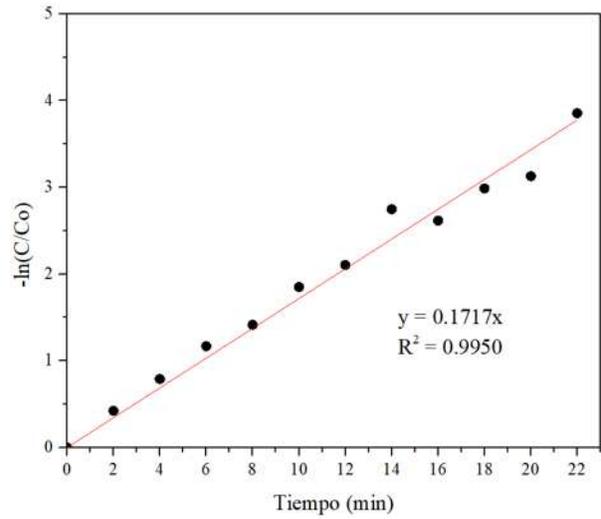


d)

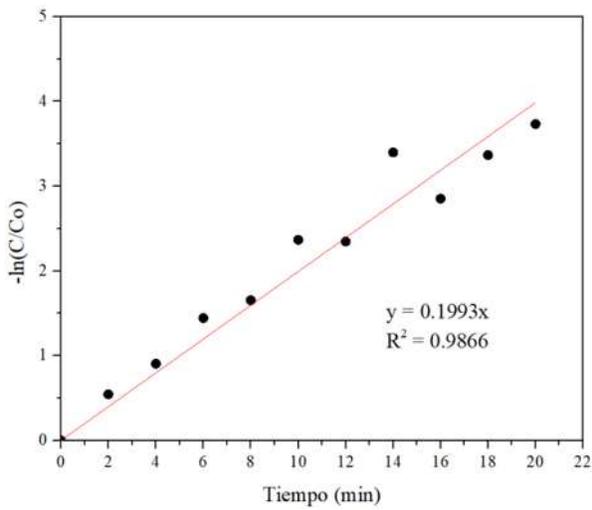
Figura 19 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 1 (20.16 mg) a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4



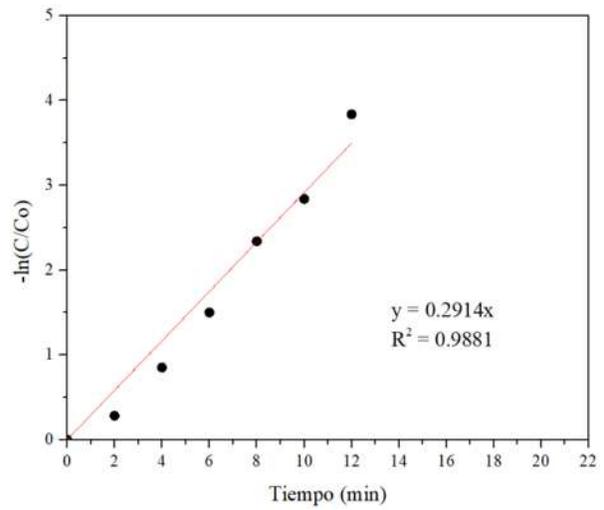
a)



b)



c)



d)

Figura 20 Cinéticas de Remoción de Color de las Pruebas para la Masa Inicial de Colorante PA H-ERD en el Nivel 2 (41.58 mg) a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8

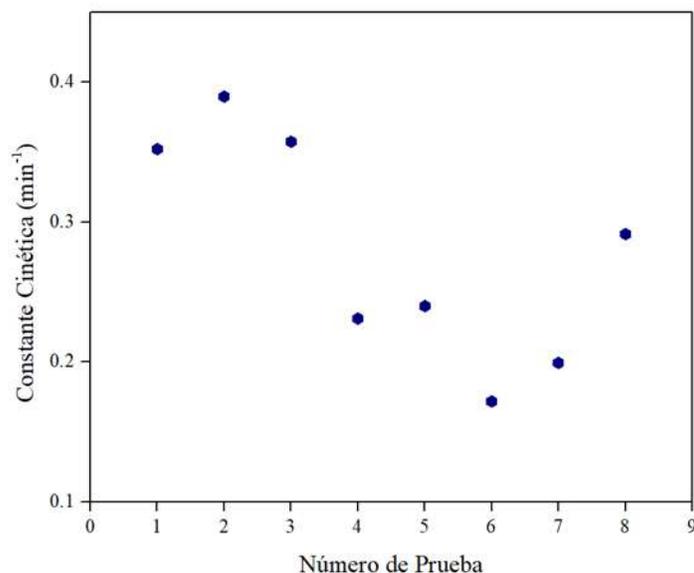


Figura 21 Constante Cinética para Cada Prueba (Colorante PA H-ERD)

En la figura 21 se observa que para las primeras cuatro pruebas con masa inicial de colorante de 20.16 mg; la mejor prueba fue la **2**, igual que con los otros colorantes cuyos parámetros de operación fueron, flujo de la bomba en el punto 2 (147.81 L/h), uso de empaque en el reactor y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.3897 min⁻¹; en segundo lugar la prueba **3**, con flujo de la bomba en el punto 1 (74.01 L/h), con empaque en el reactor y temperatura de reacción de 50 °C, con constante cinética de 0.3574 min⁻¹; seguido, la prueba **1**, con flujo de la bomba en el punto 1, sin empaque y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.3521 min⁻¹; finalmente la prueba **4**, con flujo en el punto 2, sin empaque y temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.2310 min⁻¹. Para las pruebas donde la masa inicial de colorante es 41.58 mg; la mejor prueba fue la **8**, igual que los otros colorantes, con flujo de la bomba en el punto 2, uso de empaque en el reactor y temperatura de 50 °C, con constante cinética de 0.2914 min⁻¹; en segundo lugar la prueba **5**, con flujo en el punto 1, uso de empaque y temperatura de 25 °C, con constante cinética de 0.2399 min⁻¹; en tercer lugar la prueba **7**, con flujo en el punto 1, sin empaque y temperatura de 50°C, con

constante cinética de 0.1993 min^{-1} ; finalmente la prueba **6**, con flujo en el punto 2, sin empaque y temperatura de 25°C , con constante cinética de 0.1717 min^{-1} .

En la tabla 19 se muestra un resumen de las concentraciones iniciales y finales, en las que se tiene porcentajes de remoción de color superiores al 94.71% en un tiempo de 12 min. Se observa que los tiempos de remoción para el colorante PA H-ERD van desde los 10 a los 22 min.

