

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**GRADO DE REMOCIÓN DE COLORANTES EN LOS EFLUENTES
FLEXO GRÁFICOS, EMPLEANDO UN MÉTODO COMBINADO
ELECTRO CATALÍISIS - OXIDACIÓN AVANZADA**

AUTOR:

LEONARDO RUFINO, CARLOS PEREYRA

Callao, 2021

PERÚ

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'LD', is located in the bottom left corner of the page.

90

DEDICATORIA

A la memoria de todos a aquellos hombres cultores de la ciencia, cristianos o agnósticos que brindaron su genialidad a quienes pretendan penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Y también a todos los que estudian, enseñan o admiran a la prodigiosa ciencia de los tamaños, de las formas, de los números, de las medidas, de las funciones, de los movimientos y de las transferencias de masa y energía.

El autor



AGRADECIMIENTO

Quiero dar las gracias a todas las personas que de una u otra forma han hecho posible la realización de este trabajo.

De forma especial a la empresa TECNICOLOR, por permitirnos el ingreso a vuestras instalaciones a fin de recoger las muestras de sus aguas residuales de impresión.

A la Universidad Nacional del Callao, quien a través del fondo especial de desarrollo Universitario (FEDU) por brindarme el apoyo económico para desarrollar este Proyecto, compartido experiencias y estrategias con otros colegas dedicados a este campo del tratamiento de aguas residuales industriales.

A los directivos y al personal técnico del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAC, por el apoyo y la facilidad para utilizar el módulo de oxidación avanzada para realizar las pruebas correspondientes.

A todos mis familiares vayan mis más cálidas palabras de gratitud. por comprenderme y por unirse a mi causa como un solo puño, el reconocimiento especial a mi esposa Nice e hijos por brindarme el apoyo moral y la energía radiante a fin de concluir con este aporte orientado a menguar la contaminación de nuestro planeta.



Índice

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	10
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. Descripción de la realidad problemática	17
1.2. Formulación del problema.....	18
1.2.1. Problema general.....	18
1.2.2. Problemas específicos.....	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo general.....	19
1.3.2. Objetivos específicos.....	19
1.4. Limitantes de la investigación	19
1.4.1. Teórico.....	19
1.4.2. Temporal	20
1.4.3. Espacial	20
II. MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes	21
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	21
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	26
2.2. Bases teóricas.....	29
2.2.1. Agua	29
2.2.2. Distribución mundial del agua.....	29
2.2.3. Legislación ambiental peruana orientada a preservar el agua, como medio de vida	30
2.2.4. Descripción de los principales parámetros considerados en el análisis de un efluente residual de aguas.....	31

2.2.5. Tratamiento de efluentes contaminados	34
2.2.6. Tratamiento del efluente de la industria gráfica	36
2.3. Conceptual	41
2.3.1. Aguas residuales	41
2.3.2. Aguas residuales industriales	41
2.3.3. Colorantes flexos gráficos.....	41
2.3.4. Aguas residuales de impresión fotográfica.....	41
2.3.5. Características de los efluentes flexográficos	42
2.3.6. Principales parámetros para caracterizar las aguas residuales de la industria gráfica	43
2.3.7. Colorantes y aguas residuales.....	46
2.3.8. Catalizadores	52
2.3.9. Procesos de oxidación avanzada	54
2.3.10. Tratamiento con UV-H ₂ O ₂	60
2.3.11. Acción del peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂).....	61
2.4. Definición de términos básicos.....	62
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	64
3.1. Hipótesis	64
3.1.1. Hipótesis general	64
3.1.2. Hipótesis específicas	64
3.2. Definición conceptual de variables	64
3.2.1. Operacionalización de variables	64
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	66
4.1. Tipo y diseño de investigación	66
4.2. Método de investigación.....	66
4.3 Población y muestra.....	67
4.4. Lugar de estudio	68
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	68
4.6 Análisis y procesamiento de datos	76
V. RESULTADOS	85
5.1. Resultados descriptivos.....	85
5.2. Resultados inferenciales	85

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	96
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	97
6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	98
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	105



Índice de tablas

Tabla 1. : <i>Principales contaminantes que se vierten a las aguas superficiales de acuerdo al sector industrial</i>	34
Tabla 2.: <i>Clasificación de colorantes flexográficos según sus aplicaciones tecnológicas</i>	46
Tabla 3.: <i>Clasificación de colorantes textiles según grupos funcionales presentes en la estructura química</i>	47
Tabla 4.: <i>Principales grupos de colorantes atendiendo a su grupo cromóforo</i>	48
Tabla 5.: <i>Principales grupos de colorantes atendiendo a su modo de aplicación</i>	49
Tabla 6.: <i>Propiedades del colorante CV</i>	50
Tabla 7.: <i>Propiedades del colorante C2R</i>	51
Tabla 8.: <i>Propiedades del colorante BY11</i>	52
Tabla 9.: <i>Matriz de operacionalización de variables e indicadores</i>	65
Tabla 10. : <i>Registro de reporte diario</i>	67
Tabla 11. : <i>Características del equipo experimental</i>	76
Tabla 12. : <i>Parámetros físico-químicos iniciales de la muestra de agua</i>	81
Tabla 13. : <i>Parámetros fisicoquímicos del agua pretratada con electrodos de aluminio</i>	81
Tabla 14. : <i>Parámetros iniciales de la muestra utilizada, en el proceso de coagulación con 17,5 ml/L.</i>	82
Tabla 15. : <i>Resultados de los parámetros fisicoquímicos</i>	83
Tabla 16. : <i>Resultado del proceso del tratamiento para agua con coloración roja</i>	83
Tabla 17. : <i>Resultado del proceso del tratamiento para agua con coloración azul</i>	84
Tabla 18. : <i>Resultado del proceso del tratamiento para agua con coloración negra</i>	84
Tabla 19. : <i>[OH-] en M vs t (min) para la reacción en electrodos de diferentes materiales</i>	86
Tabla 20. : <i>% de remoción del TOC con el tiempo de reacción en diferentes conductividades</i>	87

Tabla 21. : % de remoción del croma con el tiempo de reacción en diferentes conductividades	89
Tabla 22. : % de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente.....	90
Tabla 23. : % de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente.....	91
Tabla 24. : Porcentaje de reducción de color respecto a los parámetros de operación	93
Tabla 25.: Absorbancias vs parámetros de operación.....	94



Índice de figuras

Figura 1.: <i>Flujo del proceso de fabricación de periódicos, libros y revistas y efluentes producidos</i>	40
Figura 2. : <i>Efluente de una empresa gráfica descargando al río Rímac</i>	42
Figura 3. : <i>Estructura molecular del colorante Violeta de Cristal</i>	49
Figura 4.: <i>Estructura molecular del colorante Chromotrope 2R</i>	51
Figura 5.: <i>Estructura molecular del colorante BY11</i>	52
Figura 6. : <i>Instrumental de valoración volumétrica</i>	68
Figura 7. : <i>Equipo empleado para detectar la absorbancia del blanco y del analito</i>	69
Figura 8. : <i>Muestras de las pinturas bases que se emplean en la preparación de los tintes de impresión</i>	70
Figura 9. : <i>Muestras recogidas para el tratamiento electrocatalítico</i>	70
Figura 10. : <i>Diseño y construcción de las celdas electrolíticas</i>	71
Figura 11. : <i>Rectificador de corriente de 0-15 V</i>	72
Figura 12. : <i>Sistema instalado con el agua residual a tratar mediante electrocatálisis</i>	73
Figura 13. : <i>Módulo de oxidación avanzada con muestra de agua residual</i>	74
Figura 14. : <i>Lectura de la absorbancia en función del tiempo</i>	75
Figura 15. : <i>Disposición de la celda electroquímica</i>	77
Figura 16. : <i>Sistema experimental para generar y capturar los iones hidroxilo</i> 78	
Figura 17. : <i>Sistema experimental para para el tratamiento de las aguas residuales electrocatalíticas de impresión real</i>	79
Figura 18. : <i>[OH-] en M vs t (min) para la reacción en electrodos de diferentes materiales</i>	86
Figura 19. : <i>% de remoción del TOC con el tiempo de reacción en diferentes conductividades</i>	88
Figura 20. : <i>% de remoción del croma con el tiempo de reacción en diferentes conductividades</i>	89
Figura 21. : <i>% de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente</i>	91



Figura 22. : % de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente.....	92
Figura 23. : Variación del porcentaje de reducción de color como una función del tiempo a [Colorante] = 10 ppm, [H2O2]= 50%W/W, pH = 10...	93
Figura 24. : Variación del porcentaje de reducción de color como una función del tiempo a [Colorante] = 15 ppm, [H2O2]= 10%W/W, pH = 6.....	94
Figura 25. : Absorbancia como función del tiempo	95
Figura 26. : Degradación de color del efluente flexográfico en el tiempo.....	95

25

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue lograr la degradación de la concentración de los colorantes en los efluentes flexo gráficos empleando el método combinado de electro catálisis y oxidación avanzada.

La investigación realizada fue de diseño experimental y partió del recojo y muestreo del agua coloreada de impresión, la cual fue sometida a ensayos en un equipo diseñado y construido para este propósito, que permitió realizar variaciones de voltaje e intensidad de corriente, con el posterior análisis de materia orgánica en cada muestra que pasó a través del proceso de electrocatálisis y de oxidación avanzada a fin de lograr la mayor degradación posible. En este trabajo de investigación se muestran los resultados obtenidos en el tratamiento de aguas residuales que contienen disueltas tintas flexográficas, las cuales son empleadas en las industrias de colorantes. Concluyendo que el tratamiento electroquímico (vía electrocoagulación), por si solo, no promueve remociones significativas, debido a la aglomeración de sólidos en los electrodos que inhabilitan el proceso. El empleo de policloruro de aluminio puro en solución acuosa (como pretratamiento) provoca la remoción de una cantidad considerable de contaminantes, provocando con ello la disminución de los valores de color, turbiedad y DQO. El proceso electrocatalítico podría eliminar eficazmente el TOC y croma de las aguas residuales de impresión. Respecto al proceso de oxidación avanzada, el porcentaje de reducción de color disminuye a medida que transcurre el tiempo, variando la cantidad del peróxido de hidrógeno.

Palabras clave: *Remoción de colorantes, efluentes flexográficos, método combinado, electro catalísis, oxidación avanzada*



ABSTRACT

The objective of the present investigation was to achieve the degradation of the concentration of the dyes in the flexographic effluents using the combined method of electrocatalysis and advanced oxidation.

The research carried out was of experimental design and started from the collection and sampling of the colored printing water, which was subjected to tests in equipment designed and built for this purpose, which allowed variations in voltage and current intensity, with subsequent analysis. of organic matter in each sample that went through the electrocatalysis and advanced oxidation process in order to achieve the highest possible degradation. This research work shows the results obtained in the treatment of wastewater containing dissolved flexographic inks, which are used in the dye industries. Concluding that the electrochemical treatment (via electrocoagulation), by itself, does not promote significant removals, due to the agglomeration of solids in the electrodes that disable the process. The use of pure aluminum polychloride in aqueous solution (as a pretreatment) causes the removal of a considerable amount of pollutants, thereby causing a decrease in the color, turbidity and COD values. Electrocatalytic process could effectively remove TOC and chroma from printing wastewater. Regarding the advanced oxidation process, the percentage of color reduction decreases over time, varying the amount of hydrogen peroxide.

Keywords: *Dye removal, flexographic effluent, combined method, electro catalysis, advanced oxidation*

INTRODUCCIÓN

En las actividades humanas, tanto domésticas como industriales, existe la generación de residuos, puesto que todo proceso que involucre transformación de la materia prima en algún producto terminado inevitablemente genera residuos (Zaldumbide, 2008, p.1).

El desarrollo tecnológico ha ocasionado un vertiginoso crecimiento de la demanda de los recursos naturales. Los efectos no se hacen esperar y poco a poco, el hombre está experimentando diferentes hechos palpables que pueden originar alteraciones naturales de repercusiones.

Un ejemplo de este desarrollo es el de las sustancias empleadas en los procesos de impresión o coloración, a las cuales se les denominan tintas, que en general son una combinación o mezcla de diferentes compuestos que dependiendo de sus características darán lugar a diferentes técnicas de proceso de coloración (Cifuentes, Durand & Sepúlveda , 1999).

Las industrias en general utilizan grandes cantidades de agua y constituyen el principal factor en el incremento continuo de la contaminación de la misma. Los diversos componentes de las aguas de procesos industriales son cada vez más complejos y variables, por consiguiente, se tendrá que desarrollar la tecnología de control de la contaminación industrial que asegure un tratamiento efectivo y económico de la contaminación causada. (Kent, 1987, p. 693).

De aquí surge la importancia de realizar un tratamiento de efluentes industriales aplicando diversos procesos o técnicas con el objetivo de devolver al medio el agua utilizada dentro de los diferentes procesos tecnológicos en condiciones óptimas de descarga. Logrando que gran parte de los agentes contaminantes no terminen en el medio (Zaldumbide, 2008, p. 3).

Por lo general las aguas residuales son tratadas con procesos encargados de retirar los pigmentos de la solución. Este tipo de procesos consta, por lo habitual de tres etapas. 1. Coagulación, 2. Floculación y sedimentación y 3. Filtrado o separación mediante membranas. Además, se

disponen de otras técnicas como la eliminación por adsorción con carbón activado y tratamiento mediante sistemas biológicos, aunque este último no es una completa solución al problema debido a la resistencia biológica de algunos tintes. (Lucas y Pérez, 2006, p.235).

Debido a esta problemática se han desarrollado los procesos de oxidación avanzada (POA), que son tecnologías basadas en procesos de destrucción de los contaminantes por medio de sustancias químicas conocidas como radicales hidroxilos (OH^\cdot), los cuales tienen la propiedad de ser altamente oxidantes. En estos tratamientos los radicales hidroxilos reaccionan con el contaminante y lo transforman en compuestos inofensivos al medio ambiente. Los POA pueden ser combinaciones de O_3 /UV, H_2O_2 /UV, O_3 / H_2O_2 /UV, H_2O_2 / Fe II, TiO_2 /UV y TiO_2 / H_2O_2 /UV. (Papadopoulos y otros. 2006)

El objetivo principal de este trabajo es determinar el grado de remoción de color de un agua residual con tintes de impresión, tratada previamente con alguna metodología apropiada, para lo cual, la investigación fue estructurada en seis capítulos.

En el Capítulo I. Planteamiento del problema, se describe la realidad problemática, se formula el problema y objetivos de investigación, así como los limitantes.

En el Capítulo II. Marco teórico, se presentan los antecedentes de investigación, internacionales y nacionales, seguidamente las bases teóricas, así como las conceptuales, finalizando con la definición de términos básicos.

El Capítulo III. Variables e Hipótesis, contiene la hipótesis general y específicas, así como las variables de estudio.

Seguidamente se desarrolló el Capítulo IV. Diseño metodológico, en el cual se precisa el tipo y diseño de investigación, el método, se definen la población y muestra de estudio, el lugar de estudio, así como las técnicas e instrumentos para la recolección de la información. El Capítulo V. Resultados, contiene los resultados descriptivos e inferenciales de la investigación, utilizando tablas, figuras y gráficos.

En el Capítulo VI se realiza la discusión de resultados, en el cual se realiza la contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados, así como la contrastación de los resultados con otros estudios similares.

Asimismo, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos que complementan el estudio.



I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La contaminación del agua se ha convertido en un problema mundial hoy en día. Las muertes y enfermedades se producen en todo el mundo debido a la contaminación del agua, aproximadamente 14000 personas mueren cada día debido a ello. La mayor amenaza para la calidad del agua está planteada por fuentes de industriales (Chaundhry & Malik, 2017).

Más de diez mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes sintéticos son usados en las diferentes industrias como la textil, papelera, cosmética y farmacéutica, liberando grandes cantidades de efluentes, contaminando con colorantes al medioambiente. La industria textil es una de las industrias con mayor consumo de agua y las aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza, entre ellos destacan los colorantes, compuestos que son muy resistentes, difíciles de eliminar (Cortazar, Coronel & Escalante, 2021).

La contaminación del agua es un problema que se agudiza, las industrias textiles incorporan el agua al proceso productivo, generando aguas residuales y la retornan a la superficie de la tierra sin el tratamiento adecuado, representando un riesgo latente para el ser humano y la biodiversidad.

En el Informe mundial de las Naciones Unidas sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 se demuestra que una mejor gestión de las aguas residuales implica no solo la reducción de la contaminación en las fuentes, sino también la eliminación de contaminantes de los flujos de aguas residuales, la reutilización de las aguas regeneradas y la recuperación de los subproductos útiles. Conjuntamente, estas cuatro acciones generan beneficios sociales, ambientales y económicos para toda la sociedad, contribuyendo así al bienestar y a la salud, a la seguridad del agua y la alimentaria y al desarrollo sostenible (UNESCO, 2017).

En Perú, la magnitud real del volumen de las aguas residuales que las industrias formales e informales producen no es conocida con exactitud. A nivel

nacional, varias industrias textiles peruanas vierten sus aguas residuales ya sea en el desagüe o a los ríos sin el adecuado tratamiento. Los vertimientos han generado que varios ríos adquieran distintas tonalidades de colores (Brañez, Gutiérrez, & Pérez, 2018).

Para la disminución de la concentración de los colorantes flexo gráficos contenidos en estas aguas residuales se han utilizado diferentes tecnologías de tratamientos combinados y tratamientos terciarios.

Por tal razón en esta investigación se evaluará la remoción del colorante de impresión directa de una solución acuosa utilizando un proceso combinado de electro catálisis y oxidación avanzada.

Es necesario realizar métodos más efectivos a las tecnologías tradicionales adoptadas por las industrias flexo gráficas para contribuir con el cuidado de nuestro planeta.

La existencia de leyes como el D.S. N°021-2009-vivienda que regula la concentración mínima permisible de contaminantes en las descargas freáticas.

La industria dedicada a la impresión no ha quedado exenta de este reglamento ya que desperdicia gran cantidad de este líquido elemento, como resultado de las operaciones propias este proceso.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Será factible degradar la concentración de colorantes en los efluentes flexo gráficos empleando el método combinado de electro catálisis-oxidación avanzada?

1.2.2. Problemas específicos

- a. ¿Qué parámetros nos permitirán caracterizar a las aguas coloreadas de impresión gráfica?
- b. ¿Cuáles serán las variables que nos permitirán controlar el grado de remoción de colorantes en estas aguas flexo gráficas?

- c. ¿Cómo será el sistema experimental electro catalítico a emplear en el tratamiento de las aguas residuales flexo gráficas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Lograr la degradación de la concentración de los colorantes en los efluentes flexo gráficas empleando el método combinado de electro catálisis y oxidación avanzada.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Caracterizar a las aguas residuales de impresión gráfica (Turbidez, pH, DQO, etc.)
- b. Identificar a las variables que nos permitirán controlar el grado de remoción de colorantes en estas aguas flexo gráficas.
- c. Diseñar el sistema experimental electro catalítico a emplear en el tratamiento de las aguas residuales flexo gráficas.

1.4. Limitantes de la investigación

El presente proyecto pone énfasis en la necesidad de construir un módulo de electrocatálisis con la consiguiente necesidad de contar con diferentes equipos a fin de comprobar la remoción de carga orgánica presente en el agua residual flexográfica.

1.4.1. Teórico

Se establecieron como limitantes teóricas que debido a ser un proyecto pionero a desarrollarse en las instalaciones de la FIQ- UNAC, se necesitó además de las fuentes bibliográficas de libros e internet, concertar entrevistas con jefes de proyectos que vienen trabajando en el tratamiento de las aguas coloreadas con tintes, para recopilar su feedback y de ese modo poner en marcha la construcción de un sistema electrocatalítico.

1.4.2. Temporal

El periodo de tiempo en la recolección de datos experimentales fue insuficiente. Según antecedentes bibliográficos el proceso del tratamiento de las aguas residuales de impresión se desarrolla en un tiempo de 6 meses a más.

La puesta en marcha del módulo de electrocatálisis tomó más de dos semanas debido a que no se pudo estabilizar el proceso. Todo ello nos llevó a un desajuste en nuestro programa establecido, máxime al presentarse una serie de inconvenientes debido a la crisis sanitaria en que nos encontramos.

1.4.3. Espacial

Según el artículo 2, inciso 22 de la Constitución política del Perú, se establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.

Ley general del ambiente – Ley N° 28611 al 15/10/2018

En el artículo primero menciona que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida; y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento de los recursos naturales de manera sostenible y el desarrollo sostenible del país.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

López, Castellanos & Lango (2021) en su investigación “Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión”. Concluye que existe una gran diversidad de tratamientos de oxidación avanzada, los cuales tienen presentes los radicales $^{\circ}\text{OH}$. Estos radicales son altamente efectivos para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable. A pesar de que los tratamientos más típicos que los producen son ozono/peróxido de Hidrógeno, el proceso de oxidación Fenton se encarga de formar los mismos radicales con la presencia de hierro como catalizador y peróxido. Además ayuda en el proceso de precipitación, ya que a comparación de los otros 2 tratamientos al poseer durante su proceso una sal de hierro, coagula la materia en diversos procesos de industrias como la alimenticia, papelera, farmacéutica, entre otros. Caso contrario con los procesos electroquímicos si bien es cierto, estos procesos también generan el radical $^{\circ}\text{OH}$ derivado de una carga eléctrica en el medio y funcionan en la reducción de compuestos orgánicos, también se pueden ocupar para aguas residuales contaminadas con metales pesados. Esto, debido a los cátodos y ánodos que se utilizan en el proceso.