Tabla 19 Parámetros Medidos para el Arreglo Ortogonal L_8 (Colorante PA H-ERD)

N° de Prueba	Volumen de la solución (L)	C_0 (mg/L)	Tiempo (min)	C_t (mg/L)	Remoción de color (%)	Masa Final de colorante (mg)
1	0.3	67.2	12	0.75	98.88	0.2250
2	0.126	160	10	3.88	97.53	0.4894
3	0.126	160	10	3.95	97.58	0.4979
4	0.3	67.2	12	3.48	94.71	1.0451
5	0.126	330	16	8.07	97.57	1.0174
6	0.3	138.6	22	2.94	97.88	0.8812
7	0.3	138.6	20	3.40	97.61	1.0189
8	0.126	330	12	7.29	97.84	0.9191

El análisis Taguchi donde se utilizó la constante cinética como variable de respuesta (tabla 20), con la relación señal ruido planteada: más grande es mejor. En la figura 22 se muestra el nivel de impacto de los factores en el proceso de decoloración.

Tabla 20 Diseño Taguchi L_8 con su Variable Respuesta (Colorante PA H-ERD)

N° de Prueba	Masa de Colorante (mg)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Flujo de la bomba (L/h)	Empaque	Cinética (min^{-1})
1	20.16	25	1 (74.01)	No	0.3521
2	20.16	25	2 (147.81)	Si	0.3897
3	20.16	50	1 (74.01)	Si	0.3574
4	20.16	50	2 (147.81)	No	0.2310
5	41.58	25	1 (74.01)	Si	0.2399
6	41.58	25	2 (147.81)	No	0.1717
7	41.58	50	1 (74.01)	No	0.1993
8	41.58	50	2 (147.81)	Si	0.2914

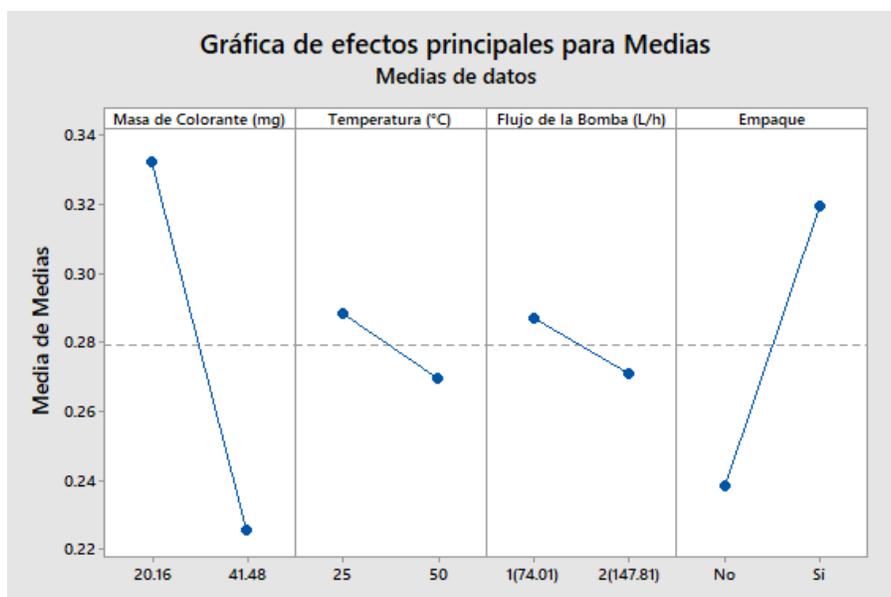


Figura 22 Gráfica de Efectos Principales para Medias (Colorante PA H-ERD)

De acuerdo con el gráfico de efectos principales para medias para el colorante PA H-ERD el factor más importante es la masa (20.16 mg) y en segundo lugar el uso de empaque, a diferencia del colorante RA RR donde es más importante el empaque que necesita más tiempo de reacción debido a la resistencia de las moléculas a ser degradadas; en tercer lugar, la temperatura del sistema (25 °C) que tiene influencia en la solubilidad del gas en el líquido; finalmente el flujo de la bomba (74.01 L/h), que está asociado a la cantidad de ozono suministrada en el reactor.

En la tabla 21 se presenta la constante cinética en orden decreciente para el análisis de significancia de los factores para el colorante reactivo PA H-ERD.

Tabla 21 Constante Cinética en Orden Decreciente y Factores del Diseño Ls (Colorante PA H-ERD)

N° de Prueba	Constante Cinética (min ⁻¹)	Masa inicial de colorante (mg)	Temperatura (°C)	Flujo de la Bomba (L/h)	Empaque
2	0.3897	20.16	25	2 (174.81)	Si
3	0.3574	20.16	50	1 (74.01)	Si
1	0.3521	20.16	25	1 (74.01)	No
8	0.2914	41.58	50	2 (174.81)	Si
5	0.2399	41.58	25	1 (74.01)	Si
4	0.231	20.16	50	2 (174.81)	No
7	0.1993	41.58	50	1 (74.01)	No
6	0.1717	41.58	25	2 (174.81)	No

De acuerdo con los valores de las constantes cinéticas obtenidas de las pruebas experimentales y con base en el análisis de efectos principales para medias, en la prueba 2 se obtuvo el mayor valor de 0.3897 min^{-1} , esto es debido a que se tiene menor masa de colorante (efecto 1), uso de empaque en el reactor (efecto 2), temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (efecto 3) y aunque el flujo es el nivel 2, es el factor con menos influencia en el proceso (efecto 4). La prueba 6 fue la prueba de la menor constante cinética con un valor de 0.1717 min^{-1} debido a que se tiene mayor masa de colorante a degradar (efecto 1), no se usó empaque en el reactor (efecto 2), temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (efecto 3) y el flujo en el nivel 2 (efecto 4), demostrando que igual que el AA-9 los factores de masa de colorante y uso de empaque son los de mayor significancia en el proceso para la remoción del colorante PA H-ERD.

Se tomó la prueba con la mejor constante cinética (prueba 2) para evaluar el porcentaje de eliminación de DQO (ecuación 15), eliminando el 41.67% de la demanda química de oxígeno (materia oxidable). De este parámetro se puede deducir que el ozono está atacando las moléculas de colorante en el grupo cromóforo, pero no alcanza mineralización completa de la molécula y por esa razón hay materia que está demandando oxígeno para ser oxidada.

En tabla 22 se muestra el tiempo del proceso de ozonización, la potencia promedio requerida y el consumo energético calculado (ecuación 14) para cada prueba.

Tabla 22 Consumo Eléctrico por Cada Gramo de Colorante PA H-ERD Removido

N° de Prueba	Tiempo (min)	Potencia requerida (W)	Consumo eléctrico (KW-h/g de colorante)
1	12	10.99	0.1102
2	10	13.95	0.1182
3	10	10.65	0.0902
4	12	13.96	0.1461
5	16	10.77	0.0708
6	22	13.38	0.1205
7	20	10.76	0.0884
8	12	13.87	0.0682

En función del consumo energético la mejor prueba es la prueba 8 con un consumo de 0.0682 KW-h/g de colorante removido. Esta prueba ocupa el cuarto lugar en función de la constante cinética con un valor de 0.2914 min^{-1} , con un porcentaje de remoción de color de 97.84%.

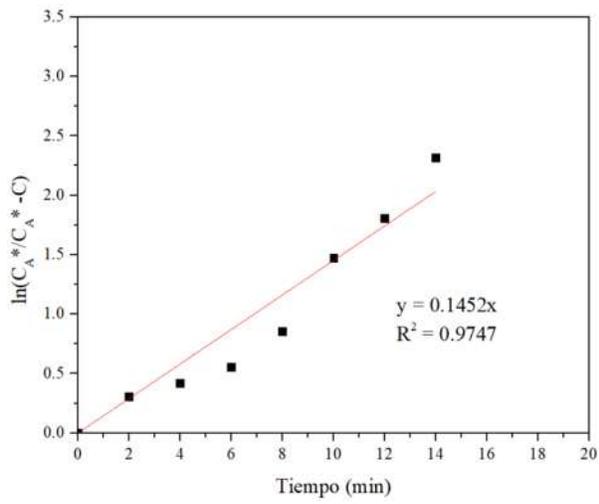
11.6 Coeficiente de Transferencia

Las concentraciones de ozono se obtuvieron mediante el método yodométrico; después de medir la concentración del yodo formado (mediante la titulación con tiosulfato de sodio) en la reacción del ozono con yoduro de potasio, se calculó de manera indirecta, mediante la estequiometría de la reacción, el ozono requerido para la formación de yodo, este ozono requerido es el que se solubiliza y está disponible para reaccionar.

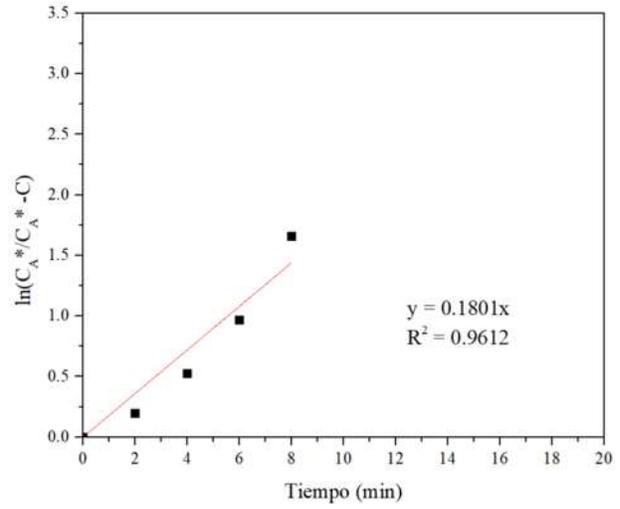
Se realizaron las 8 pruebas del experimento, cuando se variaron los parámetros de temperatura, flujo de la bomba y uso o no de empaque en el reactor; el sistema consistió en analizar la transferencia de masa del ozono al agua, sin tomar en cuenta las moléculas de los colorantes solubilizadas en la fase líquida.

Con estas concentraciones de ozono hasta alcanzar la saturación, se realizó el cálculo de la función logarítmica correspondiente al eje de las ordenadas y se graficaron los datos en función del tiempo.

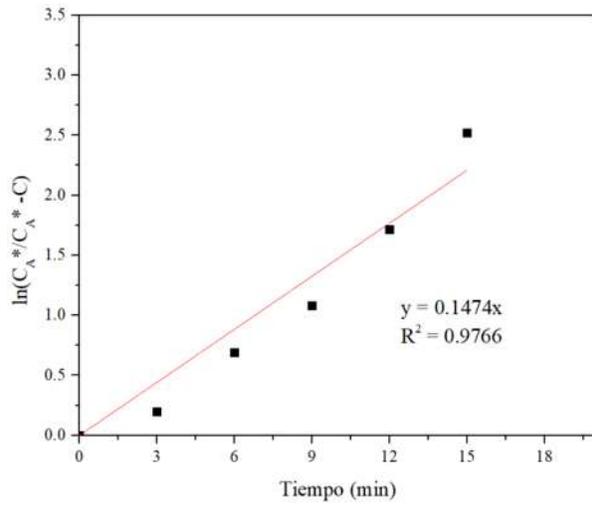
El correspondiente coeficiente de transferencia de masa ($K_L a$) para cada prueba fue determinado mediante el cálculo de la pendiente de la recta, a continuación, se muestran los gráficos de la expresión matemática y la ecuación de la recta para cada prueba. En la figura 23 se muestran las pruebas de la 1 a la 4 y en la figura 24 las pruebas de la 5 a la 8, con coeficientes de regresión superiores a 0.9557.



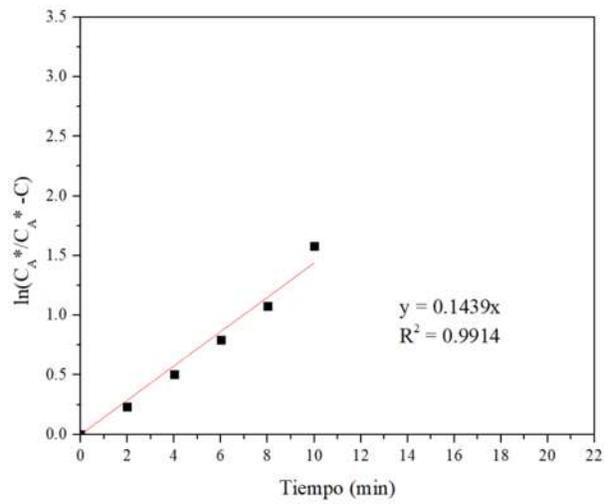
a)



b)

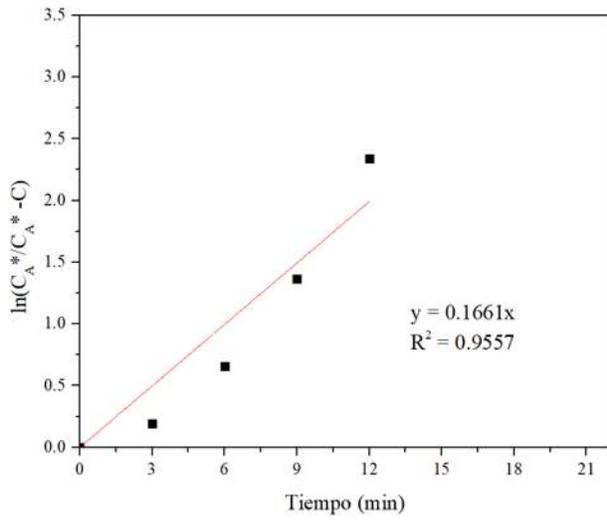


c)