Kassimi, Boutouil & El Himri (2020) realizaron la investigación “Eliminación selectiva y competitiva de tres colorantes básicos de sistemas simples, binarios y ternarios en solución acuosa: un estudio experimental y teórico”. El estudio evalúa la adsorción selectiva y competitiva de tres tintes básicos, a saber, Basic blue 9 (BB9), Basic blue 41 (BB41) y Basic yellow 28 (BY28) a partir de soluciones simples, binarias y ternarias sobre arcilla natural safiot (NSC). . Para ello, se estudió y examinó en modo discontinuo el efecto de varios parámetros como el pH inicial, la concentración inicial de colorante, la dosis de adsorbente y la temperatura de la solución. El adsorbente probado se caracterizó por fluorescencia de rayos X (XRF), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de rayos X dispersiva (EDX), infrarrojos por

transformada de Fourier (FT-IR) y difracción de rayos X (XRD). Los resultados de XRF indican altos porcentajes de SiO₂ (47,44%) y Al₂O₃ (31,24%). El difractograma de difracción de rayos X identificó a la caolinita como la principal fase mineral en presencia de cuarzo, illita, calcita y dolomita. Los datos de adsorción fueron examinados por las isothermas de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich. Se encontró que para sistemas simples, binarios y ternarios, los resultados indicaron que el modelo de Langmuir proporcionó la mejor correlación de los datos experimentales. Los resultados experimentales obtenidos demuestran una alta eficiencia de adsorción de colorantes en los sistemas mono y multi de NSC. Los cálculos de DFT muestran que BB9 ($\omega = 6.18$) es más electrofílico que BB41 ($\omega = 4.10$) y BY28 ($\omega = 2.60$), lo que indica que BB9 se adsorbe primero y se favorece en comparación con BB41 y BY28. Además, las simulaciones de dinámica molecular (MD) y Monte Carlo (MC) se utilizan como una herramienta poderosa para proporcionar un mejor escenario teórico para comprender el modo de adsorción en la arcilla safiot natural (NSC).

Kaykhaii, Sasani & Marghzari (2018) en su investigación “Eliminación de tintes del medio ambiente mediante proceso de absorción”. Los primeros Concluyendo que los tintes orgánicos se consideran contaminantes del medio ambiente, que se basan principalmente en métodos biológicos, químicos y físicos. Dado que los tintes orgánicos son cancerígenos y mutágenos, los investigadores están tratando de encontrar algunos métodos para eliminar esta contaminación del agua/aguas residuales. la absorción es un método económico y sencillo para este propósito. Las características de adsorción y los adsorbentes estructurales juegan un papel crucial en su uso en diversas aplicaciones. Las características que pueden afectar la eliminación de contaminaciones son la capacidad de adsorción, el área de superficie específica, el volumen de los poros, el tamaño de grano y la distribución del tamaño de los poros. Son tan importantes porque si cambian, la eficiencia de eliminación también cambia.

Mauricio (2017) en su tesis de maestría “Propuesta de recuperación de solventes provenientes de desechos de tintas flexográficas, con miras a la certificación ambiental ecuatoriana” sostiene que en la actualidad la flexografía

es uno de los sistemas de impresión más rápidos y económicos a nivel mundial. Estos sistemas son utilizados en: cajas de cartón corrugado, periódicos, empaques flexibles para alimentos, etiquetas, y toda clase de empaques en su mayoría. La industria alimenticia sin lugar a duda se ve beneficiada de este sector ya que sus ganancias se ven incrementadas por el consumo de sus productos, al convertirse esta actividad en un aliado estratégico con respecto a la calidad de presentación de sus productos, incrementando sus ventas y posicionamiento de las diferentes marcas en el mercado, utilizando vistosas imágenes logos y mercadotecnia. He de allí la importancia de establecer la implementación de una gestión integral de la recuperación de los solventes provenientes de los desechos de las tintas flexográficas, con el fin de disminuir los impactos ambientales generados al medio ambiente, cumpliendo con las exigencias establecidas por la Autoridad Ambiental Nacional. Para lograr esto se realizó un análisis de los requisitos técnicos legales ambientales aplicables a la organización con respecto al manejo de estos desechos; así como el análisis costo beneficio con respecto al reciclaje de los solventes vs el tratamiento por incineración con un gestor acreditado para el manejo de desechos peligrosos.

Torres (2014) en su tesis titulada “Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros”. Llega a la conclusión que entre las características propias de las aguas residuales de origen alimenticio se encuentra el poseer un elevado índice de biodegradabilidad, el cual la vuelve menos apta ante tratamientos fisicoquímicos convencionales. Los resultados al aplicar técnicas avanzadas de oxidación demuestran que la efectividad en la remoción de materia orgánica es alta, y puede ser mejorada por procesos biológicos en los efluentes provenientes del procesado de cerezas y tomates. La aplicación de procesos biológicos posteriores al tratamiento de Fenton permite reducir costos de tratamiento, pues en el caso del efluente de procesado de tomates, el aplicar una dosis de 100 mM H₂O₂ + 2,5 mM Fe(II) permite reducir la DQO y la DBO hasta valores muy cercanos a los L.M.P., sin embargo, una reducción de dosis hasta 50 mM H₂O₂ + 1,5 mM Fe(II) y adición de un biofiltro de balsa, permite

lograr valores por debajo de los permitidos a un coste menor. Esto no ocurre en el sentido contrario, es decir, aplicando biofiltros y luego el tratamiento de Fenton.

Cheng et al (2013) en su trabajo de Tratamiento de aguas residuales de impresión real con un proceso electrocatalítico, al respecto sostienen: El proceso de impresión no sólo se utiliza para la impresión de libros y periódicos, sino que a menudo se utiliza en otras aplicaciones, tales como ropa, electrodomésticos y tableros de circuitos. Después de que se complete el proceso de impresión, el procedimiento de limpieza debe llevarse a cabo mediante el uso de diversos productos químicos tales como éteres, alcoholes, fenoles, aldehidos, cetonas, benceno y ésteres, de modo que las aguas residuales a menudo contienen una variedad de disolventes, tensoactivos, colorantes y otros productos químicos, lo que aumenta considerablemente la dificultad del tratamiento de aguas residuales. Las tecnologías de tratamiento tradicionales para la impresión de aguas residuales incluyen la coagulación química y bio-degradación. Para la coagulación química, se generará una gran cantidad de lodos, lo que conduce no sólo a un magran cantidad de costes de seguimiento, sino la contaminación tóxicos presentes en las aguas residuales van a inhibir la actividad microbiana. En consecuencia, se espera una tecnología de tratamiento innovadora y a la vez eficiente para el tratamiento de las aguas residuales de impresión. La tecnología electrocatalítica es prometedora para los orgánicos biorecalcitrantes la degradación debido a la generación de radicales hidroxilos.

Vallet (2013) en su tesis doctoral nominada "Síntesis y caracterización de catalizadores para la oxidación húmeda catalítica de colorantes y aguas residuales", en su resumen sostiene que: Hoy en día, son numerosas las industrias que producen efluentes líquidos coloreados, siendo las mas importantes la textil y la papelera. Por ello, resulta necesario encontrar métodos de tratamiento eficaces que permitan eliminar los colorantes presentes en estos efluentes acuosos. Las técnicas de adsorción permiten eliminar estos compuestos del agua, pero tan sólo consiguen transferir la contaminación del medio líquido al sólido, por lo que las técnicas de oxidación avanzada parecen

ser las más adecuadas. La oxidación húmeda (wet air oxidation, WAO) ha sido propuesta como una alternativa a los métodos convencionales biológicos para la eliminación de contaminantes tóxicos que se encuentran en altas concentraciones en las aguas residuales industriales. Este proceso suele llevarse a cabo a altas temperaturas (150-370°C) y presiones de (5-30 Mpa) con aire, oxígeno y peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes más comunes y puede ser usada para tratar aguas residuales tanto urbanas como industriales con alta carga orgánica, con las cuales los procesos biológicos aerobios y anaerobios son ineficientes. Las condiciones de reacción, más o menos severas, hacen aumentar la solubilidad del oxígeno del agua residual, lo que provoca la formación de radicales hidroxilos, que son los responsables de la oxidación de la materia orgánica, por lo que esta tecnología puede considerarse en los denominados procesos de oxidación avanzada. Las principales variables que influyen en el grado de oxidación de los contaminantes son la temperatura, la presión parcial del oxígeno, el tiempo de residencia en el reactor y la facilidad de oxidación de los contaminantes considerados así como su concentración.

Castro & Duran (2013) estudiaron la efectividad de los procesos de oxidación avanzada H_2O_2/UV y $H_2O_2/Fe^{2+}/UV$ en la degradación y decoloración de agua contaminada con colorante textil. Para ello analizaron el efecto de la concentración inicial del colorante, el pH de la solución, la concentración de hierro y la concentración de peróxido de hidrógeno mediante un diseño estadístico de experimentos de Taguchi. se encontró que tanto el proceso H_2O_2/UV como el $H_2O_2/Fe^{2+}/UV$ son tratamientos viables para tratar aguas contaminadas con colorante textil, con los que se alcanzaron porcentajes altos en la disminución del color y reducción de su contenido orgánico; siendo el proceso Foto-Fenton ($H_2O_2/Fe^{2+}/UV$) el que generó resultados más favorables en la degradación y decoloración del tinte, en las siguientes condiciones de operación: pH= 2, concentraciones de colorante de 100 ppm, de hierro de 80 ppm y de peróxido de hidrógeno de 102 ppm (3,0 mmol/L). Bajo estas condiciones se obtuvieron porcentajes de reducción promedio de 65,5% en la DQO y de 77,0% en la decoloración del tinte luego de

una hora de tratamiento. También se analizó el aspecto económico relacionando los gramos de DQO removidos por costo de reactivo utilizado, tomando como referencia los costos de sulfato de hierro y el peróxido de hidrógeno de grado industrial.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Guillén (2020) realizó la investigación “Tratamiento fisicoquímico de los efluentes del proceso de lavado de lana en una industria textil de Arequipa”. El objetivo fue evaluar el tratamiento fisicoquímico de los efluentes de lavado de lana provenientes de una industria textil de la ciudad de Arequipa con la finalidad de cumplir con los Valores Máximos Admisibles (VMA), utilizando como coagulante tricloruro férrico al 40 % y floculante polímero MT-FLOC 4299 al 0,1 %. Se caracterizó física y químicamente el efluente al inicio y al final del tratamiento, midiendo pH, temperatura, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales suspendidos (TSS), aceites y grasas, sulfatos, sulfuros, nitrógeno amoniacal, cianuro total, cromo hexavalente y turbidez. Para determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante se realizaron tres tratamientos utilizando un equipo de jarras (Jar-test) a 50, 200 y 40 rpm. El tiempo de sedimentación fue de 10 minutos. Los rangos de turbidez inicial oscilaron entre 200 y 800 NTU obteniéndose una remoción del 89 % en relación a la turbidez promedio de 526,96 NTU. La mejor dosis aplicada al efluente fue 200 mg/L de tricloruro férrico y 0,8 mg/L del floculante polímero catiónico MT-FLOC 4299. Los parámetros de remoción de contaminantes fueron: 84,97 % aceites y grasas; 82,55 % demanda bioquímica de oxígeno; 79,36 % demanda química de oxígeno; 99,60 % sólidos totales suspendidos; 96,67 % sólidos sedimentables y 75,65 % cianuro total, cumpliendo así con la Normativa Peruana, por lo que es factible aplicar el tratamiento a mayor escala.

Churada (2017) en Arequipa, realizó la tesis “Degradación del colorante azoico textil naranja II por el método de fotocátalisis heterogénea”. El objetivo de la investigación fue la degradación del colorante azoico: naranja II o naranja ácido 7, comúnmente usado en la industria textil, utilizando fotocátalisis

heterogénea, uno de los procesos de oxidación avanzada; los experimentos se realizaron usando TiO₂ Degussa P25, donde la reacción fotocatalítica se produce dentro del fotoreactor que consistía en un tubo en espiral de 30 cm colocado sobre un espejo curvo para concentrar la radiación solar durante 3 horas. Los resultados muestran que la fotocátalisis ha sido muy efectiva para la remoción del colorante azoico trabajado a una concentración de 100ppm, obteniéndose una remoción mayor a 90%. Las variables investigadas fueron: concentración del catalizador (100-600 mg/L), concentración del peróxido de hidrógeno (0-2 ml/L) y el tiempo (0-3 horas); la concentración del colorante naranja II se determinó por espectrofotometría visible a 485nm. para encontrar las condiciones de mayor influencia en la degradación del colorante. Concluyendo que se estableció por medio del método espectrofotométrico el sistema de medición para determinar la concentración del colorante azoico naranja II a una longitud de onda de 485 nm. y se obtuvo la curva de calibración del colorante azoico naranja II para poder determinar el porcentaje de degradación del colorante mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea. El acondicionamiento del fotoreactor artesanal a nivel de laboratorio permitió llevar a cabo el proceso de fotodegradación del colorante azoico naranja II realizando el seguimiento tomando muestras cada 15 minutos de cada experimento lográndose una degradación significativa de color utilizando fotocátalisis heterogénea.

Bermeo & Tinoco (2016) en su tesis “Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada”, tuvo el objetivo de remover colorantes de efluentes sintéticos de la industria textil. La metodología aplicada se basa en las variaciones de densidad de corriente, pH y tiempo de residencia, las variables de respuesta son porcentaje de remoción de color y la demanda química de oxígeno, aplicando electrocoagulación, esto permite llevar a cabo un tratamiento sin utilizar reactivos, usando cargas eléctricas que desestabilizan las partículas coloidales, facilitando su precipitación, para lo cual se utilizaron electrodos de hierro con 0,8 mm de separación. Como resultado de las experimentaciones se obtuvo una remoción del 97,57% de demanda química de oxígeno y 99,11% de color a densidad de

corriente 27,9 A/m², pH de 10 y en un tiempo de reacción de 8 min. Esta experiencia puede ser aplicada con otro tipo de efluentes. Concluyendo que este procedimiento es efectivo para remover compuestos refractarios de aguas residuales industriales logrando una eficiencia de remoción del 97,57% de Demanda Química Oxígeno y 99,11% de color.

Lozano (2013) realizó la tesis “Remoción de un colorante de los efluentes de la industria textil mediante absorción de una zeolita natural”. El informe se evaluó la remoción del colorante Rodamina B de una solución acuosa por adsorción en un tanque agitado y en una columna de lecho empacado utilizando un adsorbente de bajo costo. El adsorbente de bajo costo es una zeolita natural de la cual se determinaron las propiedades fisicoquímicas utilizando técnicas de caracterización tal cuales como fisisorción de nitrógeno y la difracción de rayos X. En el sistema de tanque agitado se investigó la influencia de la velocidad de agitación (0 - 200 rpm), del pH de solución (3 - 12), de la temperatura (20 - 50 °C), de la dosis adsorbente (1.0 - 5.0 g), del tamaño de partícula (1.0 - 2.5 mm) y de la concentración inicial del colorante (10 - 100 mg/l) sobre el proceso de absorción. Los datos de las isothermas de adsorción han sido analizados usando los modelos de Langmuir y Freundlich del cual el modelo de Freundlich es el que se ajusta mejor a los datos experimentales. También en el estudio de la cinética de adsorción la ecuación de pseudo-segundo orden se ajustó a los datos de adsorción del colorante sobre la zeolita natural. En el tanque agitado emplearon estudios cinéticos para obtener el coeficiente de difusión D_{eff} mediante un modelo matemático. El modelo matemático utilizado incluye la resistencia a la transferencia de materia ubicada en la película líquida. Finalmente utilizando el modelo y parámetros matemáticos en la adsorción de un colorante en un lecho empacado se obtuvieron curvas de ruptura donde se estudió el efecto de la concentración inicial del colorante, la velocidad de flujo, el tamaño del lecho y el tamaño de partícula en una columna de lecho empacado.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Agua

El agua es un recurso natural, indispensable para la vida, difícil de identificar y medir, debido a que se encuentra en el planeta en diferentes estados físicos lo cual le permite fluir, evaporarse, condensarse, congelarse y hasta filtrarse; por lo que es a partir de los diferentes estados de ésta que se establecen las bases de la economía de mercado y los derechos de propiedad sobre ella (Bolívar, 2004).

2.2.2. Distribución mundial del agua

El agua cubre aproximadamente el 72% de la superficie terrestre, por lo que a escala global no se podría definir como un recurso escaso. No obstante, a pesar de su abundancia en el planeta, únicamente el 2.53% del total es agua dulce y su disponibilidad difiere de acuerdo al continente, disponiendo de 15% en América del Norte y Central, 26% en América del Sur, 8% en Europa, 11% en África, 36% en Asia y 5% en Australia y Oceanía. Además, en cada continente existe disparidad entre la población y la disponibilidad de los recursos hídricos. Se pueden detectar diferencias de desarrollo entre varias ciudades, pueblos y comunidades de la misma región, que varían en función a esta relación (Bolívar, 2004).

A lo largo de la historia de la humanidad, asegurar el acceso al agua dulce ha sido vital para la estabilidad social de las culturas y las civilizaciones. Se puede notar que el acceso al agua dulce se convirtió en una fuente de poder y también en fuente de discordia que ha generado grandes conflictos desde tiempos inmemoriales. En la actualidad la escasez del agua representa una problemática a nivel mundial y se la retribuye a factores físicos, económicos o institucionales, los cuales fluctúan en el tiempo y en el espacio según el "Informe Desarrollo Humano de las Naciones Unidas, 2006" (SENAGUA, 2009). Este problema nos lleva a concienciar que del uso y gestión sostenible de este recurso depende la capacidad para satisfacer las necesidades en cantidad y calidad del agua para las actividades humanas actuales, sin impedir que las futuras generaciones satisfagan sus propias

necesidades.

2.2.3. Legislación ambiental peruana orientada a preservar el agua, como medio de vida

La norma suprema referida contiene los principios fundamentales que rigen la vida política y jurídica del país, cuyas normas relativas al medio ambiente se encuentran manifestadas en las siguientes disposiciones:

Segun el artículo 2, inciso 22 de la constitución política del Perú, se establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.

Ley general del ambiente – Ley N° 28611 al 15.10.18

En el artículo primero menciona que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida; y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individua y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento de los recursos naturales de manera sostenible y el desarrollo sostenible del país.

Ley General de Aguas, D.S. N° 261 -69-AP del y su reglamento de los títulos I, II, III al 24.06.1969

En el capítulo II, Artículo 57°, ningún vertimiento de residuos, solidos o gaseosos podrá ser efectuado en las aguas marítimas o terrestres del país sin la previa aprobación autorización de autoridad sanitaria.

En el capítulo IV, artículo 143°, los desagües y afluentes provenientes, de la industria, deberán ser evacuados preferentemente en redes o canales especialmente contruidos para estos fines, permitiéndose hacerlo en las redes y alcantarillados de las poblaciones, solamente previo los tratamientos requeridos para evitar el deterioro de dichas redes. En todos los casos no podrán contaminar ni solucionar las aguas superficiales o subterráneas ni las capas acuíferas, así como los terrenos de cultivo y los potencialmente cultivables.

El 23 de octubre de 2000, la Unión Europea (UE) establece un marco para la protección de las aguas mediante la aprobación de la directiva “Directiva Marco del Agua”, por lo que se establece un marco comunitario de actuación en la política del agua. La presente directiva marco tiene varios objetivos, concretamente la prevención y la reducción de la contaminación, la promoción del uso sostenible del agua, la protección del medio ambiente, la mejora de la situación de los ecosistemas acuáticos y la atenuación de los efectos de las inundaciones y de las sequías. Su objetivo último es alcanzar un “buen estado” ecológico y químico de todas las aguas comunitarias.

2.2.4. Descripción de los principales parámetros considerados en el análisis de un efluente residual de aguas

Entre los numerosos parámetros que permiten evaluar la calidad del agua, se deben tomar en cuenta los más representativos contemplados en la normativa ambiental vigente y cuyo análisis permitirá evidenciar la eficacia del tratamiento aplicado al efluente residual industrial:

a. Parámetros físicos

Color aparente: es producto de suspensiones naturales que interfieren con la calidad del agua.

Color verdadero: es el color causado por materia suspendida a nivel coloidal, propio de esa agua.

Turbidez: es la decreciente habilidad del agua para transmitir la luz. Es causada por materia particulada en suspensión con dispersión desde muy pequeña hasta muy gruesa. Este parámetro puede estar asociado a la presencia de:

Partículas: arcillas, sedimentos por escurrimiento,

Materia orgánica: que es materia vegetal en descomposición,

Plancton: por presencia de fertilizantes.

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Es la cantidad de sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento, son

principalmente de naturaleza orgánica, pero también, comprenden sales inorgánicas como las formadas con calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, que están disueltas en el agua y se mide en ppm, partes por millón. Los SST incluyen algunos de los materiales más objetables contenidos en el agua residual, entre ellos encontramos células biológicas que forman una masa de sólidos suspendidos en el agua y partículas de materiales inertes que adsorben sustancias orgánicas en su superficie (Panayotou et al (2003)).

Conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica hace referencia a la capacidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. Esta determinación indica la concentración total de componentes ionizados en las distintas soluciones. La conductividad eléctrica es proporcional al contenido de sales disueltas y, por tanto, está directamente relacionada con la suma de cationes o aniones que se determinen químicamente y en general, presenta una estrecha correlación con los sólidos totales disueltos. Las medidas varían dependiendo de la temperatura, por lo que se estandariza a 25°C.

Temperatura: Se relaciona directamente con el contenido de oxígeno disuelto. A mayor temperatura menor contenido de oxígeno disuelto. Para medir la temperatura se emplean termómetros o sondas.

b. Parámetros químicos

pH: La determinación del pH en el agua indica la tendencia a su acidez o alcalinidad, sin embargo, no mide el valor de la acidez o alcalinidad. La determinación de la acidez o alcalinidad de un efluente permite establecer la corrosividad del efluente. Además, el pH es un indicador de la capacidad trófica de la masa de agua. Las aguas ácidas se conocen como oligotróficas y las alcalinas como eutróficas. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos (Secretaría de comercio y fomento industrial de los estados Mexicanos).

Demanda química de oxígeno (DQO): Es una medida de la materia orgánica e inorgánica en el agua, que puede ser oxidada por un agente

químico oxidante expresada en mg/l; es la cantidad de oxígeno disuelto requerida para la oxidación química completa de contaminantes.

Por tanto, la DQO de muestras de agua se incrementa con el aumento de la concentración de la materia orgánica, lo que implicaría que una medición normal podría ser < 10 mg/L, mientras una lectura de 60 mg/L puede ser considerada como rica.

Demanda biológica de oxígeno (DBO): Estima la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar por acción biológica la materia orgánica presente en el agua y establece la rapidez con la que este material va a ser metabolizado por las bacterias que normalmente se encuentran presentes en los efluentes residuales (Fischer, 1979).

Carbono orgánico total (COT): Hace referencia a la cantidad de materia orgánica presente en una muestra. Dado que los contaminantes más comunes son de naturaleza orgánica, este parámetro permitiría conocer el grado de contaminación de aguas residuales. Así mismo se puede evaluar el grado de mineralización de compuestos orgánicos en una muestra de forma rápida y confiable (Gómez, 2008).

Aceites y grasas: Es la cantidad de compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo, de naturaleza lipídica, que, al ser inmiscibles con el agua, permanecen en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas. Estas natas y espumas entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento de efluentes industriales (Soldevilla, 2008). Las principales fuentes aportadoras de grasas y aceites son los usos domésticos, talleres automotrices y de motores de lanchas y barcos, industria del petróleo, rastros, procesadoras de carnes y embutidos e industria cosmética y por supuesto la industria porcina.

De acuerdo a los diferentes procesos que se llevan particularmente en cada industria, se deberá tener mayor cuidado en los parámetros a delimitar, por lo que se puede identificar las sustancias contaminantes según el sector

industrial de la empresa, según se detalla en la tabla 1.

Tabla 1.

Principales contaminantes que se vierten a las aguas superficiales de acuerdo al sector industrial

Sector Industrial	Sustancias principales
Alimentos	Carbohidratos, aceites y grasas, nitritos, nitratos y fosfatos.
Agropecuaria	Proteínas, aceites y grasas, nitritos, nitratos y fosfatos.
Construcción	Sólidos en suspensión, metales, sales.
Fertilizantes y Plaguicidas	Nitratos y fosfatos, compuestos órgano- halogenados, organofosforados
Generación de Electricidad	Calor, hidrocarburos, aceites sintéticos.
Minería	Sólidos en suspensión, metales pesados, materia orgánica, cianuros.
Navales	Petróleo, disolventes y pigmentos.
Pasta y papel	Sólidos en suspensión, colorantes, sales, aceites y grasas, alcoholes.
Petróleos	Hidrocarburos aromáticos y alifáticos, sales, metales.
Pinturas, barnices y tintas	Compuestos órgano-estánicos, compuestos de Zn, Cr, Se, Mo, Ti, Sn, Ba, Co, etc.
Química	Fluoruros, cianuros, amoníaco, nitritos, ácidos, compuestos órganos halogenados, órgano-silícicos Metales: Hg, Mn, Mo, Pb, Ag, Se, Zn
Siderurgia	Aceites, metales disueltos, emulsiones, sosas y ácidos.

Nota: Clasificación tomada de la tesis doctoral de Torres G.F (2014)

2.2.5. Tratamiento de efluentes contaminados

De acuerdo a Barrios et al. (2015) el comportamiento de las sustancias que producen la coloración de las aguas residuales, se pueden definir cuatro tipos de tecnologías para el tratamiento de los efluentes contaminados, las cuales se agrupan dentro de las categorías físicas, químicas, biológicas y combinadas.

a. Tratamientos físicos

Entre las principales tecnologías para el tratamiento físico de efluentes contaminados por la presencia de colorantes y pigmentos en el medio acuoso, se relacionan los procesos de adsorción, los sistemas de filtración y las resinas de intercambio iónico como las más importantes. Entre los materiales adsorbentes reportados en la literatura con mejores porcentajes de remoción

de color, se encuentran desde residuos agroindustriales de bajo costo como palma de aceite, viruta, aserrín, bambú, algas, hojas de pino, tallos de canola y quitosano, entre otros, hasta minerales como lignito, magnetita, carbón activado, bentonita, etc. Producto de las interacciones electrostáticas entre los materiales adsorbentes y los compuestos que producen la coloración de las aguas residuales, el proceso de adsorción es afectado por las condiciones del medio (pH y temperatura), las características moleculares de los colorantes (grupos funcionales constitutivos) y el tiempo de contacto, entre otras. Estas interacciones electrostáticas pueden ser mejoradas mediante el pre-tratamiento de los materiales adsorbentes utilizando agentes químicos modificadores, los cuales actúan a nivel de superficie causando la protonación o desprotonación de las moléculas expuestas del material adsorbente (Momenzadeh, Tehrani & Khosravi, 2011).

b. Tratamientos químicos

En el grupo de procesos químicos implementados para el tratamiento de efluentes contaminados con sustancias colorantes, se presentan algunas técnicas de oxidación química como: los procesos de ozonación, fenton, ultrasonido, fotocátalisis (ultravioleta), oxidantes convencionales (peróxido de hidrogeno), procesos de coagulación/floculación y electrocoagulación, entre otras tecnologías. Entre este grupo de tecnologías, la fotocátalisis y el tratamiento fenton/UV, presentan porcentajes de remoción de color cercanos al 100%. La remoción de colorantes utilizando sistemas de ozonación puede ser favorecida por las condiciones acidas del medio y el uso de iones metálicos como hierro y manganeso, entre otras variables, no obstante, al igual que en los procesos de adsorción, existe una gran contribución de la naturaleza del colorante (ácido, básico, reactivo, etc) sobre el intervalo óptimo de operación de la tecnología. Utilizando un sistema de ozonación es posible alcanzar porcentajes de remoción entre el 98 y 100% para los diferentes tipos de colorantes, en periodos de tiempo inferiores a los 15 minutos, con concentraciones iniciales de colorantes entre 86 y 2000 mg/L (Arslan, 2001).

c. Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos permiten obtener porcentajes de remoción de color y COT significativos, sin embargo, se realizan a bajas velocidades lo que incrementa sustancialmente los tiempos de tratamiento. En condiciones adecuadas, los organismos pueden reducir una diversidad de sustancias químicas recalcitrantes; La diversidad biológica hace posible encontrar enzimas y microorganismos especializados en la degradación de colorantes específicos (Barrios et al. (2015).

Las aguas turbias poseen partículas suspendidas, estas confieren color y turbiedad indeseables. Para este problema se usa agentes químicos como el sulfato de aluminio (alumbre) que permite remover significativamente los sólidos suspendidos clarificando el agua.

En esta investigación se comparan la eficiencia del principio de electrocatálisis con la de oxidación avanzada, a fin de preservar el impacto ambiental y efecto de salud de la población.

En nuestro procedimiento experimental tendremos dos variables dependientes que son la velocidad de agitación y concentración de materia orgánica, donde realizaremos un análisis preliminar para determinar un rango óptimo de las variables a trabajar. Este Proyecto propugna por encontrar el mejor método para tratar a un efluente residual de aguas de impresión gráfica.

2.2.6. Tratamiento del efluente de la industria gráfica

El sector de la industria gráfica comprende a todas las empresas dedicadas a las actividades de edición, impresión, actividades de servicio conexas y, de reproducción de grabaciones (Sánchez, 2006).

De acuerdo a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU 4.0) establecida por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el año 2012, las actividades de impresión y reproducción de grabaciones corresponden al código C18, el cual abarca la impresión de productos tales como periódicos, libros, revistas, formularios comerciales, tarjetas de felicitación y otros materiales, y actividades de apoyo conexas, como

encuadernación, servicios de preparación de placas y formación de imágenes a partir de datos. Las actividades de apoyo que se incluyen forman parte integrante de la industria de la impresión y esas actividades casi siempre tienen como resultado un producto (una placa de impresión, un libro encuadernado, o un disco o archivo informático) que forma parte integrante de la industria de la impresión. Los procesos utilizados en la impresión comprenden diversos métodos para trasladar una imagen desde una placa, plantilla o archivo informático, a un soporte, como papel, plástico, metal, materia textil o madera. El método más utilizado entraña el traslado de la imagen de una placa o plantilla al soporte mediante procedimientos litográficos, de rotograbado, serigráficos o flexográficos. A menudo se utiliza un archivo informático para activar directamente el mecanismo de impresión, a fin de crear la imagen, así como equipo electrostático y otros tipos de equipos (impresión digital con o sin impacto).

Por otro lado, existen otras áreas de la industria gráfica sub-clasificadas en distintos códigos CIIU como el C17. Excluyendo la “producción de pasta de madera, papel y cartón” en bruto que se incluye en la clase C1701, las demás clases comprenden la producción de papel y productos de papel más elaborados e incluyen artículos que pueden estar impresos (papel de empapelar, papel de regalo, etc.), siempre que la impresión de información no sea el objetivo principal. Finalmente, el código CIIU J58 considera las actividades de publicación de material gráfico, las cuales incluyen la edición de libros, folletos, impresos, diccionarios, enciclopedias, atlas, mapas, gráficos, periódicos, revistas y publicaciones; otras ediciones de directorios y listas de envío, así como las ediciones de programas de informática. Todas las formas posibles de edición (en impresiones, en forma electrónica o de audio, a través de Internet, en productos de multimedia como los libros de consulta en CD-ROM, etc.), excepto la edición de películas, son incluidas en esta división.

El eje principal de la industria gráfica es el proceso de impresión el cual consta de tres etapas: pre-prensado, prensado o impresión y ensamblaje/despacho. El pre-prensado es el trabajo que incluye todas las actividades concurrentes a la preparación y elaboración de la forma impresa.

Abarca el diseño, diagramación, autoedición, montaje y fotomecánica, entre otros. En esta fase se realizan los artes y las películas. La impresión es la actividad mediante la cual la tinta con ayuda de un portaimagen es puesta por presión sobre un sustrato (papel o plástico). Una vez se tienen los portaimágenes, éstos son instalados en las máquinas impresoras para realizar la operación. Según el método de impresión utilizado, los portaimágenes pueden ser entre otros, planchas litográficas o flexográficas, clisés tipográficos, cilindros de rotograbado y stencils serigráficos. Los portaimágenes pueden tener varios tamaños (medio pliego, cuarto de pliego) y formas (planos, con relieve). El proceso de post-prensa y terminado incluye el cocido, pegado, plegado, empaçado, entre otros. Sin embargo, dentro de una misma gama de productos también existen diferentes opciones inherentes a la calidad (Departamento Nacional de Planeación, 2006).

El sector de imprentas contamina severamente los cuerpos de agua, ya que debido al procesamiento que conllevan sus operaciones unitarias, existen aportes de aguas residuales de sus procesos que presentan alta carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Ma & Xia, 2009).

La etapa en la que se genera la mayor cantidad de residuos líquidos es la del proceso de impresión, estos residuos se constituyen como una composición de aguas generadas, aguas de enjuague, compuestos reveladores y aceites lubricantes. El proceso básico de impresión de periódicos y revistas considera los siguientes puntos importantes:

Materias primas: papel periódico, planchas y sus químicos, tintas, agua, aceites, grasas y químicos de limpieza. Todos estos insumos se los utiliza para el proceso industrial. La máquina rotativa utiliza estos elementos para poder imprimir un diario.

Pre-prensado: en este subproceso se utiliza una plancha de aluminio sensibilizado a la luz violeta, en la cual se dibuja la imagen a ser impresa. Como todo proceso fotográfico, se utiliza revelador, fijador, acabador para placas, además de agua.

Existen las tintas que son de base orgánica que impregnan la plancha.

Se utiliza agua para limpiar el exceso de tinta de la plancha.

El aceite, grasa y químicos de mantenimiento se usan para el correcto funcionamiento de la máquina rotativa.

Luego, para la producción se utiliza agua fría para refrigerar los motores y mantener a una temperatura estable todo el equipo.

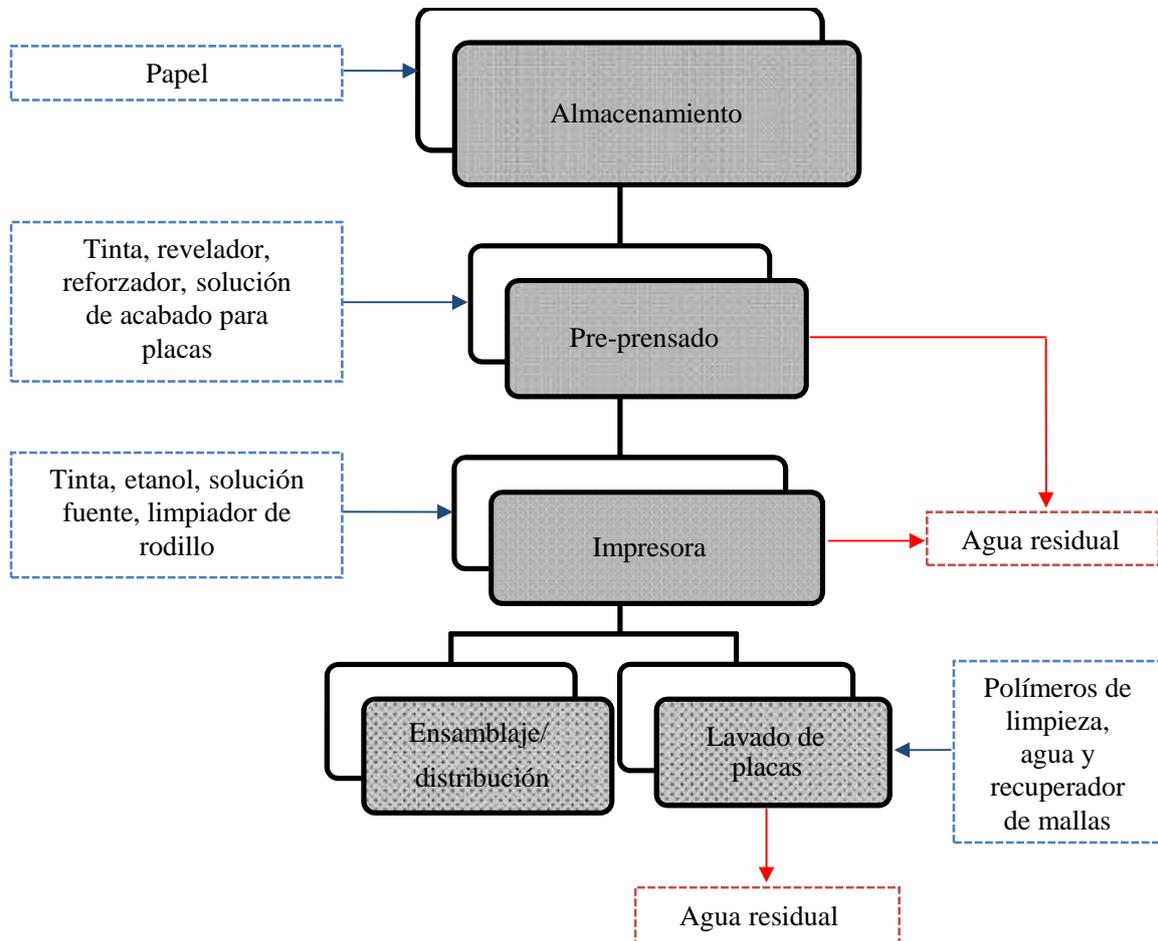
Además, se utiliza un químico especial para la limpieza de los rodillos que transfieren la tinta al papel. Finalmente, se tiene impreso el periódico.

En la Figura 7, se presenta un diagrama de flujo de uno de los procesos aplicados en la industria gráfica, la fabricación de periódicos, libros y revistas, donde se indican las descargas de agua residual junto con sus fuentes.



Figura 1.

Flujo del proceso de fabricación de periódicos, libros y revistas y efluentes producidos



Nota: Diagrama empleado en la tesis doctoral de Torres G.F (2014)

2.3. Conceptual

2.3.1. Aguas residuales

De acuerdo al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014), las aguas residuales son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado.

2.3.2. Aguas residuales industriales

En cuanto a las aguas residuales industriales, son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras (OEFA, 2014).

2.3.3. Colorantes flexos gráficos

De acuerdo a López (2017) los colorantes utilizados en la industria gráfica pueden primero dividirse en materias colorantes (materiales solubles) y pigmentos (materiales insolubles).

En segundo término, los colorantes pueden organizarse según sus aplicaciones tecnológicas – colorantes reactivos, colorantes dispersos, colorantes tina, colorantes con mordiente, colorantes ácidos/básicos, colorantes directos, colorantes metal-complejos y pigmentos.

En resumen, los tintes se pueden clasificar según su composición química (Radical-azo, antraquinona, sulfuro, tripenilmentano, índigo, ftalcianina) o, según a su comportamiento en los procesos de teñido.

La mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil son solubles. Los más claros son los tintes azo (70-80 %). La mayor parte de los pigmentos en el mercado son los pigmentos azo, seguidos por los ftalcianinas.

2.3.4. Aguas residuales de impresión fotográfica

Según López (2017) son aquellos efluentes generados en el proceso productivos de impresiones, cuyas características dependen del tipo de operaciones que se produzcan en las plantas de producción.

Según la calidad, los efluentes necesitan un pretratamiento, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado.

Figura 2.

Efluente de una empresa gráfica descargando al río Rímac



Nota: Fotografía tomada en Ciudad y Campo-Lima-Perú (2021)

2.3.5. Características de los efluentes flexográficos

Según López & Crespi (2015), las aguas residuales generadas en los procesos de tintura y acabados de impresión presentan las siguientes características:

Gran variabilidad de caudal y carga contaminante.

Bajo contenido de materia coloidal y en suspensión.

La mayor parte de contaminantes son solubles y moderadamente biodegradables.

Su carga orgánica media (DQO) es aproximadamente el doble que la de un efluente urbano.

Su toxicidad es baja comparada con otros sectores industriales.

A menudo son deficitarias en nutrientes (N, P).

Exentas de microorganismos patógenos.

Sus principales características específicas son su elevada coloración y salinidad.

2.3.6. Principales parámetros para caracterizar las aguas residuales de la industria gráfica

Según López y Crespi (2015) los principales parámetros para caracterizar las aguas residuales de la industria textil son:

a. Demanda química de oxígeno (DQO)

Mide la cantidad de oxígeno (mg O₂/L) necesario para oxidar la materia orgánica soluble o en suspensión, y algunos compuestos minerales oxidables.

La determinación se lleva a cabo por oxidación química con una solución en exceso de dicromato potásico a una temperatura de 150±2°C. El exceso de oxidante se mide por valoración redox. El reactivo de valoración es una sal de hierro, comúnmente conocida como sal de Mohr y se utiliza ferroína como indicador.

En esta determinación se debe tener en cuenta la posible interferencia de los iones cloruro que pueden ser oxidados con dicromato y que darían un resultado de DQO erróneo por exceso. Los cloruros se hacen reaccionar previamente a la determinación con una sal de sulfato de mercurio.

Se cuenta con dos métodos para el ensayo de la DQO: el método del Balón (Norma UNE EN 77004) y el método del tubo (Standard Methods 21 ed.). Este último requiere de un menor volumen de muestra (30 ml respecto a 10 ml) y sobretodo requiere de menor volumen de reactivos (16,6 veces menos). En cambio, el método del balón deberá aplicarse si la muestra tiene una elevada presencia de materias en suspensión (MES) ya que en el método del tubo se pipetea un volumen muy pequeño y por tanto no se tomaría una muestra homogénea.

En ambos casos se puede utilizar un patrón de DQO constituido por una solución de 425 mg/L de Ftalato ácido de potasio que da lugar a una DQO exacta de 500 mg O₂/L. (López y Crespi, 2015).

b. Demanda biológica de oxígeno (DBO)

Según López y Crespi (2015) indican la cantidad de oxígeno (mg O₂/L) consumido en la oxidación de la materia orgánica del agua, en procesos biológicos aerobios. El ensayo dura entre 5 y 27 días, siendo generalmente el análisis a los 5 días (DBO₅) el más común.

El análisis de DBO se basa en medir el consumo de oxígeno por una población bacteriana. El método de análisis normativo se basa en la realización de diferentes diluciones de la muestra de agua (método de dilución), para ello se debe preparar el agua de dilución en frascos de incubación que son inoculados y se requiere la preparación de blancos. También se pueden aplicar métodos instrumentales donde se hace un seguimiento del consumo de oxígeno, como son el método manométrico o el método respirométrico.