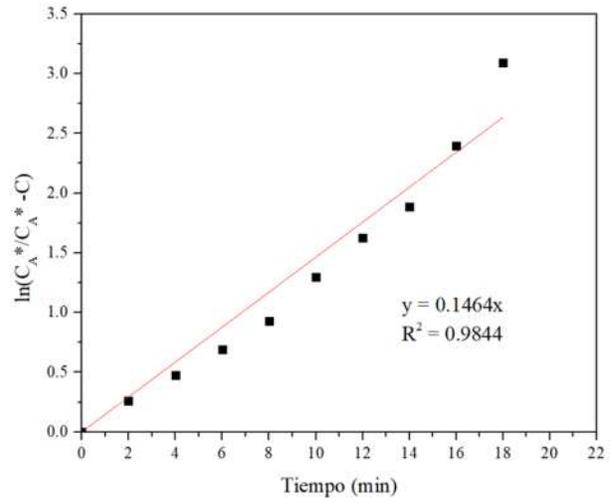


d)

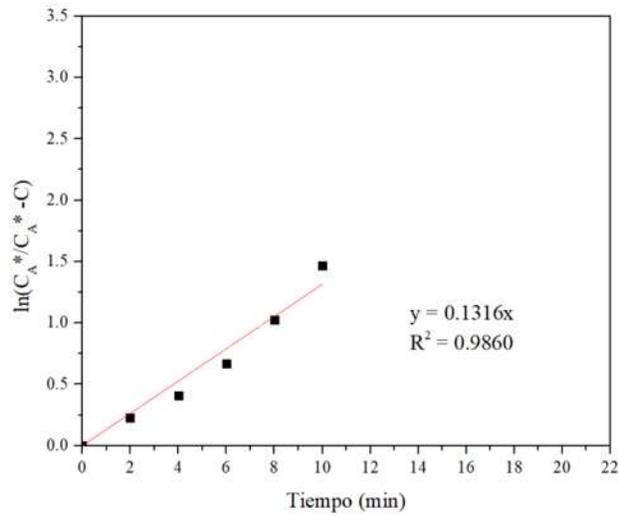
Figura 23 Coeficiente Global de Transferencia de Masa para cada Prueba
a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3 y d) Prueba 4



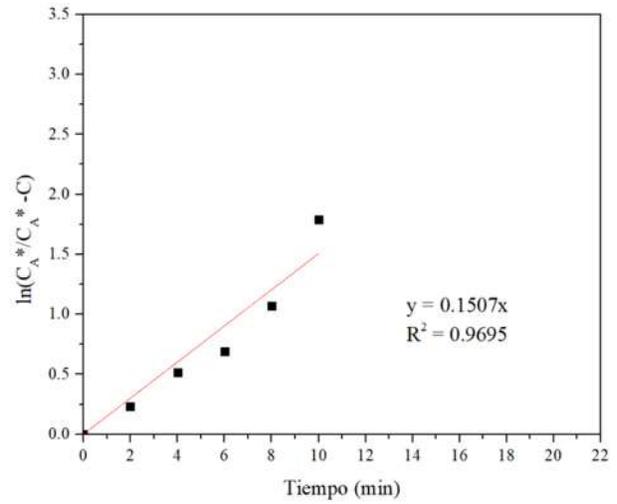
a)



b)



c)



d)

Figura 24 Coeficiente Global de Transferencia de Masa para cada Prueba
 a) Prueba 5, b) Prueba 6, c) Prueba 7 y d) Prueba 8

En la tabla 23 se muestra las condiciones de cada prueba, el coeficiente de transferencia de masa obtenido y su respectiva desviación estándar para las dos réplicas del experimento. En la figura 25 se presenta el coeficiente de transferencia de masa para cada prueba.

Tabla 23 Parámetros de Cada Prueba y Coeficiente Global de Transferencia de Masa

N° de Prueba	Temperatura (°C)	Flujo de la bomba (L/h)	Empaque	Coeficiente Global de Transferencia (min ⁻¹)
1	25	1 (74.01)	No	0.1452 +/- 0.0013
2	25	2 (147.81)	Si	0.1801 +/-0.0035
3	50	1 (74.01)	Si	0.1474 +/-0.0011
4	50	2 (147.81)	No	0.1439 +/-0.0040
5	25	1 (74.01)	Si	0.1661 +/-0.0086
6	25	2 (147.81)	No	0.1464 +/-0.0054
7	50	1 (74.01)	No	0.1316 +/-0.0018
8	50	2 (147.81)	Si	0.1507 +/-0.0037

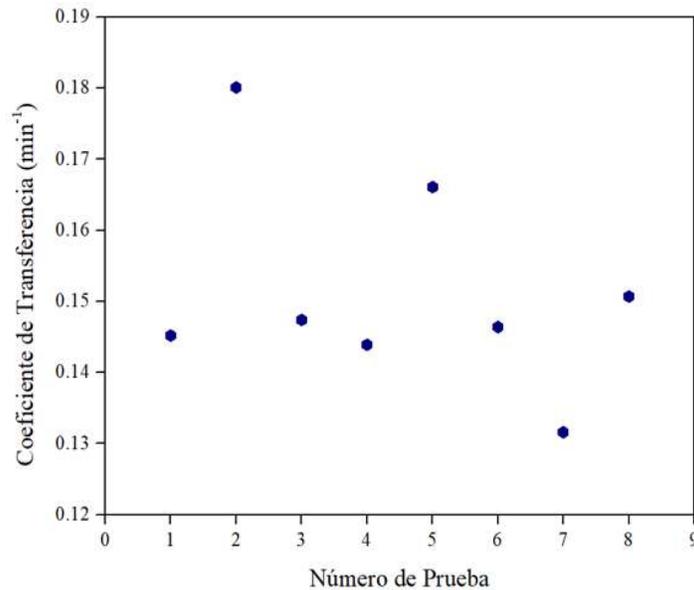


Figura 25 Coeficiente Global de Transferencia de Masa para Cada Prueba

Para el análisis de este experimento se tomaron pares de prueba en las que se varíe uno de los tres parámetros de interés. El primer parámetro es el uso de empaque y para las pruebas **1** y **5** con flujo en el nivel 1 (74.01 L/h) y temperatura de 25 °C, existe un incremento en el K_{La} de la prueba 5 donde sí se usa empaque respecto de la prueba 1 donde no se utiliza; para las pruebas **2** y **6** con flujo en el nivel 2 (147.81 L/h) y 25 °C, un incremento de la 2 (con empaque) respecto de la 6 (sin

empaques); para las pruebas **3** y **7** con flujo en el nivel 1 y temperatura de 50 °C, un incremento de la prueba 3 (con empaque) respecto de la 7 (sin empaque); para las pruebas **4** y **8** con flujo en el nivel 2 y temperatura de 50°C, un incremento de la prueba 8 (con empaque) respecto de la 4 (sin empaque). El segundo parámetro en estudio es la temperatura; para las pruebas **1** y **7** con flujo en el nivel 1, sin empaque, un incremento en el K_{La} de la prueba 1 (a 25 °C) respecto de la prueba 7 (a 50 °C); para las pruebas **2** y **8** con flujo en el nivel 2, con empaque, un incremento de la prueba 2 (a 25 °C) respecto de la prueba 8 (a 50 °C); para las pruebas **3** y **5** con flujo 1, con empaque, un incremento de la prueba 5 (a 25 °C) respecto de la prueba 3 (a 50 °C); para las pruebas **4** y **6** con flujo 2, sin empaque, un leve incremento de la prueba 6 (a 25 °C) respecto de la 4 (a 50 °C). El tercer parámetro en estudio es el flujo volumétrico suministrado al sistema; para las pruebas **1** y **6**, a 25 °C, sin empaque, se observa un leve incremento del K_{La} de la prueba 6 (con flujo 2) con respecto de la prueba 1 (con flujo 1); para las pruebas **2** y **5**, a 25 °C, con empaque, un incremento de la prueba 2 (con flujo 2) respecto de la prueba 5 (con flujo 1); para las pruebas **3** y **8**, a 50 °C, con empaque un leve incremento de la prueba 8 (con flujo 2) respecto de la prueba 3 (con flujo 1) y para las pruebas **4** y **7**, a 50 °C, sin empaque, un incremento de la prueba 4 (con flujo 2) respecto de la prueba 7 (con flujo 1). De acuerdo al comportamiento de los coeficientes de transferencias en las pruebas, el uso de empaque es el parámetro que más influye en el proceso y está relacionada a la distancia del recorrido del gas en el líquido, en segundo lugar, la temperatura debido a que a medida que aumenta la temperatura disminuye la solubilidad del ozono en el líquido y en último lugar el flujo volumétrico de la bomba donde se observan diferencias mínimas en los coeficientes de transferencias.

11.7 Resumen de Resultados y Análisis

En las pruebas de los experimentos; para el colorante reactivo AA-9 se obtuvieron tiempos de remoción desde 20 min eliminando el 99.89% del color, hasta 45 min eliminando el 99.65% del color; para el colorante reactivo RA RR tiempos de remoción desde 40 min eliminando el 95.49% del color, hasta 90 min eliminando el 91.10% del color y para el colorante reactivo PA H-ERD se obtuvieron tiempos de remoción desde 10 min eliminando el 97.53% del color, hasta 22 min eliminando el 97.88% del color. Indicando que el proceso de oxidación avanzada es eficiente para la remoción del color, Quaff *et al.* (2020) aplican el proceso al colorante Remazol Negro B, reportan una reducción del 94% del color en un tiempo de 25 min; Bhad *et al.* (2022) reportan tiempos hasta de 90 min eliminando del 75.33 a 87.33% del colorante Procion Azul; Turhan (2021) evalúa el proceso de ozonización en tres tipos de colorantes textiles (Violeta Disperso 93, Azul Difuso 79 y Anaranjado Disperso 30) alcanzado la decoloración completa en 16, 12 y 9 min para cada colorante por separado.

Se observó que, dependiendo de la masa inicial del colorante, así como del tipo de colorante, cambian los tiempos de remoción, en general se observó un notable incremento en el tiempo de degradación, para el colorante RA RR respecto de los colorante AA-9 y PA H-ERD, este aumento puede atribuirse a que el grupo cromóforo presente en la molécula del colorante reactivo RA RR posee enlaces con energías más elevadas, lo que confiere una mayor resistencia a su ruptura. Esta suposición se respalda al examinar su espectro de absorción, el cual revela una longitud de onda de máxima absorción a 419 nm, a diferencia de los colorantes azules con longitudes de máxima absorción a 630 nm y 615 nm, respectivamente. De acuerdo con la ley de Planck, a medida que disminuye la longitud de onda de absorción, la frecuencia de emisión aumenta, y consecuentemente, se incrementa la energía asociada a la radiación electromagnética con magnitudes de 4.74×10^{-19} J para el colorante RA RR, 3.15×10^{-19} J para el AA-9 y 3.23×10^{-19} J para el PA H-ERD.

La constante cinética determina la velocidad a la que ocurre la reacción, entre más rápido se dé la reacción, más grande es la magnitud de la misma. Para cada colorante las mejores constantes cinéticas con masa inicial en el nivel 1 (20.16 mg) fueron de la prueba 2 en cada experimento, con valores de 0.3462 min^{-1} para el AA-9, eliminando el 48.23% de la DQO, 0.0925 min^{-1} para el RA

RR, eliminando el 19.35% de la DQO y 0.3897 min^{-1} para el PA H-ERD, eliminando el 41.67% de la DQO, debido a que tienen dos de los tres factores de operación influyendo positivamente en el sistema. De igual manera para cada colorante las mejores constantes cinéticas con masa inicial en el nivel 2 (41.58 mg) fueron de la prueba 8 en cada experimento, con valores de 0.2067 min^{-1} para el AA-9, 0.0596 min^{-1} para el RA RR y 0.2914 min^{-1} para el PA H-ERD, estas pruebas tienen en común el uso de empaque en el reactor siendo el factor de operación de mayor significancia en el proceso. Las constantes cinéticas fueron de pseudo-primer orden, al igual que otros investigadores en sus estudios lo reportaron, Turhan (2021) determina las cinéticas de remoción de color en tres tipos de colorantes obteniendo valores desde 0.2123 a 0.4429 min^{-1} y removiendo desde 61.5 a 77.43% de la DQO; Bhad *et al.* (2022) evalúa remoción para el colorante Procion Azul reportando una cinética de 0.2480 min^{-1} ; Bilinska *et al.* (2020) aplican la ozonización catalítica al colorante Negro Reactivo 5 eliminando el 63% de la DQO.