En la determinación de DBO se puede utilizar como patrón una solución constituida por 125 mg/l de glucosa y 125 mg/L de ácido glutámico que da lugar a una DBO de entre 220 y 240 mg O₂/L.

La relación DQO/DBO indica el grado de biodegradabilidad del vertido. Un agua muy biodegradable presenta relaciones DQO/DBO inferiores a 2 y un agua poco biodegradable presenta valores superiores a 5. Las aguas residuales de la industria textil acostumbran a presentar una relación DQO/DBO alrededor de 3. Son aguas bastante biodegradables, aunque menos que las aguas residuales domésticas cuya relación DQO/DBO está en torno a 2,2 y 2,5.

c. Carbono orgánico total (TOC)

El COT o TOC (siglas en inglés) mide el contenido de carbono orgánico (mg C/L) del agua. Se trata de una medición instrumental que se lleva a cabo con un analizador de TOC. Este instrumento realiza una oxidación térmica de la

muestra de agua a 850°C y posteriormente determina el contenido de carbono mediante un analizador de IR.

Para evitar interferencias producidas por el contenido de carbono inorgánico la muestra debe llevarse previamente a pH entre 3 y 4 y airearse con un difusor durante 10 minutos para eliminar el carbono inorgánico en forma de CO₂ (López y Crespi, 2015).

d. Materias en suspensión (MES)

Todas las sustancias suspendidas en el agua y que no decantan de forma natural (mg/L). La determinación de MES se lleva a cabo según la norma UNE EN 872 que describe un método de análisis de sólidos en suspensión por medio de la filtración de un volumen de muestra de agua conocido, utilizando un aparato de vacío, a través de un filtro de fibra de vidrio. Posteriormente se seca el filtro a 105°C ± 2°C y se determina la masa del residuo retenido en el filtro mediante pesada (López y Crespi, 2015).

e. Conductividad (salinidad)

Medida del contenido de sales solubles del agua. Indicador del incremento de iones en el agua (µS/cm). La determinación se lleva a cabo a 25°C mediante lectura directa en un conductímetro siguiendo la norma UNE EN 27888. La conductividad eléctrica depende de la concentración y naturaleza de los iones y de la temperatura y viscosidad de la solución (López y Crespi, 2015).

f. Color

Determinación cuantitativa por comparación visual con patrones de Pt-Co según el método 2120 del Standard Methods o con espectrofotómetro (valores de absorbancia). La presencia de color en el agua supone un impedimento en el paso de luz al acuífero y supone un desagradable efecto visual (López y Crespi, 2015).

2.3.7. Colorantes y aguas residuales

Son sustancias de origen natural o sintéticas solubles (colorantes) que imparten color al papel, tela o fibra. Se clasifican según sus aplicaciones tecnológicas (en función de la forma de aplicación del colorante o de la fibra utilizada) y grupos funcionales (átomo o grupo de átomos característicos responsables del comportamiento químico).

La mayoría de los colorantes utilizados en la industria de impresión fotográfica son los azoicos y a la vez son los de una tonalidad más clara (70-80%), seguidos por los ftalcianinas (Sedlak, 2013).

Los colorantes utilizados en la industria gráfica pueden primero dividirse en materias colorantes (materiales solubles) y pigmentos (materiales insolubles). En segundo término, los colorantes pueden organizarse según sus aplicaciones tecnológicas – colorantes reactivos, colorantes dispersos, colorantes tina, colorantes con mordiente, colorantes ácidos/básicos, colorantes directos, colorantes metal-complejos y pigmentos.

En resumen, los tintes se pueden clasificar según su composición química (Radical-azo, antraquinona, sulfuro, tripenilmentano, índigo, ftalcianina) o, según a su comportamiento en los procesos de teñido.

La mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil son solubles. Los más claros son los tintes azo (70-80%). La mayor parte de los pigmentos en el mercado son los pigmentos azo, seguidos por los ftalcianinas.

Tabla 2.

Clasificación de colorantes flexográficos según sus aplicaciones tecnológicas

Denominación	Características
Ácidos	Teñido de fibras proteicas (lana y seda). Solubles en agua
Básicos	Teñido de fibras acrílicas. Solubles en agua.
Dispersos	Tintes insolubles que se aplican formando una dispersión muy fina en el agua.
Directos	Gran afinidad con fibras de algodón, generalmente son sales de ácido sulfónico. Solubles en el agua.
Reactivos	Reacciona con las fibras formando enlaces covalentes, afín con fibras de algodón. Solubles en agua.

Fuente: Adoptado de Barrios et al. (2015).

Tabla 3.

Clasificación de colorantes textiles según grupos funcionales presentes en la estructura química

Denominación	Grupo funcional
Azoicos	$-N = N -$
Carbonilo	$C = O$
Metilo	$-CH_3$
Nitro	$-NO_2$
Azometino	$-CH = N -$

Fuente: Adaptado de Barrios et al. (2015)

En cuanto la industria actual de los colorantes y los pigmentos se engloba dentro de la industria orgánica fina y sus principales se encuentran en la industria textil, de pinturas gráficas y de plásticos. En menor escala hay que considerar la industria del cuero, la del papel y la industria alimentaria y farmacéutica, entre otras. Todas ellas son por tanto susceptibles a generar efluentes coloreados nocivos para el medio ambiente.

Al respecto, Queralt & Gimenez (1995) señalan que los colorantes son moléculas generalmente de tamaño mpequeño y que contienen principalmente dos grupos: el cromóforo, responsable del color, y el funcional, que se encarga de la fijación del compuesto en el material del destino. Existen diversos métodos de clasificación de estos componentes, uno de los más utilizados es el que pertenece al grupo cromóforo que poseen. Los grupos más importantes desde el punto de vista industrial se muestran en la tabla 2.

El segundo tipo de clasificación de los colorantes toman en consideración su modo de aplicación y distingue, entre otros, los tipos de colorantes que se muestran en la tabla 5.

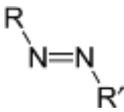
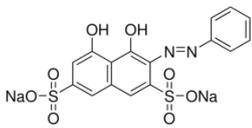
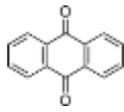
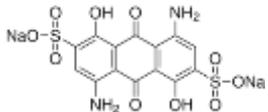
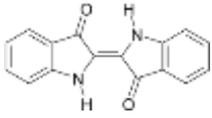
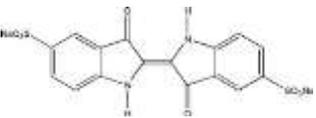
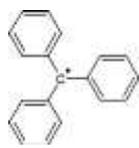
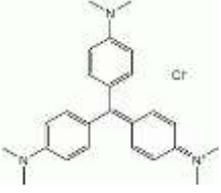
Una parte de los colorantes se pierde durante el proceso de tinción generando efluentes que suponen un grave problema no sólo desde el punto de vista medioambiental, sino también estéticos, ya que el poder de tinción de la mayoría de los colorantes es extraordinariamenteelevado (con cantidades inferiores a 1 ppm ya puede detectarse una presencia de color evidente (Márquez & Tiscareño, 1999).



Por otra parte, Hincapíe & Sepúlveda (2002) señalan que las reacciones de oxidación e hidrólisis que sufren los colorantes en las aguas residuales pueden producir metabolitos tóxicos, los cuales producen efectos adversos tanto en los animales como en la salud humana.

Tabla 4.

Principales grupos de colorantes atendiendo a su grupo cromóforo

Familia	Grupo cromóforo	Gama de colores	Ejemplo
Azoicos		Amarillo-Azul	 Chromotrope 2R
Antraquinonas	 Antraquinona	Amarillo-Violeta	 Acid Blue 45
Indólicos	 Índigo	Azul-Violeta	 Azul Índigo
Triarilmetánicos	 Cation trifenilmetilo	Naranja-Violeta	 Violeta de Cristal

Nota: Adoptado de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid.

20

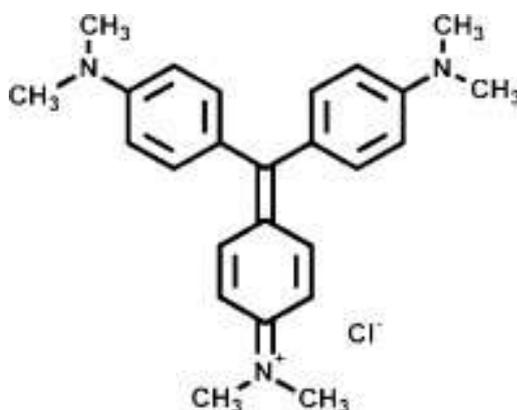
Tabla 5.*Principales grupos de colorantes atendiendo a su modo de aplicación*

Tipo de colorante	Características	Tipo de enlace/ fibras asociadas	Pérdidas en el proceso de tinción, %
Ácido o aniónico	Muy soluble en agua.	Enlace iónico/ nylon, lanas.	5-20
Básico o catiónico Directo	Muy soluble en agua.	Enlace iónico/ acrílicos.	0-5
	Aniónico. Muy soluble en agua.	Enlace iónico/ viscosa.	5-30
Disperso	Coloides. Poco soluble en agua.	Impregnación coloidal y adsorción/ polyester, nylon, acrílicos, celulosas.	0-10
Reactivo	Aniónico. Muy soluble en agua.	Enlace covalente/ algodón, viscosa, lanas.	10-50
Vat	Coloide sobre fibras. Insoluble.	Precipitación <i>in-situ</i> del colorante sobre la fibra/ algodón, viscosa.	5-20

Nota: Adoptado de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

i.Violeta de Cristal

El colorante violeta de cristal (crystal violet, CV), también conocido como violeta de genciana o de metilo es un colorante triarilmetánico. Se presenta como lustrosos cristales azul verdosos que funden a 137°C.

Figura 3.*Estructura molecular del colorante Violeta de Cristal*

Nota: Recogido de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

El principal uso de este colorante es el de tinción textil de color púrpura y para dar tonos violetas oscuros en pinturas y tintas de impresión. Asimismo, es muy empleado para la identificación de bacterias mediante tinción de Gram. Se encuentra también como componente de tintas azules y violetas de bolígrafos y como colorante de productos tales como fertilizantes, anticongelantes y detergentes. Con frecuencia, se usa este colorante para entregas controladas de efectivo en casos de secuestro colocando una fina capa de polvo sobre los paquetes de dinero, que al entrar en contacto con la humedad presente en las manos toma un color púrpura oscuro y deja una marca característica, muy difícil de eliminar, sobre cualquier cosa que toque. También es utilizado en investigaciones policiales para la detección de huellas dactilares. También ha sido utilizado como antiséptico y desinfectante, aunque ya no se le da este uso, ya que existen sospechas de que pueda causar cáncer. Las principales propiedades del colorante CV se recogen en la tabla 6.

Tabla 6.

Propiedades del colorante CV

Clase del colorante	Nombre C.I	Número C.I	Peso Molecular	Fórmula Molecular	λ_{max} , nm
Catiónico básico	Basic violet 3	42555	407,98	C ₂₅ H ₃₀ N ₃ Cl	588

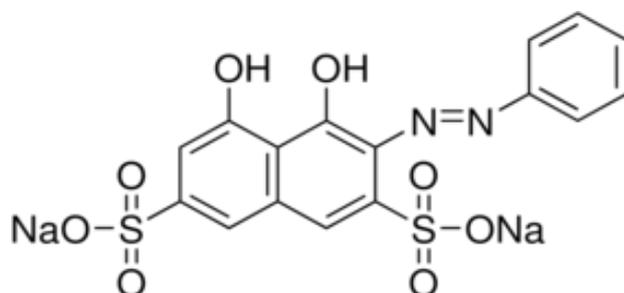
Nota: Recogido de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

ii. Chromotrope 2R

El Chromotrope 2R (C2R) es un colorante azoico que se presenta en forma de polvo fino color marrón oscuro. Se emplea ampliamente en biología y medicina para la tinción de fibrina, tejido muscular y citoplasmas para la observación de muestras en microscopio.

Figura 4.

Estructura molecular del colorante Chromotrope 2R



Nota: Recogido de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

Sin embargo, se emplea fundamentalmente para la tinción de tejidos, hilos, fibras, prendas y películas.

Se trata de un compuesto altamente irritante cuya presencia debe ser identificada en los productos que lo contienen según la última versión válida de la directiva general de clasificación de sustancias de la UE, en la directiva 67/548/CE. Las principales características del compuesto se presentan en la table 7.

Tabla 7.

Propiedades del colorante C2R

Clase del colorante	Nombre C.I	Número C.I	Peso Molecular	Fórmula Molecular	λ_{\max} , nm
Aniónico Ácido	Acid Red 29	16570	468,37	C ₁₆ H ₁₀ N ₂ Na ₂ O ₈ S ₂	510

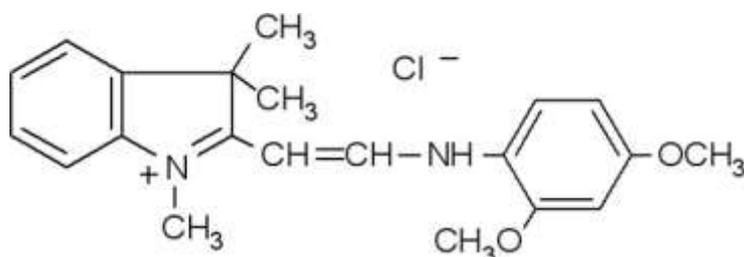
Nota: Recogido de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

iii. Amarillo Básico 11

El colorante Amarillo Básico 11 (basic yellow 11, BY11) es un colorante básico con estructura de amina secundaria aromática tal como puede verse en la fig. 5.

Figura 5.

Estructura molecular del colorante BY11



Nota: Recogido de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

El colorante BY11 es un sólido de color amarillo oscuro que se usa principalmente en la industria textil y de plásticos. Al ser un colorante es soluble en agua y en disolventes orgánicos, también ha sido utilizado como componente en tintes de pelo y en las tintas de cartuchos de impresora. Debido a la estructura de amina secundaria aromática está catalogado por la Agencia Internacional contra el cáncer como compuesto cancerígeno (International Agency for Research on Cancer, 2010). El uso de este compuesto se encuentra prohibido en Europa y Estados Unidos de América desde 2010, pero sigue empleándose en grandes cantidades en países asiáticos.

Las principales características del compuesto se presentan en la tabla 8.

Tabla 8.

Propiedades del colorante BY11

Clase del colorante	Nombre C.I	Número C.I	Peso Molecular	Fórmula Molecular	λ_{\max} (nm)
Catiónico Básico	CationicYellow 11 GI	48055	372,89	C ₂₁ H ₂₅ ClN ₂ O ₂	413

Nota: Recogido de la tesis doctoral de Vallet A. (2013)-Madrid

2.3.8. Catalizadores

El término de catálisis se atribuye al sueco Jöns Jacob Berzelius que en 1836 escribe: “algunos cuerpos tienen la propiedad de ejercer sobre otros una acción, diferente a la causada por la afinidad química, por medio de la cual se produce su descomposición, formando nuevos compuestos, que no entran

en la composición de aquellos. A este poder desconocido, común a la naturaleza orgánica e inorgánica, llamo poder catalítico, siendo catálisis la descomposición de cuerpos por esta fuerza”.

Sin embargo, la palabra así mencionada ya aparece en la Alchymia de Libavius de 1595, verdadero compendio de química hasta aquellas fechas, porque en su estructura etimológica griega significa disolución; destrucción de un compuesto. Mitscherlich, la denominó en 1834 “acción de contacto”. Sería Ostwald, el que nos legó el concepto de catálisis y catalizador, tal como lo conocemos actualmente.

La definición de catalizador, según la IUPAC, es: “sustancia que modifica la velocidad de una reacción sin modificar la variación de energía libre de Gibbs global de la misma”. Los catalizadores afectan a los parámetros cinéticos de la reacción, no modifican la posición de equilibrio termodinámico, y no se ven afectados por el transcurso de la misma.

Sin catálisis no existiría la industria química moderna: ya que aproximadamente el 60% de los actuales productos químicos se sintetizan mediante procesos químicos basados en la catálisis, suponiendo éstos un 90% de los actuales procesos químicos de fabricación. La catálisis es fundamental para la industria química, y esto se traduce en la enorme variedad de catalizadores existentes. Pueden presentarse en formas muy diferentes, desde catalizadores homogéneos disueltos en la mezcla de reacción pasando por catalizadores heterogéneos en forma de sólidos porosos hasta catalizadores biológicos en forma de enzimas.

Por su parte, Sharma, Singh & Korstad (2011) sostienen que la catálisis heterogénea presenta una serie de características que los hace más indicados para determinados procesos. Las principales se enumeran a continuación]:

Entre los diferentes soportes o catalizadores se encuentran las arcillas que son materiales naturales muy abundantes en la corteza terrestre y que han sido ampliamente estudiados por sus aplicaciones catalíticas en catálisis medioambiental, química fina y orgánica. Tienen propiedades muy ventajosas tales como bajo coste, versatilidad, amplio intervalo de variables de

preparación, sencilla manipulación y recuperación y alto rendimiento y selectividad, lo que las convierte en herramientas útiles para establecer tecnologías respetuosas con el medio ambiente (Adams & McCabe, 2006).

Se puede hablar de dos tipos de arcillas: catiónicas y aniónicas. Las arcillas catiónicas son muy comunes en la naturaleza y están formadas por láminas de aluminio-silicatos con carga negativa, de manera que entre las mismas se sitúan cationes para compensar la carga, mientras que las arcillas aniónicas están constituidas por láminas de hidróxidos, situándose los aniones y el agua en el espacio interlaminar.

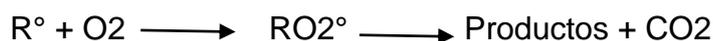
2.3.9. Procesos de oxidación avanzada

A. La oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA) constituyen en el futuro una de las tecnologías más utilizadas en el tratamiento de las aguas contaminadas con productos orgánicos recalcitrantes provenientes de industrias (químicas, agroquímicas, textiles, de pinturas, etc). Entre estos procesos los de mayor perspectiva son los de fotooxidación en sus dos variantes: fotólisis y fotocatalisis.

Los POA pueden definirse como aquellos procesos que implican la formación de radicales hidroxilos (OH°) altamente reactivos ya que presentan un elevado potencial de oxidación ($E^\circ = 2,8 \text{ V}$), característica que lo hace de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción del hidrógeno, es decir, se generan radicales orgánicos libres según la reacción:

$\text{OH}^\circ + \text{RH} \longrightarrow \text{R}^\circ + \text{H}_2\text{O}$: los cuales pueden reaccionar con el oxígeno molecular para formar peroxiradicales, según la reacción:



Incluso puede iniciarse reacciones de oxidación en serie que pueden conducir a la mineralización completa de los compuestos orgánicos (3,6,12)

Las ventajas de los POA son:

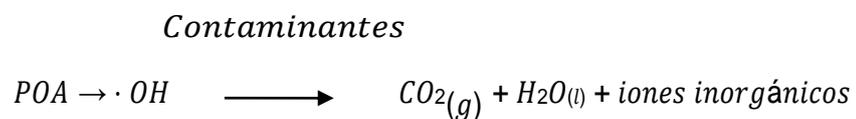
*Capacidad potencial para llevar a cabo una profunda mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de los compuestos inorgánicos hasta dióxido de carbono o iones (cloruros, nitratos).

*Reactividad con la mayoría de los compuestos orgánicos, hecho principalmente interesante si se quiere evitar la presencia de subproductos potencialmente tóxicos presentes en los contaminantes originales que pueden crearse mediante otros métodos.

*Descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos.

Los procesos de oxidación avanzada (POA) consisten en una oxidación química en condiciones de presión y temperatura ambiente, con la cual se puede llegar hasta la mineralización completa de los contaminantes. (Kim & Vogelpohl, 2004)

La siguiente expresión representa lo anteriormente dicho:



El agente oxidante es un radical denominado hidroxilo ($\cdot OH$), el cual posee una elevadísima capacidad oxidante (potencial de oxidación 2,8 V); es no selectivo y presenta tiempos de reacción muy cortos. (Almecija, y otros, 2010)

La versatilidad de los POAs se debe al hecho de que existen diferentes formas de producir los radicales hidroxilos y pueden escogerse cual utilizar, dependiendo de los requerimientos específicos de cada agua residual (Castro & Duran, 2013).

B. La radiación solar y aplicaciones en la fotocatalisis

A partir del siglo XX la interacción de la materia con la luz se realiza desde un punto de vista microscópico, considerándose como un proceso de absorción de un fotón que conlleva la creación de un par electron-hueco o la

emission o destrucción de un fotón creando excitaciones. La materia puede interactuar con la luz en un Amplio rango de longitudes de onda y con diversos cambios en la estructura de las moléculas. Las radiaciones cerca al espectro visible o ultravioleta (240-700 nm) interactúan con los electrones de una molécula y estas reacciones son las más importantes desde el punto de vista Ambiental (Marin, 2002).

La luz solar es una energía directa, primaria, abundante y barata que en muchos casos es absorbida por compuestos químicos para producir procesos fotolíticos. La interacción de la luz con los sistemas moleculares se da a escala molecular donde éste interactúa con un fotón según la reacción: $A + h\nu \rightarrow A^*$; en la que A representa el estado fundamental de la molécula, $h\nu$ es el fotón absorbido y A^* la molécula en estado excitado (Marin, 2002).