Según el resultado de los efectos principales para medias, los factores de mayor impacto en el proceso fueron: masa de colorante en el nivel 1 (20.16 mg) que está asociada a la cantidad de moléculas con las que el ozono reacciona; uso de empaque en el reactor, que proporciona una mayor área de contacto, e incremento del recorrido y la interacción del ozono con el líquido. Los factores de menor impacto fueron: la temperatura del sistema en el nivel 1 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), esto se debe a que la solubilidad del ozono disminuye a medida que aumenta la temperatura del sistema; el flujo volumétrico del sistema aire-ozonizador en el nivel 1 (74.01 L/h) para los colorantes azules (AA-9 y PA H-ERD) y en el nivel 2 para el colorante amarillo (RA RR) (147.81 L/h), el flujo volumétrico está directamente asociado a la cantidad de ozono suministrado al sistema y el diámetro de las burbujas, respecto a este, a medida que el diámetro de las burbujas aumenta su relación área superficial a volumen disminuirá, esto significa que las burbujas más grandes tendrán menos área de superficie en comparación con su volumen total y ocasionan menos interacción del ozono en el líquido, en este caso particular el aumento en el diámetro de las burbujas está relacionado a un aumento del flujo volumétrico que puede modificar el comportamiento de la interacción. En el contexto de los colorantes azules, cuyas velocidades de remoción son más altas, no existe una diferencia significativa al aumentar la cantidad de ozono suministrado. Sin embargo, en el caso del colorante amarillo, se observó una mayor demanda de ozono para lograr la remoción del color.

En función del consumo energético; para el AA-9, la mejor prueba fue la 3 con un consumo de 0.1723 KW-h/g de colorante removido, esta prueba tiene el puesto número dos de las ocho pruebas del experimento en función de las constantes cinéticas con un valor de 0.3409 min^{-1} ; para el RA RR, la mejor prueba fue la 3 con un consumo de 0.3589 KW-h/g de colorante removido y ocupa el segundo lugar en función de la constante cinética con un valor de 0.0864 min^{-1} y para el PA H-ERD, la mejor prueba fue la prueba 8 con un consumo de 0.0682 KW-h/g de colorante removido ocupando el cuarto lugar en función de la constante cinética con un valor de 0.2914 min^{-1} . Se observó que no existe una dependencia lineal entre el consumo energético y el aumento de la masa inicial de colorante, dado que no todos los intervalos de tiempo se duplicaron cuando se duplicó la masa inicial. Además, no existe una correlación directa entre el consumo energético y las constantes cinéticas de velocidad de remoción. Decidir cuál es la mejor prueba en función del consumo energético o de la mejor constante cinética va a depender de un estudio más específico de los costos fijos asociados al sistema y de los costos variables inherentes al proceso.

Para el sistema gas-líquido el primer fenómeno que ocurre es la transferencia de masa del ozono al agua y tiene un papel importante en los procesos de degradación porque determina el ozono disponible para reaccionar con los componentes de la fase líquida, este fenómeno se expresa como la velocidad con la que el ozono gas se solubiliza en el agua líquida. El segundo fenómeno ocurre cuando el ozono solubilizado reacciona con las moléculas de los colorantes presentes en el agua y da lugar a la oxidación. Existe una relación entre el coeficiente de transferencia de masa K_{LA} y las velocidades de remoción de color. En la tabla 24 se muestran los coeficientes de transferencias obtenidos en cada prueba tomando en cuenta los factores de uso de empaque, temperatura del sistema y flujo volumétrico, así como las constantes cinéticas de remoción de color a las diferentes condiciones y tomando en cuenta la masa inicial de colorante.

De esta manera se observó que la prueba con el mejor coeficiente de transferencia de masa coincide con las mejores constante cinéticas de cada colorante (prueba 2) y esto se debe al arreglo de los factores que influyen en el sistema. Los factores de la prueba 2 fueron: sistema empacado, este es el factor más importante y utilizarlo beneficia las magnitudes tanto del coeficiente de transferencia así como las constantes cinéticas, el uso de empaque provocó un aumento del área de contacto del ozono en el agua, además de que la distancia del corrido del ozono es mayor; el segundo factor es la temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ relacionado a la solubilidad del gas en la fase líquida lo que disminuye la

cantidad de ozono que puede ser disuelto en el agua; el tercer factor es el flujo de 147.81 L/h que está relacionada a la cantidad de ozono y a la velocidad con la que se suministra al sistema, de esta manera el flujo más alto aumenta el coeficiente global de transferencia de masa debido al fenómeno convectivo, mayor agitación y turbulencia, lo que mejora la interacción del ozono en la fase líquida.

Tabla 24 Coeficiente de Transferencia de Masa y Constante Cinéticas de los Colorantes para Cada Prueba del Experimento

N° de Prueba	Coeficiente Global de Transferencia (min ⁻¹)	Cinética (min ⁻¹) AA-9	Cinética (min ⁻¹) RA RR	Cinética (min ⁻¹) PA H-ERD
1	0.1452	0.2211	0.0601	0.3521
2	0.1801	0.3462	0.0925	0.3897
3	0.1474	0.3409	0.0864	0.3574
4	0.1439	0.1989	0.0416	0.2310
5	0.1661	0.1902	0.0457	0.2399
6	0.1464	0.1330	0.0285	0.1717
7	0.1316	0.1403	0.0237	0.1993
8	0.1507	0.2067	0.0596	0.2914

De igual manera, el menor coeficiente de transferencia disminuye las constantes cinéticas y esto se debe a que menor ozono solubilizado en la fase líquida, disminuye la disponibilidad de este para la reacción de oxidación. Los factores que ocasionaron esta disminución, se encuentran en el nivel opuesto y fueron: sistema no empacado, temperatura de 50 °C y flujo de 74.01 L/h, arreglo correspondiente a la prueba 7 que coincide con la menor constante cinética del colorante RA RR. Respecto a las menores constantes cinéticas de los colorantes AA-9 y PA H-ERD, no coinciden exactamente con el menor coeficiente de transferencia, esto se debe a que los factores de temperatura y flujo fueron los de menor significancia en las velocidades de remoción, investigadores como Ratnawati *et al.* (2017) reportaron valores de K_{La} hasta 0.1260 min⁻¹ y Barahona *et al.* (2019) calcularon K_{La} de 0.1047 min⁻¹ para la velocidad de transferencia del ozono al agua.

12 Conclusiones

El uso de ozono como proceso de oxidación avanzada es capaz de remover el color del agua residual de la industria textil, con eficiencias de remoción de color de 99.89% para el colorante AA-9, 96.87% para el colorante RA RR y 97.53% para el colorante PA H-ERD. Las máximas cinéticas de remoción fueron 0.3462 min^{-1} , 0.0925 min^{-1} y 0.3897 min^{-1} para cada colorante respectivamente, magnitudes que dependen de la masa inicial de colorante, del uso de empaque, temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y flujo de 147.81 L/h .