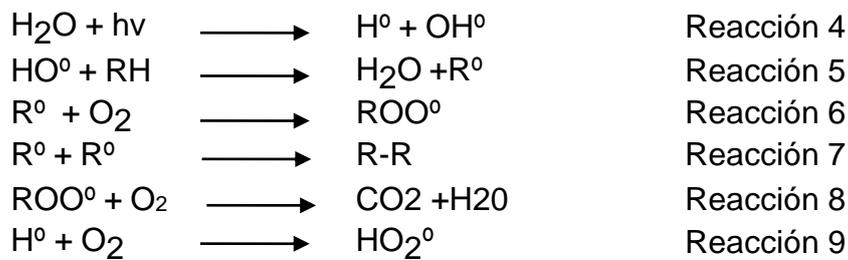
C. La fotólisis

Los métodos fotolíticos para la degradación de contaminantes disueltos en el agua se basan en proporcionar energía a los compuestos químicos en forma de radiación, que es absorbida por las distintas moléculas para alcanzar estados excitados en el tiempo necesario para experimentar reacciones (Garcés, Mejía, & Santamaría, 2019).

En presencia de radiación ultravioleta se produce la fotólisis de un gran número de compuestos orgánicos. El proceso tiene lugar en el dominio del UV-C (210-230 nm) y se basa en la formación de radicales C- centrados; es decir, radicales libres.

La eficiencia del proceso depende principalmente de la capacidad de absorción de radiación y de la presencia de otros componentes que absorben la misma longitud de onda. En los procesos de oxidación fotolíticos normalmente se utilizan lámparas de mercurio de baja presión (254 nm, 471 KJ/mol) empleadas tanto en la desinfección como en la depuración de las aguas. Sin embargo, es necesario llevarlas a longitudes de onda más bajas (170-200 nm), ya que llevan asociada una mayor energía (704-598 KJ /mol) y son más eficientes en la ruptura de los enlaces de los compuestos orgánicos.

Un aspecto a tener en cuenta es la presencia de oxígeno en el proceso de oxidación. Se ha probado en la fotólisis la existencia de diferentes reacciones en función de la distancia a la Fuente de radiación, debido a la diferente concentración de oxígeno presente. Durante el proceso de fotólisis de la materia orgánica se presentan el siguiente grupo de reacciones:



Donde, sim los radicales libers (R°) reaccionan con el oxígeno, forman radicales peroxilo (ROO°) los cuales son bastante estables. Si el oxígeno disuelto es ausente o insuficiente, estos radicales libres pueden reaccionar bien por recombinación o desmutación (Gómez, 2000).

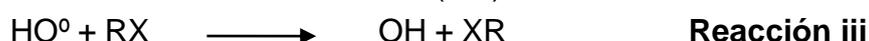
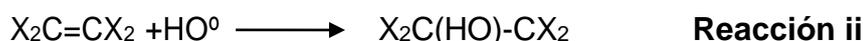
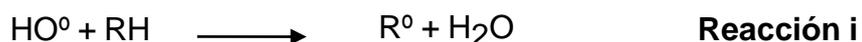
D. La fotooxidación

La luz promueve reacciones de oxidación iniciadas por la presencia de radicales libres. Para que estos procesos se lleven a cabo es necesario la presencia de agentes oxidantes, los que permiten la formación de dichos radicales, de los cuales los mas reconocidos y utilizados son el peróxido mde hidrógeno, el ozono, etc. Entre los distintos procesos de aplicación para el tratamiento de aguas, la combinación de radiación ultravioleta y de peróxido de hidrógeno se emplea cuando cuando se desea un agua con un alto grado de pureza. Este POA implica la formación de radicales hidroxilos. El peróxido de hidrógeno es un potente agente oxidante no selective y una excelente fuente de radicales libres; es además un aditivo deseable ecológicamenete ya que durante su descomposición únicamente se genera agua y/o oxígeno. El éxito de este proceso radica en la formación estequiométrica de radicales hidroxilos (OH°) a partir de la descomposición fotocatalítica del H_2O_2 (Gómez, 2000).

El mecanismo más aceptado para la fotólisis del H_2O_2 es la ruptre del enlace O-O por acción de la luz ultravioleta (Malato, 2001).

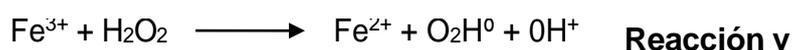


Al igual que en la fotólisis, a partir de los ($\cdot\text{OH}$) se forman los radicales C-centrados que en presencia de oxígeno forman radicales peróxido intermedios, claves en las reacciones de oxidación y la completa mineralización de los compuestos. Los radicales reaccionan con la materia orgánica según las reacciones de abstracción del hidrógeno (reacción i), adición (reacción ii) y por las reacciones de transferencia de electrones (reacción iii)



E. Fotocatálisis con reactivo Fenton

La adición de sales de hierro como catalizador en presencia del peróxido de hidrógeno, conocida como reactivo Fenton, es uno de los métodos clásicos de producción de radical hidroxilo resultando así uno de los agentes oxidantes más potente bajo un Ph de carácter ácido (Ph 3-5). El hierro puede ser añadido como sal ferrosa o férrica. Estos radicales inician una cadena de reacciones para eliminar toda la materia oxidante (Malato, 2001).



Recientemente se ha descubierto como la reacción UV/ visible acelera las reacciones fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$), favoreciéndose así la degradación de contaminantes orgánicos, incluidos contaminantes aromáticos y alifáticos. Este reactivo presenta una mayor efectividad en pH ácido, debido a la aparición de hidróxidos de hierro como precipitados coloidales a pH de 3, lo cual hace necesario su separación mediante un proceso adicional de tipo coagulación, sedimentación o filtración. Además, algunos intermedios de reacción pueden alterar la reactividad del hierro debido a la formación de complejos.

Las principales sales conocidas que son utilizadas en este proceso de oxidación son el fluoruro, bromuro y cloruro. El cloruro de hierro generalmente se encuentra hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y en la forma de grumos amarillos.

Además el Fe³⁺ existe en otras especies que son fotoactivas tales como el FeOH²⁺ y Fe²⁺ (OH)⁺ y su importancia depende del Ph y de la longitud de onda de la reacción.

En las reacciones de fenton tradicional el Fe²⁺ actúa como catalizador en la descomposición del H₂O₂ dando lugar a la formación de radicales OH (reacción iv) en esta reacción los iones Fe³⁺ se van acumulando a medida que los iones Fe²⁺ se consumen y finalmente la reacción se detiene. En este proceso se intenta solucionar este problema mediante la regeneración fotoquímica de los iones Fe²⁺ reduciendo al ión férrico según la reacción:



F. Fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio (Ti O₂)

La fotocatálisis implica la combinación de la fotoquímica con la fotocatálisis. Ambos, luz y catalizador, son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. Así, la fotocatálisis puede ser definida como la aceleración de una fotoreacción mediante un catalizador. En el caso de la fotocatálisis heterogénea, se emplean semiconductores (sólidos en suspensión acuosa o gaseosa). Existen múltiples de estos fotosensibilizadores tales como: Al₂O₃, ZnO, Fe₂O₃ y TiO₂. Sin embargo, el más usado en aplicaciones fotocatalíticas es el dióxido de titanio Degussa p25 en forma de anatasa 99% y en forma de rutilo 1% ya que presenta una mayor conductividad fotocatalítica, no es tóxico, habiéndose evaluado diferentes estructuras del mismo (Gil, 2002).

Cuando un semiconductor está en contacto con un electrolito conteniendo un par redox, la transferencia de cargas ocurre a través de la interfase sólido/líquido (heterogénea), como consecuencia de la diferencia de potencial entre las dos fases. Se forma un campo eléctrico en la superficie del semiconductor y las bandas se curvan con la forma del campo eléctrico desde el interior del semiconductor hasta la superficie.

Cuando se han tratado los procesos de oxidación avanzada se cree que el radical OH[°] es la principal especie oxidante, responsable de la fotodegradación de la mayoría de los compuestos orgánicos estudiados,

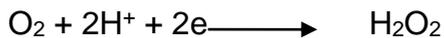
aunque en el caso del empleo del TiO₂, en forma de anatasa, se somete a radiación con una longitud de onda inferior de 400 nm, se genera un exceso de electrones en la banda de conducción y huecos positivos h⁺ en la banda de valencia, de acuerdo a la reacción:



En la superficie del TiO₂, los huecos reaccionan tanto con H₂O absorbida, como con el grupo OH⁻ para formar radicales hidroxilos (OH[°])



Los electrones en exceso de la banda de conducción con el oxígeno molecular para formar radicales superóxido y peróxido de hidrógeno.



Tanto el radical superóxido como el peróxido de hidrógeno generan más radicales hidroxilos mediante las siguientes reacciones:



En el último término, el radical hidroxilo OH[°] generado, provoca la completa mineralización de muchas sustancias orgánicas. Dependiendo del equilibrio de adsorción/ desorción para un contaminante dado, la oxidación fotocatalítica de un sustrato orgánico adsorbido podría incidir en la eficacia de su degradación oxidativa, según la reacción:

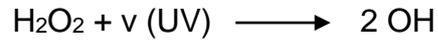


2.3.10. Tratamiento con UV-H₂O₂

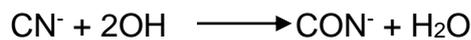
En los últimos años se ha prestado una especial atención en la literatura técnica al uso del H₂O₂ fotoactivado para el tratamiento de efluentes industriales, sobretodo para la destrucción directa de disolventes orgánicos y

cianuros.

La irradiación de soluciones de H₂O₂ con luz ultravioleta en frecuencia del rango de 254 nm. Causa la ruptura de la molécula formando radicales libres de OH.



Estos radicales tienen una vida corta, son muy reactivos y poseen un potencial de oxidación ($E^0 = 2,8\text{v}$). Dispone, además, de una elevada movilidad en medio acuoso (similar a la de los iones H⁺ y OH⁻), reaccionando con los cianuros de acuerdo a la reacción:



Son capaces de oxidar a todos los compuestos cianurados, incluyendo a los de Fe que son los de mayor estabilidad.

Aunque el proceso está aún en desarrollo (no está en funcionamiento en ninguna instalación). Es un proceso muy lento, pero de una gran efectividad, limpio y que solo añadirle H₂O₂.

Uno de los mayores inconvenientes radica en el hecho de que al necesitar del uso de fotoactivadores, se reduce su empleo a soluciones claras, puesto que la presencia de partículas en suspensión provoca la absorción de la radiación y, por ende, la reducción de intensidad.

2.3.11. Acción del peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

El peróxido de hidrógeno es un oxidante versátil, superior al cloro, dióxido de cloro y permanganato de potasio. Tiene la capacidad de producir radicales hidroxilos vía catálisis, bien sea en presencia o ausencia de radiación.

La característica selectiva del peróxido de hidrógeno favorece su uso en diferentes aplicaciones. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores, el H₂O₂ puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores,

menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para tratamiento de efluentes industriales. Es importante resaltar que el exceso en la aplicación del peróxido de hidrógeno y altas concentraciones de radicales hidroxilos origina reacciones competitivas que producen efectos inhibitorios en la degradación de los compuestos. (Rodríguez, Botelho, & Cleto, 2008).

2.4. Definición de términos básicos

Efluentes flexo gráficos: Son aquellos que se generan después de terminada la impresión la limpieza debe realizarse con diversos productos químicos y agua.

Electro catalísis: Proceso que usa el principio electroquímico a fin de eliminar los colorantes de las aguas residuales provenientes de la industria gráfica, empleando ánodos adecuados y control de la densidad de corriente.

Ánodos: Son aquellos elementos que nos permitirán descomponer los elementos colorantes en radicales hidroxilos.

Biodegradable: Producto o sustancia que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.

Fotocatálisis: Es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, consistente en un material semiconductor que acelera la velocidad de reacción. Durante el proceso tienen lugar reacciones tanto de oxidación como de reducción.

Fotocatalizador más comúnmente utilizado es el dióxido de titanio (TiO_2) y productos derivados de él.

Potencial de oxidación- reducción (Eh): Es una forma de cuantificar si una sustancia es un fuerte agente oxidante o un fuerte agente reductor. El potencial de oxidación reducción se mide en voltios. *TOC

Turbidez: La presencia de materias diversas en suspensión, arena, limos, coloides orgánicos, placton y otros organismos microscópicos da lugar a la turbidez en el agua (Marín, 2002, p.11)

Límite permisible: Valor máximo de concentración de elemento(s) o sustancia(s) en los diferentes componentes del ambiente, determinado a través de métodos estandarizados, y reglamentado a través de instrumentos legales. (Falconi, 2012, p.156)

pH: Es la medida de alcalinidad o acidez de una solución, nos indica la concentración de iones de Hidrógeno presentes en disoluciones.

Sólidos disueltos: Es la cantidad de sólidos disueltos en una muestra de agua, en una corriente de proceso mayormente el TDS (sólidos disueltos totales) se mide con un analizador de conductividad.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Un sistema combinado de electro catálisis-oxidación avanzada *permite* la remoción de colorantes en las aguas residuales de la industria gráfica, en un porcentaje superior al 90%.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a. Las características físico-químicas del agua residual de impresión a evaluar antes del tratamiento serán: el color, la alcalinidad, la turbidez, pH y sólidos disueltos totales.
- b. El control de la densidad de corriente, el pH y el tiempo influirán significativamente en la degradación de los contaminantes en las aguas residuales flexo gráficas.

3.2. Definición conceptual de variables

Variable dependiente

Y= Grado de remoción de colorantes en efluentes flexo gráficos.

Variables independientes

X₁ = Concentración de radicales hidroxilos.

X₂ = Tiempo de remoción y cantidad de densidad de corriente.

3.2.1. Operacionalización de variables

Con la finalidad de probar la hipótesis formulada en el presente trabajo, someteremos a un proceso de operacionalización de las variables, identificando a los indicadores claves en cada una de ellas a fin de encontrar las marchas sistemáticas y tecnológicas que nos permitan recoger datos

experimentales para modelar el proceso funcional o evaluar la curva característica de alguna función típica.

$$Y = f(x_1, x_2)$$

La presente investigación se caracteriza por ser longitudinal, estudiando la variable a lo largo del tiempo establecido, por ser este el determinante en la relación causa efecto.

Tabla 9.

Matriz de operacionalización de variables e indicadores

VARIABLE			
DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y=Grado de remoción de colorantes en efluentes gráficos.	pH. Tiempo. Concentración Velocidad	Escala Días ppm rpm	Experimental
VARIABLES INDEPENDIENTES			
	pH		
X ₁ = Concentración de radicales hidroxilos	Concentración	ppm ppb	Experimental
X ₂ =Tiempo de remoción y densidad de corriente.	Cantidad	Horas dm ²	Experimental

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo tecnológica, debido a que se tiene como propósito la remoción de colorantes en aguas residuales flexo-gráficas mediante un proceso de electrocatálisis empleando varios electrodos, procurando determinar la relación entre la causa y efecto durante el proceso.

Por su finalidad es aplicada, puesto que los resultados de la investigación tienen por finalidad aplicar los conocimientos teóricos y orientarlos hacia los procesos de identificación.

Por su diseño interpretativo es experimental, porque permitirá manipular las variables independientes para obtener la variable de respuesta requerida.

Por el nivel de estudios, es cuantitativa, puesto que se busca determinar el grado de remoción de los colorantes en aguas residuales provenientes de la industria dedicada a la impresión.

Por su ámbito de desarrollo será a nivel de laboratorio, ya que la presente investigación se realizará en los laboratorios de la Universidad Nacional del Callao.

4.2. Método de investigación

Se ha considerado la realización de esta investigación en cuatro etapas:

Primera etapa de la investigación:

Identificar a los componentes químicos que se utilizan en la formulación de las tintas de impresión a fin de caracterizarlos y saber de qué contaminantes se tratan.

Segunda etapa de la investigación:

Identificar y evaluar a las variables que nos permitirán controlar el grado de remoción de colorantes en estas aguas flexo gráficas.



Tercera etapa de la investigación:

Realizar el diseño del sistema experimental electro catalítico con el cual realizaremos el tratamiento de las aguas residuales flexos gráficos.

La cuarta etapa de la investigación:

Establecer la correlación de las variables independientes con la dependiente a fin de lograr la remoción óptima de los efluentes flexo gráficos, en el menor tiempo.

4.3 Población y muestra

Población

Para la presente investigación se toma como población los efluentes de las aguas coloreadas de impresión almacenados en tanques, ubicado dentro de las instalaciones de la empresa Allin colors SCRL. Se consideró 5 000 litros (5m³), que se genera durante su proceso diario.

Tabla 10.

Registro de reporte diario

REGISTRO DE PROCESO	POBLACIÓN
Registro del muestreo de campo	5 000 L.
Emisión de reporte	5 000 L.

Muestra

Para la obtención de la muestra, se le aplica la técnica del muestreo probabilístico aleatorio simple, calculando la muestra para los procesos en el periodo de un mes, debido a que se ha considerado las fechas de muestreo del 01 de abril al 30 de abril de 2021, teniendo en cuenta el muestreo a realizarse una vez por día, de lunes a viernes.

Bajo esta modalidad se logra recoger una muestra de 200 L de efluentes, emitidos en un periodo de un mes.

Unidad de análisis: Cada litro de efluente flexográfico.



4.4. Lugar de estudio

a. Proceso electrocatalítico

Laboratorio de Química -Física del I.S.T.P. Carlos Cueto Fernandini.

b. Proceso de oxidación avanzada (POA).

Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao (LOPU).

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1 Técnicas analíticas

Valoraciones redox con permanganato de potasio

Se realizaron análisis químico mediante valoraciones redox con permanganato de potasio para determinar la concentración en porcentaje masa-masa de peróxido de hidrógeno y diluciones. El peróxido de hidrógeno fue comprado en Química Goicochea SAC.

Figura 6.

Instrumental de valoración volumétrica



Análisis espectrofotométrico

Este nos permite medir la absorbancia como una medida de color de las muestras con tintes flexo-gráficos.

Figura 7.

Equipo empleado para detectar la absorbancia del blanco y del analito



4.5.2. Materiales y/o equipos

- a. Sistema de electro catálisis (Fuente de corriente continua, celda electrolítica y ánodos de grafito, TiO y agitador magnético)
- b. Equipo de oxidación avanzada.

90

A. Muestras de las pinturas (bases) empleadas en la preparación de los tintes para impresión gráfica.

Figura 8.

Muestras de las pinturas bases que se emplean en la preparación de los tintes de impresión



Figura 9.

Muestras recogidas para el tratamiento electrocatalítico



90

B. Celdas electrolíticas

Figura 10.

Diseño y construcción de las celdas electrolíticas



Son los receptáculos que sirven para depositar el electrolito, que en nuestro caso está constituido por las muestras de aguas coloreadas de impresión gráfica. Estas deben ser de un material adecuado, en nuestro caso son de acrílico a fin no contaminar con otros elementos.

20

C. Rectificador de corriente

Es un equipo en cuya estructura interna dispone de un sistema que permite transformar una corriente alterna de 220V, a otro tipo de corriente denominada continua cuyo voltaje es pequeño y se comporta cual si fuese una pila o una batería.

Estos equipos se caracterizan por trabajar a bajas diferencias de potencial a fin no tener problemas al manipular a los electrodos a fin de observar su comportamiento, pero son capaces de entregar cantidades altas de amperaje. Por ello estos equipos se constituyen en el pulmón del proceso electrolítico

Figura 11.

Rectificador de corriente de 0-15 V



D. Instalación del sistema de electrocatálisis

Tal sistema estará constituido por un rectificador de corriente alterna a continua, con un regulador de voltaje de 0 a 15 voltios y una intensidad de corriente máxima de 150 amperios, conductores de corriente eléctrica, celda electrolítica, los electrodos de graffito, aluminio y oxido de titatio y como electrolito (agua coloreada a degrader).

Figura 12.

Sistema instalado con el agua residual a tratar mediante electrocatálisis



Nota: Aquí la misma muestra se somete a observar la degradación de color, empleando ánodos diferentes y variando el tiempo.

20

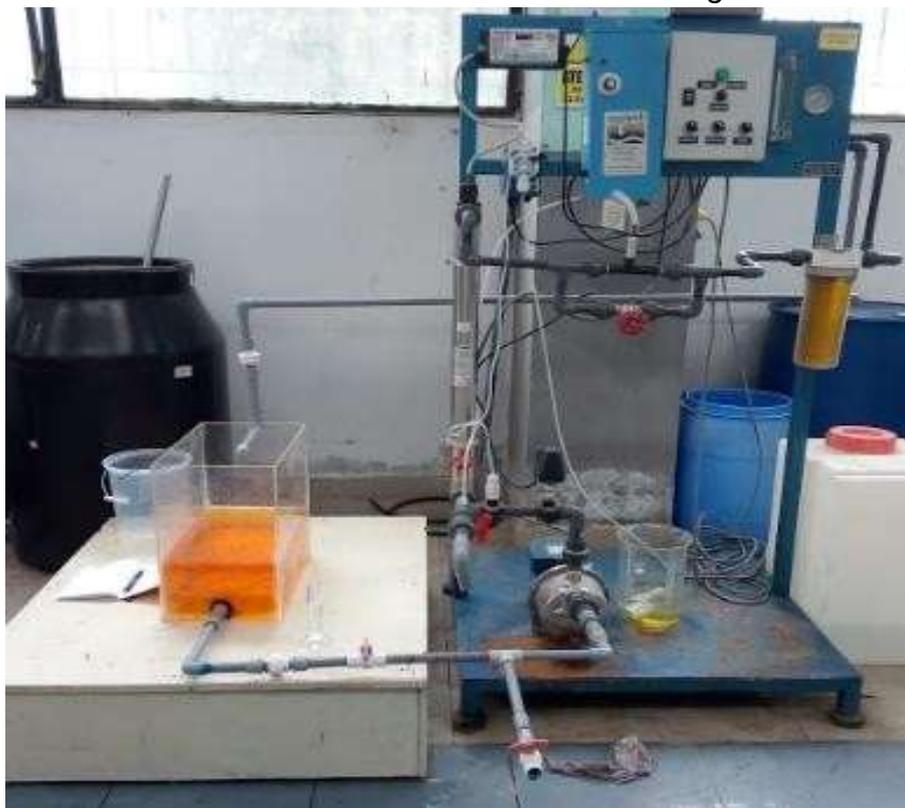
E. Módulo experimental de oxidación avanzada

El módulo experimental está compuesto por un tanque de acrílico que almacenará la solución a tratar; las dimensiones del tanque son 25*40*40 cm. A la salida del tanque se encuentra una válvula tipo bola donde realizaremos el muestreo en el tiempo, habiéndose incorporado una electrobomba de agua marca Pentax. Además, cuenta con una lámpara UV de 48 Watts de potencia, marca Sterilight, por la cual el fluido a tratar más la solución oxidante utilizada (peróxido de hidrógeno) serán irradiadas.

Así mismo en este módulo están incorporados un rotámetro marca Hydronix que nos permite realizar la lectura del caudal en L/min y un filtro sin cartucho que cumple el papel de mezclador.

Figura 13.

Módulo de oxidación avanzada con muestra de agua residual



Nota. El equipo se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias (FIQ-UNAC).

F. Espectrofotómetro portátil

20

La medición de la absorbancia se realizó mediante un espectrofotómetro VIS portátil DR 1900 marca HACH., la longitud de onda (λ) fue de 465 nanómetros según lo normado por NCASI METHOD COLOR 71.0

La medición de absorbancia fue fundamental para obtener los porcentajes de reducción del color, estos valores se pueden observar en la siguiente tabla.

Figura 14.

Lectura de la absorbancia en función del tiempo



Nota. Espectrofotómetro VIS DR 1900 HACH

Los elementos que componen la cámara experimental de secado son:

1. Ventilador centrifugo con variador de velocidad.
2. Calentador para aire por medio de una resistencia eléctrica.
3. Tablero de control con termostatos y flujo de aire.
4. Re-cámara combinada de secado.
5. Muestra de producto a deshidratar.
6. Balanza digital que va midiendo la variación de la masa del producto en el tiempo de ensayo.
7. Salida de aire que pasa por la re-cámara de secado.

Tabla 11.

Características del equipo experimental

ACCESORIO	CARACTERISTICAS	CAPACIDAD
Soplador de aire	Tipo turbina con ductos de entrada y salida de 2 pulgadas Con 7 variaciones de voltaje	Velocidad máxima de 1600 rpm y 200W de potencia, alimentación de 24 Voltios DC
Variador de velocidad	establecidas en chapa, transformador de 220 V alimentación AC a 24 V de salida en DC	De 3 A de intensidad
Sensor de temperatura	Termocupla tipo "J" con cable protegido y terminal de acero	Rango de medida de 0 °C a 1200°C
Control de temperatura	Pirómetro análogo-digital, presenta contacto de encendido y lámpara indicadora	Sensibilidad de 1°C y mono sensor tipo "J"
Resistencia de calentamiento	Modelo anillado en base cerámica cilíndrica de 50 cm de longitud	De 500 W
Termómetro análogo de comparación	De laboratorio que contiene mercurio insertado en el centro de cámara	Rango de 0-110 °C

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Para detectar la variación de color en las aguas de impresión siguiendo el procedimiento de laboratorio la Universidad Nacional del Callao, se llevó a cabo el procedimiento siguiente:

4.6.1. Caracterización de las aguas residuales de impresión real

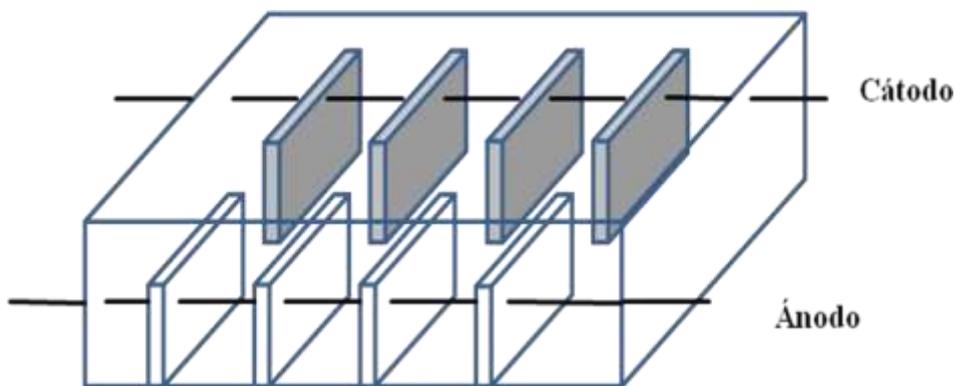
Aguas residuales de impresión real, obtenida de una imprenta situada en la localidad de Ciudad y Campo-Distrito de San Juan de Lurigancho- Lima-Perú, se utilizó para las pruebas de oxidación electrocatalítica. El agua residual se descarga durante el procedimiento de limpieza (para eliminar la tinta y tensoactivos) después de la finalización del proceso de impresión, que contenía una alta concentración de materia orgánica y croma. Estas aguas residuales se caracterizaron con un pH elevado (alrededor de 13). Una alta conductividad (60 a 700 Ms cm⁻¹) y una alta concentración de TOC (28 000 – 30 000 mgL⁻¹).

4.6.2. Agua pre tratadas electrolíticamente

Se recolectaron muestras de agua de la empresa Alling Color, que emplea tintas flexográficas. Dichas muestras se mezclaron buscando la mejor homogenización posible, de modo tal que dichas muestras presentaron diferentes coloraciones como son: azul, negro, amarillo, rojo; con un pH en el rango de 8,5 a 9,5

Figura 15.

Disposición de la celda electroquímica



Fuente: Olivera (2009) , publicado en la revista científica Quivera

Posteriormente estas muestras fueron procesadas mediante un tratamiento electroquímico empleando electrodos de aluminio tando catódicos como anódicos, aplicando una corriente directa entre 3-4 A, realizando la reacción con aireación constante.

Se implementó una celda con cuatro cuatro ánodos y cuatro cátodos de aluminio conectados mediante remaches a un soporte de aluminio, siendo las dimensiones de cada placa de 15 cm por 10 cm. El material de la celda fue de plástico con un volumen de 3 L. y la disposición de los electrodos se realizó intercalando cátodo y ánodo secuencialmente. Tal dispositivo se muestra en la figura 2.

Se monitoreó el proceso al inicio y finalñ del pre-tratamiento, determinando los parámetyros fisicoquímicos de colort, turbiedad y demanda química de oxígeno, con la finalidad de analizar el grado de remoción de

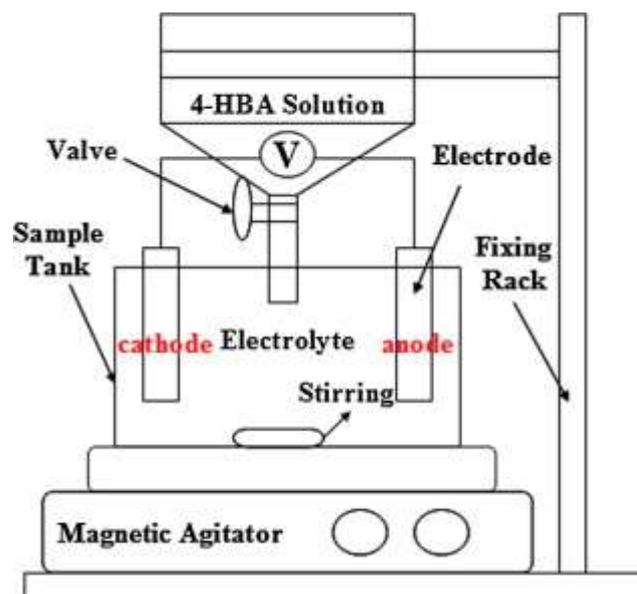
contaminantes orgánicos que estuvieron disueltos en el agua.

4.6.3. Sistema experimental para la prueba radical hidroxilo

El sistema experimental para la prueba de radical hidroxilo se muestra en la Fig. 2, el cual consiste en un tanque de reacción cilíndrico de (15 cm de diámetro por 7,5 cm de altura), un agitador electromagnético, un inyector de reactivo y un ánodo catalítico comercialmente disponible tal como el TiO_2 , DSA y grafito (5,5 cm de longitud por 5 cm de ancho y 0,5 cm de altura). El cátodo para todas las pruebas será una placa de grafito. La separación entre los electrodos será de 7 cm. La electrólisis se llevó a cabo sobre de un campo eléctrico externo proporcionada por una corriente directa y una fuente de alimentación. La solución del electrolito fue de 0,01 M de Na_2SO_4 y el inyector de reactivo lleno de ácido 4- hidróxibenzoico en solución se ha instalado por encima del tanque de reacción. Cuando se generaron radicales hidroxilos durante el experimento, el captador (es decir, 4- HBA) fue añadido por el inyector, y el agitador electromagnético se enciende para mezclar la solución del tesororo para reaccionar completamente con los radicales hidroxilos.

Figura 16.

Sistema experimental para generar y capturar los iones hidroxilo



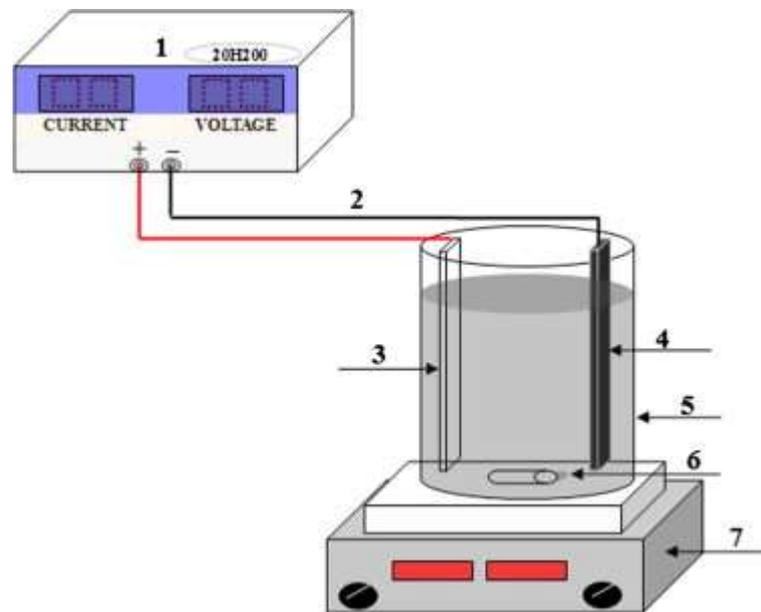
Fuente: Publicación de Cheng y otros (2013) en la revista ELSEVIER

4.6.4. Sistema experimental para el tratamiento de las aguas residuales de impresión gráfica mediante un proceso electrocatalítico

El sistema experimental para el tratamiento de aguas residuales electrocatalíticas provenientes de impresión se ilustra en la Fig. 17, donde se utiliza un tanque cilíndrico como el reactor (17 cm de diámetro por 16 cm de altura). Un agitador electromagnético se colocó debajo del tanque para mezclar completamente la solución de reacción durante el funcionamiento. Tres materiales electrocatalíticos como se indicó anteriormente (TiO_2 , DSA y grafito) fueron instalados individualmente como ánodo mientras que el cátodo será de un acero inoxidable. Tanto el ánodo como el cátodo tendrán una dimensión de 12cm de longitud por 9 cm de ancho por 0,3 cm de espesor, con una separación de 7 cm.

Figura 17.

Sistema experimental para para el tratamiento de las aguas residuales electrocatalíticas de impresión real



Fuente: Publicación de Cheng y otros (2013) en la revista ELSEVIER

Donde:

1. Es una fuente de alimentación de corriente continua.
2. Alambre conductor de cobre.
3. Electrodo anódico
4. Electrodo catódico
5. Reactor de electrólisis
6. Barra magnética
7. Agitador electromagnético.

El volumen de agua residual flexo gráfica para cada experimento fue de 3,0 L, y el p H se ajustó previamente a 9,0 empleando una solución de HNO₃. El electrodo catalítico (IrO₂) se utilizó como ánodo debido a su alta capacidad catalítica y resistencia a la corrosión. Nuestro estudio también demostró que la adición de NaCl 0,25M en las aguas residuales tratadas mediante la tecnología electrocatalítica podría aumentar la eliminación de croma en un 25%. Las diferentes condiciones de operación fueron probados para aclarar su impacto en los rendimientos de eliminación de TOC y croma, incluyendo la conductividad de las aguas residuales (5-20 Ms cm⁻¹), con una densidad de corriente de (10-50 mA por cada cm²). El tiempo de funcionamiento de cada prueba se prolongó durante 60 min, y la muestra de aguas residuales se recogió una vez cada 20 min para mediciones de TOC y de crominancia.

4.7.5 Resultados de las aguas pretratadas electroquímicamente

Habiendo definido las condiciones del tratamiento más eficiente se encontraron los resultados de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda que se muestran en la tabla 12.

Tabla 12.*Parámetros físico-químicos iniciales de la muestra de agua*

Parámetro	Intervalo
Color (U Pt-Co)	350 000 - 6 500 000
Turbiedad (U FAU)	22 000 - 800 000
DQO (mg /L)	89 000 – 530 000
DBO5 (mg /L)	menor que 3 000
SST (g /L)	20 – 50
P H	8,5 – 9,5
Coloración	Amarilla, celeste, roja, azul, verde, etc.

Analizando los resultados de la tabla 12, podemos advertir que los parámetros iniciales son muy elevados, presentando un índice de biodegradabilidad (relación DBO₅ /DQO) próximo al valor de cero; lo cual nos indica que la muestra no presenta biodegradabilidad debiendo ser tratada mediante técnicas electroquímicas con la finalidad de disminuir estos valores iniciales.

Tabla 13.*Parámetros físicoquímicos del agua pretratada con electrodos de aluminio*

Parámetro	Intervalo
Color (U Pt-Co) (% de remoción)	No determinado
Turbiedad (U FAU) (% de remoción)	No determinado
DQO (mg /L) (% de remoción)	No determinado
DBO5 (mg /L) (% de remoción)	No determinado
SST (g /L) (% de remoción)	No determinado
P H (% de remoción)	No determinado

Estas pruebas no pudieron ser determinadas, puesto que, a los cinco minutos del tratamiento, la gran cantidad de sólidos en suspensión que tenía la muestra se adhirieron a los electrodos formando recubrimientos que los pasivaron, lo cual ocasionó la pérdida de la migración de los electrones por el paso de la corriente eléctrica hasta llegar a cero, inhabilitando el proceso.

Por esta razón se descartó aplicar el tratamiento con electrodos de aluminio directamente sobre el agua flexo gráfica cruda y se procedió a usar un pretratamiento a través de un agente coagulante que fue de policloruro de aluminio.

A. Pretratamiento con un agente coagulante

La dosis óptima con la cual se debe trabajar con el policloruro de aluminio fue determinada mediante una prueba de jarras, respetando el p H de la muestra original, la cual después de varios ensayos se manejaron dos cantidades, la cual fue 17,5 ml/L y posteriormente se analizaron los parámetros fisicoquímicos de dicha agua. Tales resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 14.

Parámetros iniciales de la muestra utilizada, en el proceso de coagulación con 17,5 ml/L.

Tipo de muestra	p H	Color (U Pt-Co)	Turbidad (UFAU)	DQO (mg/L)
Muestra cruda	8,3	5 685 000	315 000	530 000
Muestra después de coagular	7,5	2 070	16	9 876

B. Acoplamiento de tratamientos coagulación-electroquímico

Una vez que adiciono el agente coagulante el agua residual, esta generó gran cantidad de lodos, los cuales fueron filtrados y posteriormente se aplicó el tratamiento electroquímico con electrodos de aluminio, con 33,3 A/m² de densidad de corriente. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos se monitorearon cada 10 minutos, estos se muestran en la tabla 15.

Tabla 15.*Resultados de los parámetros fisicoquímicos*

Variables	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
p H	8,05	8,52	8,6	8,44	8,7
Color (U Pt-Co)	1,446	1,300	1,020	952,38	915
Turbiedad (UFAU)	12	4	3	3	3
DQO (mg/L)	7,169	7,000	5,285	3,979	3,750

En base a los resultados de la tabla 4 se observa que el tiempo de tratamiento óptimo es a los 40 min, ya que transcurrido este tiempo de electrocoagulación la eficacia de remoción de DQO logradas no son muy significativas, es decir después de este tiempo de variación de valores de DQO es casi nula.

C. Tratamiento con O₃

La ozonización es una de las más atractivas para resolver problemas de color en efluentes. El ozono es extraordinariamente oxidante y reacciona rápidamente con la mayoría de los compuestos orgánicos (Salome y otros. 2006)

Basándonos en esta referencia, se realizaron varias pruebas combinando el pretratamiento citado anteriormente (a las condiciones señaladas) y el proceso de ozonización para varias muestras de agua, ya que la coloración como se mencionó anteriormente varía de un color a otro, estos resultados se muestran en las tablas 15, 16 y 17.

Tabla 16.*Resultado del proceso del tratamiento para agua con coloración roja*

Variable	Agua cruda	Agua tratada
pH	8,3	5,6
Color (U Pt-Co)	5 685 000	142
Turbiedad (UFAU)	315 000	11
DQO (mg/L)	530 00	3 003



Tabla 17.*Resultado del proceso del tratamiento para agua con coloración azul*

Variable	Agua cruda	Agua tratada
pH	8,3	6,45
Color (U Pt-Co)	630 000	12
Turbiedad (UFAU)	28 000	0
DQO (mg/L)	88 939	3 179

Tabla 18.*Resultado del proceso del tratamiento para agua con coloración negra*

Variable	Agua cruda	Agua tratada
pH	8,3	6,3
Color (U Pt-Co)	1 646 250	0
Turbiedad (UFAU)	345 000	0
DQO (mg/L)	93 829	2 984

Como puede apreciarse el tren de tratamiento de las aguas residuales que contienen tintas, proporciona resultados prometedores.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

No aplica.

5.2. Resultados inferenciales

Por tratarse de un proyecto tecnológico, este se orientará fundamentalmente al recojo de la data experimental para luego usar algun método estadístico.

5.2.1 Recolección de la data relacionada con electrocatálisis

a. Impacto de los materiales de los electrodos en la producción de radicales hidroxilos

Para examinar si había alguna superposición de señales o interferencia del electrolito, se tomó una muestra del agua flexográfica en la cual se analiza el cambio de la concentración del radical OH con el tiempo de reacción para varios materiales de electrodos. Después de 3 minutos de tratamiento electrocatalítico, los de TiO_2 , DSA, y electrodos neutros de grafito produjeron $8,21 \cdot 10^{-3}$; $5,24 \cdot 10^{-3}$; y $0,86 \cdot 10^{-3}$ M radicales de hidroxilo (concentración acumulativa), respectivamente. Este resultado demuestra que los materiales catalíticos (TiO_2 y DSA) podrían rendir mucho más OH que el material no catalítico (grafito). Esta gran diferencia de producción de OH denota también la degradación orgánica en los electrodos electrocatalíticos. También se observa que la concentración de OH producida por el TiO_2 fue mayor que por DSA. Esto se atribuyó a sus diferencias en el área de superficie específica, la brecha de energía y la hidrofobicidad de la superficie.

La concentración de OH para cada electrodo se mantuvo en un rango determinado después de 0,5 minutos, lo que implica el equilibrio rápido entre la producción y el consumo de OH en el proceso electrocatalítico.

b. Grado de actividad de radicales oxidrilos al variar el tiempo con cambio de ánodos

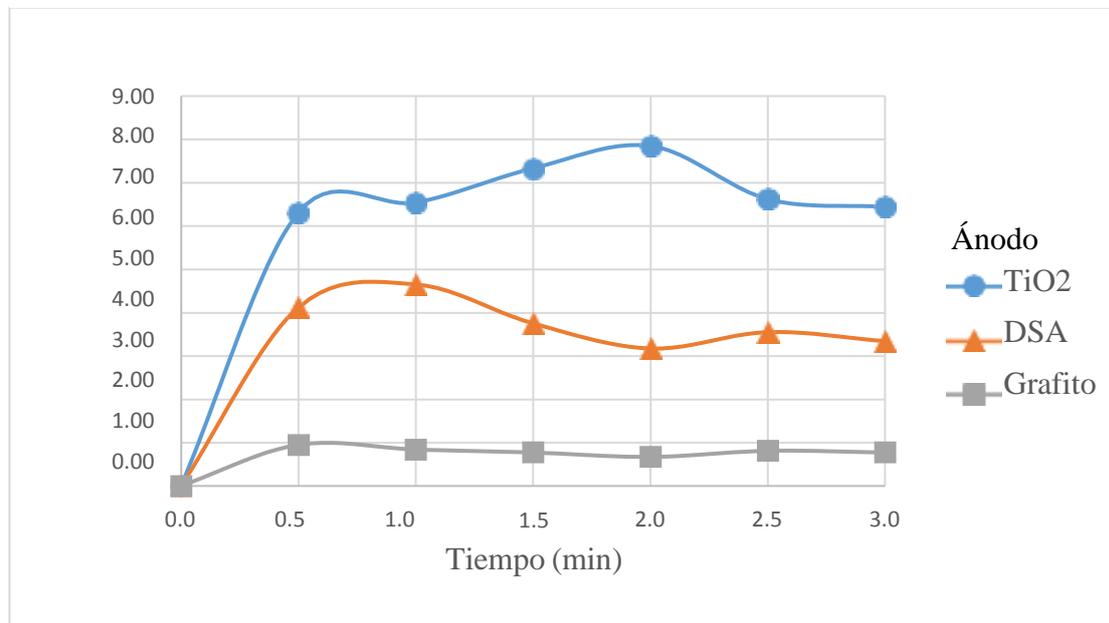
Tabla 19.