Los factores de mayor impacto sobre la velocidad de remoción de color fueron: masa inicial de colorante en el nivel 1 (20.16 mg) y uso de empaque, y los de menor impacto: la temperatura de 25°C para los tres colorantes y el flujo de la bomba en el nivel 1 (74.01 L/h) para los colorantes AA-9 y PA H-ER y en el nivel 2 (147.81 L/h) para el RA RR.

No existe una correlación directa entre el consumo energético y las cinéticas de velocidad de remoción, el menor consumo energético en función de los gramos de colorante removido fue 0.1723 KW-h/g y cinética de 0.3409 min^{-1} para el AA-9; de 0.3589 KW-h/g y cinética de 0.0864 min^{-1} para el RA RR y 0.0682 KW-h/g con una cinética de 0.2914 min^{-1} , para el PA H-ERD.

Los factores que favorecieron el coeficiente de transferencia de masa para el sistema ozono-agua fueron, uso de empaque en el reactor, temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y flujo volumétrico de 147.81 L/h y el mejor valor obtenido fue de 0.1801 min^{-1} .

13 Sugerencias

Hacer análisis infrarrojo para determinar los componentes formados de la ruptura de las moléculas en el proceso de ozonización y hacer análisis toxicológico para analizar el impacto de estas rupturas.

Aplicar el proceso de oxidación avanzada con ozono en mezclas de colorantes utilizados en la industria textil.

Aplicar el proceso de ozonización a un tipo de colorante más los aditivos auxiliares utilizados en los procesos de tinción de esta industria.

Aplicar el proceso de ozonización en mezclas de colorantes más aditivos auxiliares.

Evaluar el coeficiente de transferencia de masa del ozono al agua residual en presencia de los colorantes residuales y aditivos utilizados en la industria textil.

14 Referencias Bibliográficas

- Al-Ghouti, M. A., Li, J., Salamh, Y., Al-Laqtah, N., Walker, G., & Ahmad, M. N. (2010). Adsorption mechanisms of removing heavy metals and dyes from aqueous solution using date pits solid adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 510-520.
- ANIQ. (2022). *Estadística de la Industria Química*. Recuperado el 04 de Junio de 2022, de Anuario Estadístico de la Industria Química: <https://aniq.org.mx/webpublico/notas/anuarioestadisticoiq.asp>
- Barahona, N., Hernán, T., & Garmendia, H. (2022). Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles. *Dominio de las Ciencias*, 319-333.
- Bes Monge, S., Silva, A. M., & Bengoa, C. (2015). Manual Técnico Sobre Procesos de Oxidación Avanzada. *Triton*, 2-59.
- Bhad, R. M., Das, A., & Kodape, S. M. (2022). Ozonation of Procion Blue Reactive Dye and its Kinetics Study. *Pollution*, 529-541.
- Bilinska, L., Blus, K., Foszpanczyk, M., M., G., & Ledakowicz, S. (2020). Catalytic ozonation of textile wastewater as a polishing step after industrial scale electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 1-11.
- Bolaños Avalos, R. A. (2010). "PROPUESTA DE RECUPERACION DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL". San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Cardoso, J. C., Bessegato, G. G., & Boldrin Zanoni, M. V. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Research*, 1-35.
- Caudillo Flores, U. (2017). *Evaluación de las Propiedades Fisicoquímicas y Fotocatalíticas de TiO2 obtenido mediante el Acoplamiento de la Síntesis vía Microondas con el Proceso de Secado por Aspersión*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Chu, W., & Ma, C.-W. (2000). QUANTITATIVE PREDICTION OF DIRECT AND INDIRECT DYE OZONATION KINETICS. *PERGAMON*, 3153-3160.

- Correa Sánchez, S. (2016). *EVALUACIÓN DEL PROCESO OZONO-FENTON PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA TEXTIL*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Doménech, X., Jardim, W. F., & Litter, M. I. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En C. VIII-G, *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea* (págs. 3-25). Buenos Aires : Miguel A. Blesa.
- El Hassani, K., Kalnina, D., Turks, M., Horax Beakou, B., & Anouar, A. (2019). Enhanced degradation of an azo dye by catalytic ozonation over Ni-containing layered double hydroxide nanocatalyst. *Separation and Purification Technology*, 764-774.
- Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A., & Santamaría Arango, J. J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 83-92.
- Glaze, W. H., & Kang, J.-W. (1988). Advanced Oxidation Processes for Treating Groundwater Contaminated With TCE and PCE: Laboratory Studies . *American Water Works Association*, 57-63.
- Guadarrama Tejas, R., Kido Miranda, J., Roldan Antunez, G., & Salas Salgado, M. (2016). Contaminación del agua. *Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 1-10.
- Guelli Ulson de Souza, S. M., Santos Bonilla, K. A., & Ulson de Souza, A. A. (2010). Removal of COD and color from hydrolyzed textile azo dye by combined ozonation and biological treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 35-42.
- Guerrero, T., Rives, C., Rodríguez, A., & Saldivar, Y. (2009). El agua en la Ciudad de México. *Ciencias*, 16-23.
- Gul, S., & Ozcan Yildirim, O. (2009). Degradación de los colorantes azoicos reactivos Rojo 194 y reactico Amarillo 145 mediante procesos O₃ y H₂O₂/UV-C. *Revista de Ingeniería Química*, 684-690.
- Gupta, V., Khamparia, S., Tyagi, I., Jaspal, D., & Malviya, A. (2015). Decolorization of mixture of dyes: A critical review. *Global J. Environ. Sci. Manage*, 71-94.