[OH⁻] en M vs t (min) para la reacción en electrodos de diferentes materiales

Tiempo (min)	[OH ⁻] (10 ⁻³ M)		
	TiO ₂	DSA	Grafito
0.0	0.00	0.00	0.00
0.5	6.31	4.12	0.95
1.0	6.54	4.65	0.84
1.5	7.33	3.75	0.77
2.0	7.85	3.17	0.67
2.5	6.62	3.55	0.81
3.0	6.44	3.34	0.77

Figura 18.

[OH⁻] en M vs t (min) para la reacción en electrodos de diferentes materiales



Conclusión: El ánodo recomendado para este trabajo es el TiO₂.

c. Impacto de la conductividad de las aguas residuales flexográficas en la eliminación del TOC y croma

El agua residual cruda tenía una gran conductividad, que induce un voltaje bajo y, en consecuencia, una base tasa de producción de radicales hidroxilos. La conductividad de las aguas residuales en bruto se diluyó en serie de 5, 10, 15 y 20 mS cm⁻¹ antes del tratamiento electrocatalítico. Nuestros experimentos mostraron que el Ph de las aguas flexográficas aumentó ligeramente como indicamos: 9,00 ;9,29; 9,28; 9,36 y 9,37 en los anteriores cuatro conductividades diferentes después de 60 min de tratamiento (densidad de 10 mAcm⁻², ánodo de IrO₂ y el cátodo de acero inoxidable). Si se aplica una energía eléctrica suficiente, los radicales hidroxilos generados por el electrodo catalítico pueden formar iones de hidróxido, lo que resultará en un alto pH. La conductividad de las aguas residuales de las aguas flexográficas se mantuvo estable durante todo el tratamiento electrolítico.

La variación de la eficiencia de alimentación de TOC con el tiempo de reacción a diferentes conductividades se muestra en la figura 2.

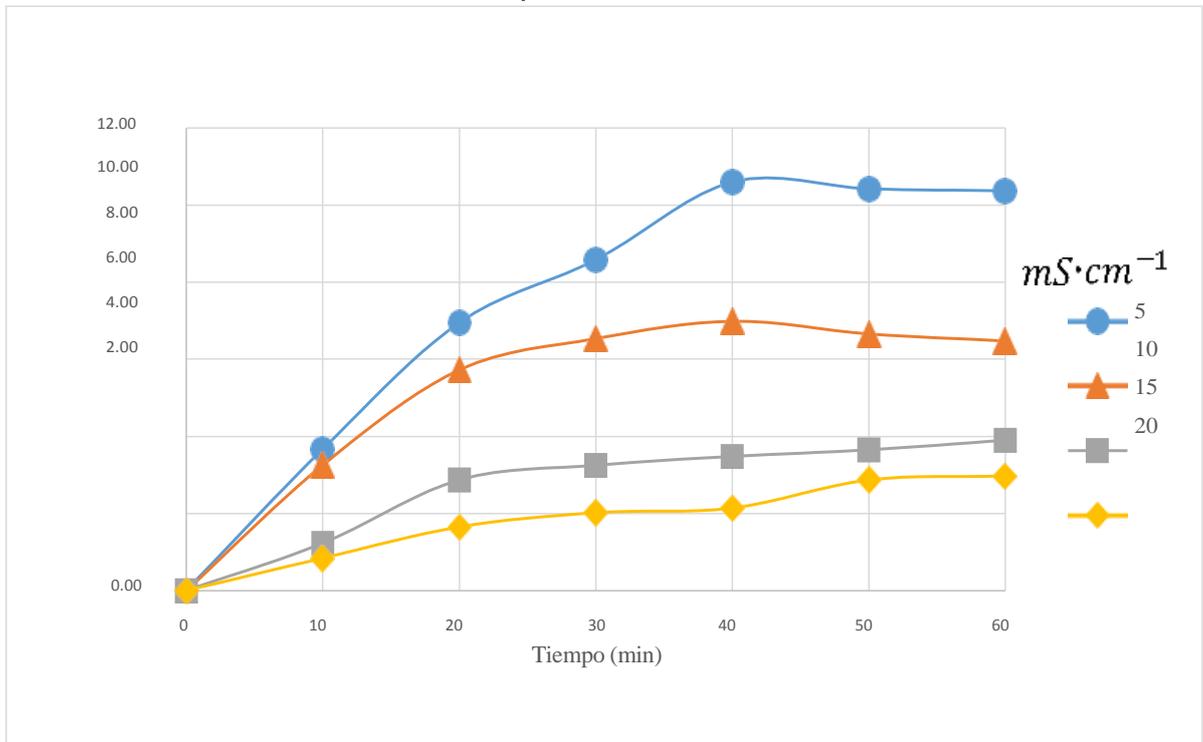
Tabla 20.

% de remoción del TOC con el tiempo de reacción en diferentes conductividades

Tiempo (min)	C.E mS*cm ⁻¹			
	5	10	15	20
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	3.67	3.26	1.23	0.84
20	6.95	5.73	2.87	1.65
30	8.58	6.54	3.25	2.02
40	10.60	6.99	3.48	2.14
50	10.42	6.66	3.65	2.87
60	10.37	6.48	3.90	2.97

Figura 19.

% de remoción del TOC con el tiempo de reacción en diferentes conductividades



Conclusión: El ánodo recomendado para este trabajo es el TiO₂.

Los resultados indican que a una densidad de corriente fija de 10 mA cm⁻², la eficiencia de alimentación de TOC aumentó primero con el tiempo de funcionamiento antes de los 40 min, y se mantuvo casi estable después. Al final del tratamiento (60 min), las eficiencias de alimentación de TOC eran 16 %, 10 %, 7 % y 6 % a los 5, 10, 15 y 2 mS cm⁻¹, respectivamente. Se observa que la conductividad mas baja es (5 mS cm⁻¹) condujo a la tensión más alta bajo una densidad de corriente fija, que fue favorable para la degradación de contaminantes orgánicos por los radicales hidroxilos producidos en el electrodo catalítico. Además de los radicales hidroxilos, otros oxidantes fuertes, tales como el HOCl.

La conductividad de las aguas residuales flexográficas jugó un papel clave en el tratamiento de las aguas residuales de impresión desde una alta conductividad dio lugar a una producción insuficiente de estos oxidantes.

La variación de la eficiencia de eliminación de croma con el tiempo de reacción a diferentes conductividades se muestra en la figura 3. Al final del tratamiento (60 min), las eficiencias de eliminación de croma en conductividades de 5, 10, 15 y 20 mS* cm⁻¹ eran 25 %, 15 %, 9% y 3 % respectivamente. Similar a la variación de la eficiencia de eliminación de TOC, una conductividad de las aguas residuales inferior condujo a una mayor eficiencia de eliminación de croma debido a que se producen más radicales hidroxilos.

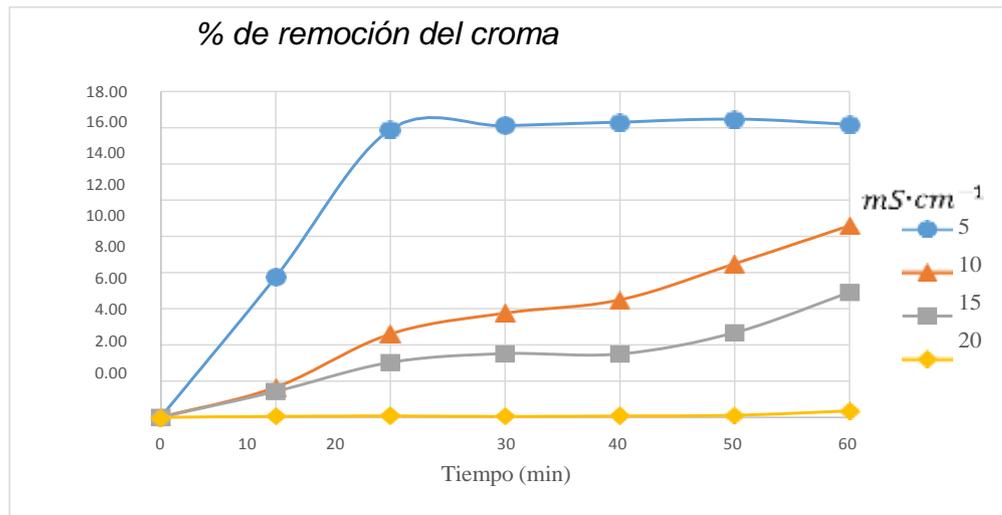
Tabla 21.

% de remoción del croma con el tiempo de reacción en diferentes conductividades

Tiempo (min)	C.E mS*cm ⁻¹			
	5	10	15	20
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	7.74	1.65	1.42	0.05
20	15.90	4.60	3.03	0.07
30	16.10	5.75	3.51	0.05
40	16.30	6.48	3.49	0.07
50	16.47	8.48	4.67	0.11
60	16.18	10.58	6.89	0.35

Figura 20.

% de remoción del croma con el tiempo de reacción en diferentes conductividades



Conclusión: Solución de trabajo 5 mS *cm⁻¹ usando TiO₂ como ánodo

d. Impacto de la densidad de corriente en la eliminación del TOC y croma.

En la figura (4) se muestra la eficiencia de la eliminación de TOC a diferentes densidades de corrientes aplicadas. Las eficiencias de eliminación de TOC bajo diferentes densidades de corriente aplicadas. Las eficiencias de eliminación de TOC eran de 25%, 25%, 31%, 42% y 53% a densidades de corriente de 10, 20, 30, 40, y 50 mA.cm⁻² respectivamente. Los mecanismos de contaminantes orgánicos descomposición por un sistema electrocatalítico podrían dividirse en la oxidación directa por el ánodo y la oxidación indirecta por oxidantes secundarios. Si se aplica una pequeña densidad de corriente, ni oxidación directa por el ánodo ni la oxidación indirecta por los radicales hidroxilos sería importante. Como resultado, la eficiencia de la eliminación de TOC aumentó con un aumento de la densidad de corriente aplicada en el rango de 10 a 50 mA. cm⁻².

La eficiencia de eliminación de TOC máxima es de 53 % se logró a la densidad de corriente mas alta, es decir a 50 mA. cm⁻².

En la figura (5) se muestra la variación de la eficiencia de eliminación de croma con el tiempo de reacción a diferentes densidades de corriente. Las eficiencias de remoción de croma fueron: 16%, 30%, 43%, 56% Y 71% con densidades de corriente de 10, 20, 30 40 Y 50 mA. cm⁻² respectivamente

Tabla 22.

% de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente

Tiempo (min)	mA*cm-2				
	10	20	30	40	50
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.13	12.39	13.10	6.42	15.98
20	0.45	22.68	22.95	9.84	29.53
30	0.52	24.05	22.73	23.54	39.63
40	0.71	25.25	31.42	34.44	49.06
50	1.56	26.79	35.27	44.17	56.92
60	1.65	27.47	39.03	52.13	64.37

Tabla 23.

% de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente

Tiempo (min)	mA *cm ⁻²				
	10	20	30	40	50
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.13	12.39	13.10	6.42	15.98
20	0.45	22.68	22.95	9.84	29.53
30	0.52	24.05	22.73	23.54	39.63
40	0.71	25.25	31.42	34.44	49.06
50	1.56	26.79	35.27	44.17	56.92
60	1.65	27.47	39.03	52.13	64.37

Figura 21.

% de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente

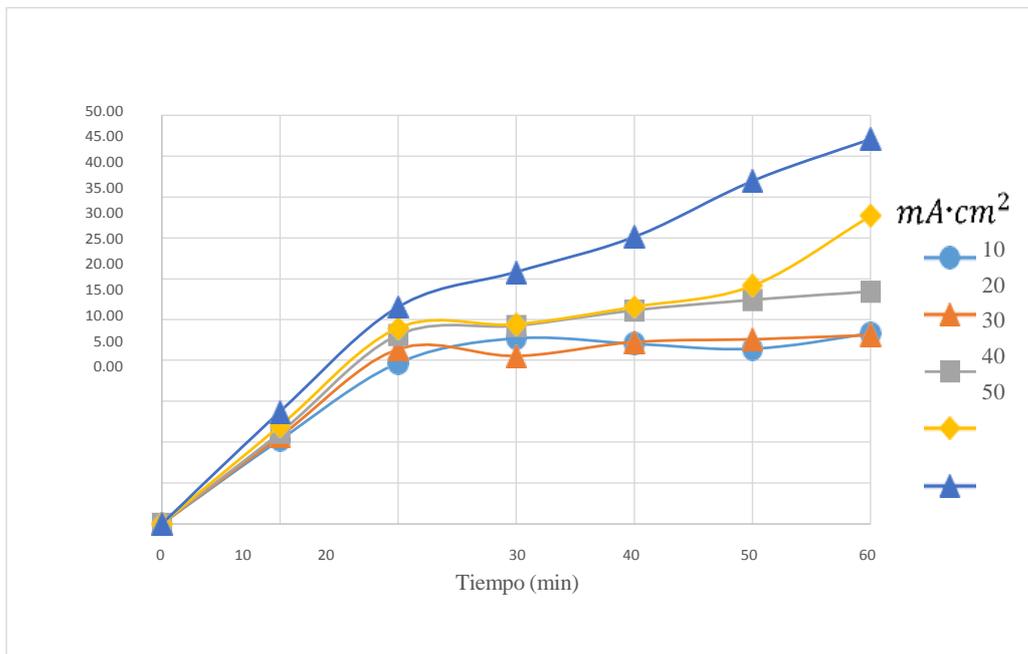
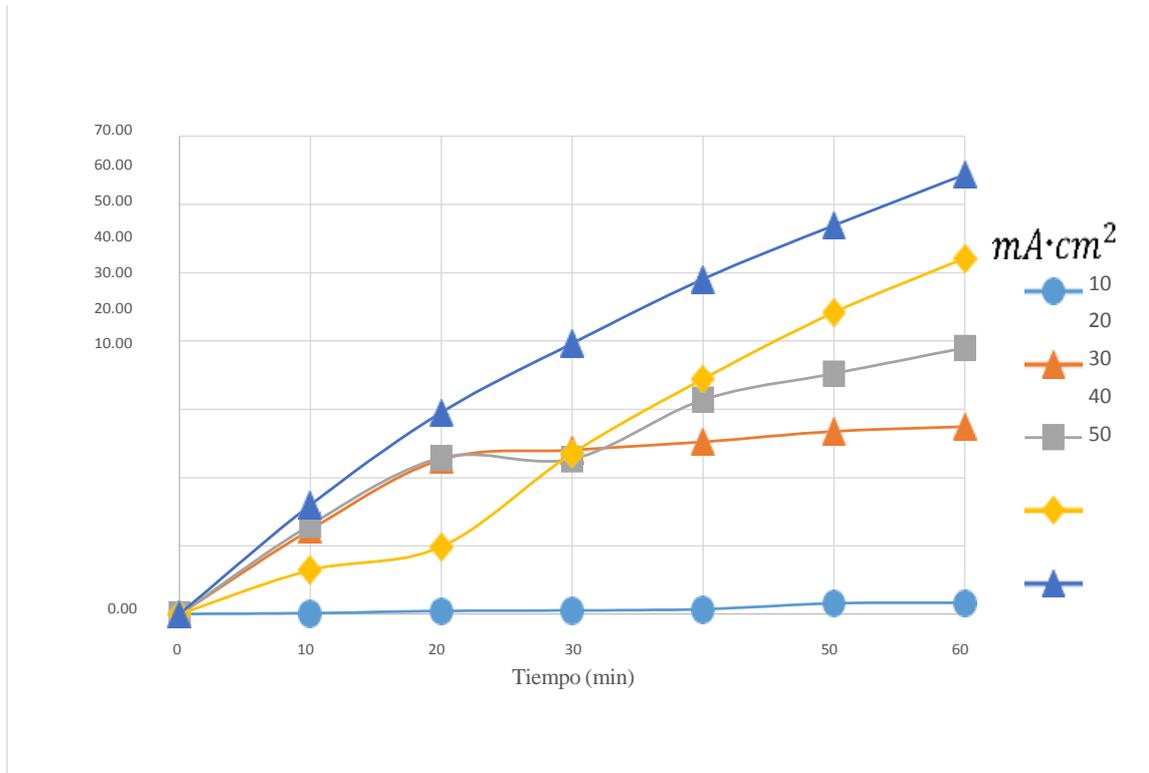


Figura 22.

% de remoción del TOC con el tiempo de reacción con diferentes densidades de corriente



Conclusión: Solución de trabajo 5 mScm⁻¹ usando TiO₂ como ánodo presenta una remoción del 47,08 % en TOC y 64,37% en cromo en un tiempo de 60 min.

5.2.2 Data relacionada con la oxidación avanzada

i. Resultados experimentales obtenidos respecto a los parámetros de control

En la tabla (6) se muestran los resultados del porcentaje de reducción de color para cada corrida experimental efectuada mediante el proceso de oxidación avanzada H₂O₂ /UV.

Tabla 24.

Porcentaje de reducción de color respecto a los parámetros de operación

N°	Parámetros de operación			% Reducción de color
	[Colorante] ppm	[Peróxido de hidrógeno] %W/W	pH inicial	
1	10	10	3	98,947
2	10	30	6	98,577
3	10	50	10	92,615
4	15	10	6	96,667
5	15	30	10	97,859
6	15	50	3	98,511
7	20	10	10	93,848
8	20	30	3	100,000
9	20	50	6	93,985

Veamos gráficamente el comportamiento de la variación del % reducción de color en función del tiempo para las nueve corridas experimentales:

Figura 23.

Variación del porcentaje de reducción de color como una función del tiempo a [Colorante] = 10 ppm, [H₂O₂] = 50%W/W, pH = 10

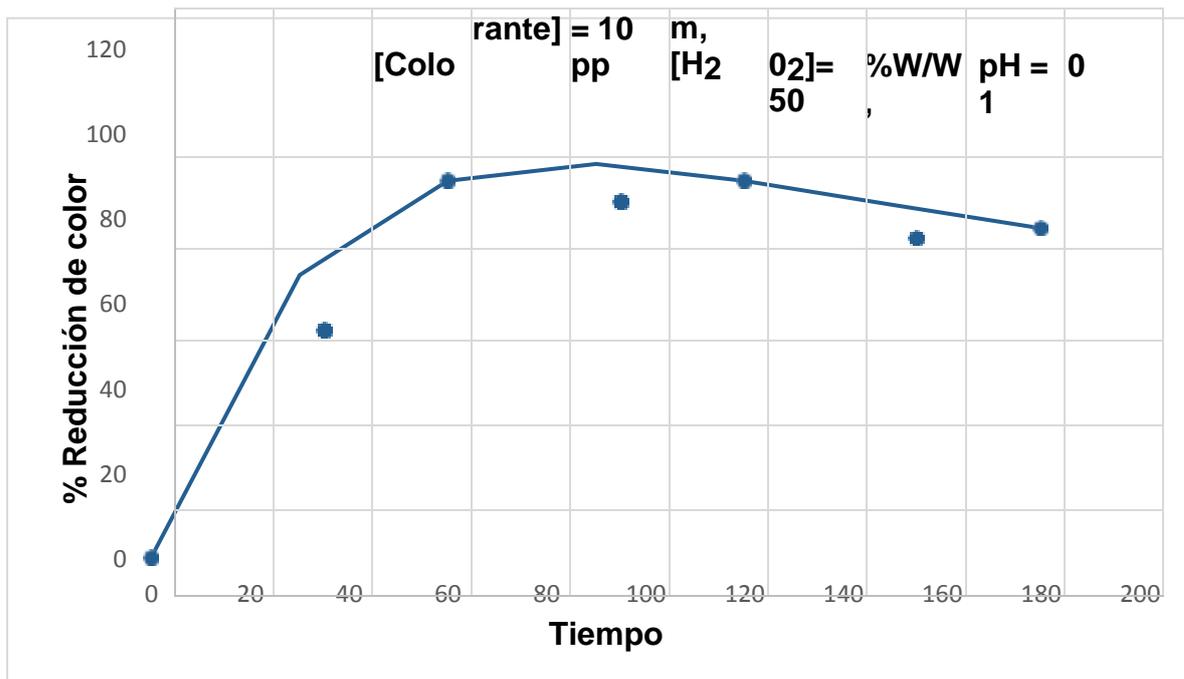
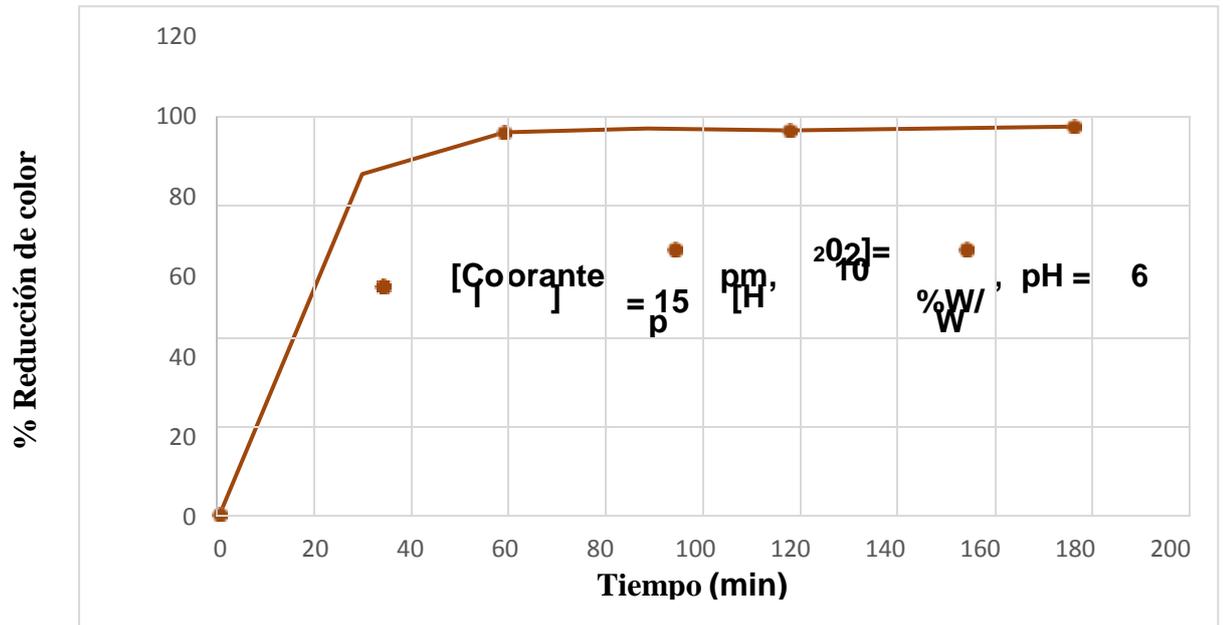


Figura 24.