- HACH COMPANY. (2000). *MANUAL DE ANALISIS DE AGUA*. Colorado.
- Hoigné, J., & Bader, H. (1983). RATE CONSTANTS OF REACTIONS OF OZONE WITH ORGANIC AND INORGANIC COMPOUNDS IN WATER. *Water Resources and Water Pollution Control*, 173-183.
- Hu, E., Shang, S., & Chiu, K.-L. (2019). Removal of Reactive Dyes in Textile Effluents by Catalytic Ozonation Pursuing on-Site Effluent Recycling. *Molecules*, 1-21.
- Iriarte Mendívil, R. (2020). *Nuevas Tendencias en Sistemas de Purificación de Aguas*. Valencia : Universitat Politècnica de València.
- Jaramillo, A. C., Echavarría, A. M., & Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia* , 75-91.
- Khataee, A. R., & Khataee, H. R. (2008). Photooxidative removal of the herbicide Acid Blue 9 in the presence of hydrogen peroxide: modeling of the reaction for evaluation of electrical energy per order (EEO). *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 562-568.
- Leiva Peres, A., Barres Zambrano, R., Alcívar Pinargote, S., Solorzano Solorzano, C., & Andrade Candell, J. (2018). Eliminación de materia orgánica en aguas residuales textiles mediante la aplicación de ozono. *Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad*, 76-87.
- Leiva Perez, A., Macías Andrade, E., Zambrano Farias, T., Barre Zambrano, R., Montesdeoca Párraga, R., & Andrade Candell, J. (2018). Ozonización De Residuos Líquidos Textiles Para Remoción de Sólidos Suspendedos Totales, Demandas Química y Bioquímica De Oxígeno, Grasas Y Aceites. *European Scientific Journal*, 40-47.
- Levespiel, O. (2004). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Oregon: Lumisa Wiley.
- López Cepero Gonzáles, A. (2011). *DISEÑO DE UN PROCESO DE OZONIZACIÓN POR INYECCIÓN VENTURI PARA LA ELIMINACIÓN DE PESTICIDAS PRESENTES EN UN AFLUENTE A UNA ESTACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE*. Cádiz: Universidad de Cádiz.

- López Miguel, A. (2015). *Estudio del proceso de degradación electroquímica de colorantes tipo ftalocianina en matrices acuosas contaminadas con azul lanasol 8G*. Querétaro: Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica.
- Marcano, D. (2018). *Introducción a la Química de los Colorantes*. Caracas: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales.
- Marce, M., Domenjoud, B., Esplugas, S., & Baig, S. (2016). Ozonation treatment of urban primary and biotreated wastewaters: Impacts and modeling. *Chemical Engineering Journal*, 768-777.
- Mohan, S., & Oke, N. (2021). Application of the Optimized Pre-ozonation Treatment for Potential Resource Recovery from Industrial Textile Effluent. *Ozone: Science & Engineering*, 1-14.
- Montoya Valencia, F. A. (2005). *Química de los procesos textiles*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Muniasamy, A., Sivaporul, G., Gopinath, A., John, J., Achary, A., & Velayudhaperumal Chellam, P. (2019). Fractional factorial design modelling on degradation of direct Red 81 Dye by advanced oxidation process—ozonation: reaction kinetics. *Water Science & Technology*, 1-10.
- Owen, T. (2000). *Fundamentos de la espectroscopía UV-visible moderna. Conceptos básicos*. Alemania: Agilent Technologies.
- Patiño, K. V., Arroyave, S. M., & Marín, J. M. (2012). Oxidación Electroquímica y Ozonización Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. *Información Tecnológica*, 41-52.
- Peace, G. S. (1993). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Massachusetts: Addison Wesley.
- Quaff, A. R., Venkatesh, S., & Venkatesh, K. (2020). Degradation of Azo Dye by Ozone Oxidation: Cost Analysis and Buffering Effects on Dye Decomposition. *The National Academy of Sciences*, 339-341.

- Ratnawati, R., Kusumaningtyas, D. A., Suseno, P., & Prasetyaningrum, A. (2017). Mass Transfer Coefficient of Ozone in a Bubble Column. *MATEC Web of Conferences* (págs. 1-4). Indonesia: RSCE.
- Rodriguez Espinoza, R., Alfaro Cruz, S., & Jamanca Gonzáles, N. (2017). *Transferencia de Masa*. Lima: Universidad Nacional de Barranca.
- Sepideh Bakht, t. S., Dehghanzadeh, R., Aslani, H., & Shahmahdi, N. (2020). Activated carbon catalyzed ozonation (ACCO) of Reactive Blue 194 azo dye in aqueous saline solution: Experimental parameters, kinetic and analysis of activated carbon properties. *Journal of Water Process Engineering*, 1-11.
- Sereviche Sierra, C. A., Castillo Bertel, M. E., & Acevedo Barrios, R. L. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas*. Cartagena de Indias: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso.
- Sergey, B. (2020). THE APPLICATION OF OZONE TO REDUCE THE COLORING INTENSITY OF AQUEOUS SOLUTIONS. *Web of conferences*, 1-10.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C., & Kaul, S. (2001). Un estudio comparativo sobre la oxidación de dispersos colorantes por procesos electroquímicos, ozono, reactivo hipoclorito y fenton. *PERGAMON*, 2129-2136.
- Taguchi, G., & Clausing, D. (1990). Robust Quality. *Harvard Business Review*, 65-75.
- Toledo, A. (2006). *Agua, hombre y paisaje*. Ciudad de México: Delmo Comunicaciones S.A. de C.V.
- Turhan, K. (2021). Determination of optimal conditions in decolorization of disperse dyes in aqueous solution by ozonation. *Global NEST Journal*, 142-151.
- UNESCO; Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020. Agua y Cambio Climático*. París: UNESCO.

- Vilaseca Vallvé, M. (2015). *Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., & Rorrer, G. L. (2008). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer 5th Edition*. Oregon: John Wiley & Sons, Inc.
- Yang, Y.-C., Zeng, S.-S., Ouyang, Y., Sang, L., Yang, S.-Y., Zhang, X.-Q., . . . Zhang, N. (2021). An intensified ozonation system in a tank reactor with foam block stirrer: Synthetic textile wastewater treatment and mass transfer modeling. *Separation and Purification Technology*, 1-11.
- Yin, H., Qiu, P., Qian, Y., Kong, Z., Zheng, ., X., Tang, Z., & Gou, H. (2019). Textile Wastewater Treatment for Water Reuse: A Case Study. *Processes*, 1-21.
- Zaruma Arias, P. E., Proal Nájera, J. B., Chaires Hernandez, I., & Salas Ayala, H. I. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 38-47.

Montaje Experimental del Proceso de Ozonización



Reactor de Columna de Vidrio para el Proceso de Ozonización



Colorante Azul Ácido 9

Muestras Antes y Después del Proceso de Ozonización



Prueba 1



Prueba 2



Prueba 3



Prueba 4



Prueba 5



Prueba 6



Prueba 7



Prueba 8

Colorante Remazol Amarillo RR GRAN

Muestras Antes y Después del Proceso de Ozonización



Prueba 1



Prueba 2



Prueba 3



Prueba 4



Prueba 5



Prueba 6



Prueba 7



Prueba 8

Colorante Procion Azul H-ERD

Muestras Antes y Después del Proceso de Ozonización



Prueba 1



Prueba 2



Prueba 3



Prueba 4



Prueba 5



Prueba 6



Prueba 7



Prueba 8