Variación del porcentaje de reducción de color como una función del tiempo a [Colorante] = 15 ppm, [H₂O₂] = 10%W/W, pH = 6



ii. Medición de absorbancia

La medición de absorbancia fue fundamental para obtener los porcentajes de reducción de color; estos valores se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 25

Absorbancias vs parámetros de operación

N°	Parámetros de operación			Absorb. inicial	Absorb. final
	[Colorante] ppm	[Peróxido de hidrógeno] %W/W	pH inicial		
1	10	10	3	0,285	0,003
2	10	30	6	0,281	0,004
3	10	50	10	0,325	0,024
4	15	10	6	0,21	0,007
5	15	30	10	0,467	0,010
6	15	50	3	0,47	0,007
7	20	10	10	0,829	0,051
8	20	30	3	0,651	0,000
9	20	50	6	0,665	0,040

Figura 25.

Absorbancia como función del tiempo

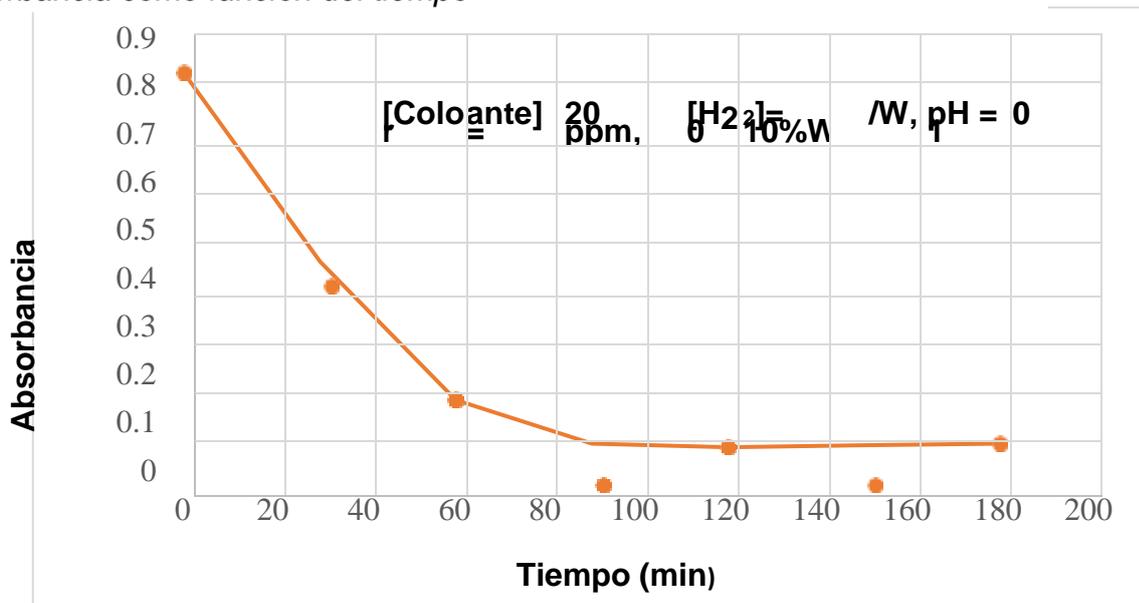


Figura 26.

Degradación de color del efluente flexográfico en el tiempo



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

a. Concentración de OH al cambiar el tiempo de reacción para electrodos diferentes

En la fig. 18 se advierte que, después de 3 minutos de tratamiento electrocatalítico, los de TiO₂, DSA, y electrodos de graffito produjeron $8,21 \times 10^{-3}$, $5,24 \times 10^{-3}$, y $0,86 \times 10^{-3}$ M radicales hidroxilo (concentración acumulativa), respectivamente. Este resultado demuestra que los materiales catalíticos (TiO₂ y DSA) podrían rendir mucho más OH que el material no catalítico (grafito). Esta gran diferencia de producción de OH, denota la capacidad de degradación orgánica de los electrodos electrocatalíticos. También se observa que la OH concentración producida por el TiO₂ fue mayor que por DSA. Esto se atribuyó a sus diferencias en el área de superficie específica, la brecha de energía, y la hidrofobicidad de la superficie. Las OH concentración para cada electrodo se mantuvo en un rango determinado después de 0,5 minutos, lo que implica el equilibrio rápido entre la producción y el consumo de OH en el proceso electrocatalítico.

b. Efecto del tiempo de reacción

La variación de la eficiencia de eliminación de TOC con el tiempo de reacción a diferentes conductividades se muestra en la fig.19. Los resultados indican que a una densidad de corriente fija de 10 mA cm^{-2} , la eficiencia de eliminación de TOC aumentó primero con el tiempo de funcionamiento antes de los 40 min, y se mantuvo casi estable después. Al final del tratamiento (60 min), las eficiencias de eliminación de TOC eran 16%, 10%, 7% y 6% a los 5, 10, 15, y 20 mS cm^{-1} , respectivamente.

c. Variación de la eficiencia de eliminación de croma con el tiempo de reacción a diferentes densidades de corriente

En la fig. 22 se muestran que las eficiencias de remoción de croma fueron 16%, 30%, 43%, 56% y 71% a densidades de corriente de 10, 20, 30, 40

y 50 mA cm^{-2} , respectivamente. En comparación con TOC (fig. 21), la eficiencia de eliminación de croma fue más significativo. Este resultado implica que las características de las aguas residuales, como la tinta y otros materiales orgánicos pueden ser descompuestos a algunos compuestos orgánicos más pequeños sin color, que se tradujo en la alta decoloración, pero la retirada bajo TOC.

Se observó que el color de las aguas residuales de impresión se convirtió casi invisible cuando la densidad de corriente llegó a 50 mA cm^{-2} .

d. Efecto de la concentración de peróxido de hidrógeno

En la figura 23, el efecto del peróxido de hidrógeno en el porcentaje de reducción de color a diferentes concentraciones de colorante es más estable a 30% m/m, es decir, que, para cualquiera de los tres niveles de concentración de colorante, el proceso de decoloración muestra poca variabilidad cuando el peróxido de hidrógeno trabaja a dicha concentración comparado con los niveles extremos de concentración del peróxido de hidrógeno (10 y 50% m/m).

Según los resultados obtenidos en la figura 40, el porcentaje de reducción de color aumenta al incrementarse la concentración de peróxido de hidrógeno hasta un nivel (30% m/m) en el que alcanza el máximo valor, posteriormente, a medida que la concentración de hidrógeno aumenta, el porcentaje de reducción disminuye; esto se debe a que cuando la concentración de peróxido es baja, no hay suficiente producción de radicales hidroxilo que ataque al colorante mientras que cuando hay un exceso de peróxido, este "secuestrará" a los radicales hidroxilo generándose reacciones no deseadas cuyos productos presentan una reactividad muy baja hacia los contaminantes orgánicos, de esta manera la eficacia de la decoloración disminuye. (Aleboyeh, Aleboyeh, & Moussa, 2003).

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

La fig. 20 muestra la variación de la eficiencia de eliminación de TOC a diferentes densidades de corriente aplicadas. Las eficiencias de eliminación de

TOC eran 25%, 25%, 31%, 42% y 53% a densidades de corriente de 10, 20, 30, 40, y 50 mA cm⁻², respectivamente. Los mecanismos de contaminantes orgánicos descomposición por sistema electrocatalítico podrían dividirse en la oxidación directa por el ánodo y la oxidación indirecta por oxidantes secundarios. Si se aplica una pequeña densidad de corriente, ni oxidación directa por el ánodo ni la oxidación indirecta por los radicales hidroxilos sería importante. Como resultado, la eficiencia de eliminación de TOC aumentó con un aumento de la densidad de corriente aplicada en el rango de 10 a 50 mA cm⁻². La eficiencia de eliminación de TOC máxima de 53% se logró a la densidad de corriente más alto de 50 mA cm⁻². Una tendencia similar fue encontrado por otros investigadores (Parsons, 2004) y (Martinez et al., 2008). Este resultado implica que una alta densidad de corriente no sólo puede promover la oxidación anódica directa de contaminantes, sino también mejorar la producción de radicales hidroxilos, OCl⁻ y HOCl.

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

El autor declara conocer los reglamentos y procedimientos vigentes establecidos por la Universidad Nacional del Callao y se responsabiliza por la información emitida en el presente proyecto de investigación "*Grado de remoción de colorantes en los efluentes flexo gráficos, empleando un método combinado electro catalísis - oxidación avanzada*"; la cual se desarrolló verificando el cumplimiento de los aspectos éticos, metodológicos, administrativos, legales y de propiedad intelectual, sometiéndome a ser sancionado si se ha actuado en contra de lo establecido.

El presente estudio no realizó ninguna intervención de compromiso a la integridad física y/o psicológica de las personas. El investigador tuvo acceso únicamente a la información necesaria para realizar la investigación.

Beneficencia: Al terminó del estudio, la información obtenida será de beneficio para las industrias flexográficas, como para otros similares, a fin de tomar medidas para mejorar los procedimientos de remoción de colorantes.

CONCLUSIONES

1. El tratamiento electroquímico (vía electrocoagulación), por si solo, no promueve remociones significativas, debido a la aglomeración de sólidos en los electrodos que inhabilitan el proceso.
2. El empleo de policloruro de aluminio puro en solución acuosa (como pretratamiento) provoca la remoción de una cantidad considerable de contaminantes, provocando con ello la disminución de los valores de color, turbiedad y DQO.
3. El tratamiento con ozono provoca un aumento en la DBO, ayudando a la biodegradabilidad de la muestra que puede ser removida mediante la aplicación del tratamiento electrocoagulación logrando eficiencias cercanas al 45 % con respecto a la DQO.
4. El proceso electrocatalítico podría generar radicales hidroxilos constantemente, los mismos que estuvieron en función del tipo de electrodos utilizados, siendo el orden de producción el siguiente: TiO_2 mayor que DSA y este mayor que el de grafito.
5. Bajo una densidad de corriente fija, una conductividad de las aguas residuales flexográficas, resultó inferior cuando la tensión de corriente eléctrica es alta, que posteriormente aumenta la eliminación del TOC y croma.
6. El proceso electrocatalítico podría eliminar eficazmente el TOC y croma de las aguas residuales de impresión. empleando una densidad de corriente de $50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ y un par de electrodos (IRO_2 + acero inoxidable) las eficiencias de eliminación del TOC y croma alcanzaron 71,0% y 53,0% respectivamente, después da 60 minutos de tratamiento.
7. Respecto al proceso de oxidación avanzada, H_2O_2 / UV resulta mucho mas eficiente logrando el porcentaje de reducción de color que supera un 90%, el cual estrá en función del tiempo y variando la cantidad del peróxido de hidrógeno.

RECOMENDACIONES

1. Para el caso específico de las aguas residuales que contengan tintas flexográficas, no es posible remover los contaminantes empleando un solo tratamiento, en tal sentido se recomienda proponer un tren que combine varios de ellos, con la finalidad de remover los contaminantes orgánicos disueltos en dichas aguas residuales.
2. Estudiar la cinética de la reacción de decoloración y realizar análisis posteriores al tratamiento con el fin de identificar reacciones con peróxido de hidrógeno remanente en las muestras tratadas.
3. En el caso del POA, tener sumo cuidado con el uso del de cada uno de los componentes del módulo así como una limpieza adecuada al momento de manipular la celda de cuarzo en los análisis espectrofotométricos, a fin de evitar errores en la medición de absorbancias de las muestras.
4. Implementar una planta piloto de tratamiento de aguas residuales industriales en las instalaciones del LOPU-FIQ-UNAC a fin poder brindar a futuro la solución a cada una de las empresas que generen dichos efluentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, J. & McCabe, R. (2006). *Chapter 10.2 Clay Minerals as Catalysts, in Developments in Clay Science, B.K.G.T. Faïza Bergaya and L. Gerhard.* Elsevier.
- Arslan, I. (2001). Treatability of a simulated disperse dye-bath by ferrous iron coagulation, ozonation and ferrous iron-catalyzed ozonation. *Journal of Hazardous Materials*, 229-24. doi:10.1016/S0304-3894(01)00232-1
- Barrios, L., Gaviria, L., Agudelo, E., & Cardona, S. (June de 2015). Technologies for the removal of dyes and pigments present in wastewater. A review. *DYNA*, 82(191), 118-126. doi:: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924>
- Bermeo, M., & Tinoco, O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Industrial Data*, 19(2). doi:<https://doi.org/10.15381/idata.v19i2.12844>
- Brañez, M., Gutiérrez, R., & Pérez, R. (Julio-diciembre de 2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Campus*, 23(26), 129-144. <https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/rc/article/view/1369/1519>
- Castro, I., & Duran, E. (2013). *Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada.* Costa Rica.
- Chaundhry, F., & Malik, M. (2017). Factors Affecting Water Pollution: A Review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 7(1), 1-3. doi:10.4172/2157-7625.1000225
- Churada, L. (2017). *Degradación del colorante azoico textil naranja II por el método de fotocátalisis heterogénea.* Arequipa, Perú.: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5785/IQchsalm.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cifuentes, M., Durand, G., & Sepúlveda, C. (1999). Degradación fotoquímica de tintas flexográficas con radiación UV/H₂O₂. *Revista Ciencia abierta*, 7.
- Cortazar, A., Coronel, C., & Escalante, A. (2021). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Fischer, B. (1979). Styles in teaching & learning. *Educational Leadership*(36), 245-254.
- Garcés, L., Mejía, E., & Santamaría, J. (2019). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 83-93.
- Gil, E. (2002). Fotocatalisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos. *Revista Universidad de EAFIT*, 59-64.
- Gómez, G. (28 de Abril de 2008). *Delito ambiental y amenazas en Romang*. https://www.ecoportel.net/temas-especiales/contaminacion/delito_ambiental_y_amenazas_en_romang/
- Gómez, L. (2000). *Fotooxidación de vertidos químicos: Revisión y experiencias de procesos de oxidación avanzada*. Madrid.
- Guillén, M. (Oct-dic. de 2020). Tratamiento fisicoquímico de los efluentes del proceso de lavado de lana en una industria textil de Arequipa. *Rev. Soc. Quím. Perú*, 86(4). doi:<http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v86i4.312>
- Hincapié, M., & Sepúlveda, J. (2002). La fotocatalisis en el tratamiento de aguas contaminadas. *Revista Ingeniería*, 89-91.
- International Agency for Research on Cancer. (2010). *Cancer, I.A.f.R.o. General Introduction to the chemistry of dyes*. <https://publications.iarc.fr/117>
- Kassimi, A., Boutouil, A., & El Himri, M. (July de 2020). Selective and competitive removal of three basic dyes from single, binary and ternary systems in aqueous solutions: A combined experimental and theoretical

- study. *Journal of Saudi Chemical Society*, 27(7), 527-544.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610320300673>
- Kaykhali, M., Sasani, M., & Marghzari, S. (2018). Removal of Dyes from the Environment by Adsorption Process. *Chemical and Materials Engineering*, 6(2), 31-35. doi:DOI: 10.13189/cme.2018.060201
- López, C. (2017). *Especificaciones de calidad en impresión, encuadernación y acabados*. Málaga: IC Editorial.
- López, M., Castellanos, O., & Lango, F. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87.
<https://www.redalyc.org/journal/5722/572268461005/html/>
- López, V., & Crespi, M. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*. España.
- Lozano, G. (2013). *Remoción de un colorante de los efluentes de la industria textil mediante adsorción de una zeolita natural*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Malato, S. (2001). *Descontaminación de aguas de lavado de envases de plaguicidas mediante fotocatalisis solar*. Ciernat.
- Marin, J. (2002). *Fotodegradación sensibilizada con TiO₂ y Fe³⁺ de los pesticidas malation y metomil en aguas*. Universidad de Antioquia.
- Márquez, H., & Tiscareño, F. (1999). La foto-oxidación en el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Química*, 31(358), 101-107.
- Mauricio, C. (2017). *Propuesta de recuperación de solventes provenientes de desechos de tintas flexográficas, con miras a la certificación ambiental ecuatoriana*. Ecuador: (Tesis de maestría). Universidad de Guayaquil.
http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/16577/1/TESIS%20MGA%20053_%20Propuesta%20de%20recuperaci%C3%B3n%20de%20solventes%20provenientes%20de%20desechos%20de%20tintas%20flexogr%C3%A1ficas.pdf

- Momenzadeh, H., Tehrani, A., & Khosravi, A. (2011). Reactive dye removal from wastewater using a chitosan nanodispersion. *Desalination*, 225-230. doi:DOI: 10.1016/j.desal.2010.12.036
- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Obtenido de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Queralt, M., & Gimenez, J. (1995). Fotocatálisis y tratamiento de aguas contaminadas. *Tecnología del Agua*, 29-35.
- Sánchez, J. (2006). *Diagnóstico de la gestión empresarial: la industria gráfica y su efecto tributario en el período 1999-2004*. Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador. <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/2321>
- Sharma, Y., Singh, B., & Korstad, J. (2011). Latest developments on application of heterogenous basic catalysts for an efficient and eco friendly synthesis of biodiesel. *A review. Fuel*, 90(4), 1309-1324.
- Soldevilla, C. (2008). *Fundamentos teorico-practicos de quimica organica*. Brujas.
- Torres, G. (2014). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros*. Las Palmas de Gran Canaria: (Tesis doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- UNESCO. (2017). *Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr>
- Vallet, A. (2013). *Síntesis y caracterización de catalizadores para la oxidación húmeda catalítica de colorantes y aguas residuales*. Universidad Complutense. Obtenido de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/21676/>

ANEXOS

9

Anexo 1. Matriz de consistencia “GRADO DE REMOCIÓN DE COLORANTES EN LOS EFLUENTES FLEJO GRÁFICOS, EMPLEANDO UN MÉTODO COMBINADO ELECTRO CATALÍSIS - OXIDACIÓN AVANZADA”.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿Será factible degradar la concentración de colorantes en los efluentes flexo gráficos empleando el método combinado de electro catálisis-oxidación avanzada?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>a. ¿Qué parámetros nos permitirán caracterizar las aguas coloreadas de impresión gráfica</p> <p>b. ¿Cuáles serán las variables que nos permitirán controlar el grado de remoción de colorantes en estas aguas flexo gráficas?</p> <p>c. ¿Cómo será el sistema experimental electro catalítico a emplear en el tratamiento de las aguas residuales flexo gráficas?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>. Lograr la degradación de la concentración de los colorantes en los efluentes flexo gráficos empleando el método combinado de electro catálisis y oxidación avanzada.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>a. Caracterizar fisicoquímicamente las aguas crudas coloreadas de impresión gráfica, a ser procesadas</p> <p>b. Identificar a las variables que nos permitirán controlar el grado de remoción de colorantes en estas aguas flexo gráficas.</p> <p>c. Diseñar el sistema experimental electro catalítico a emplear en el tratamiento de las aguas residuales flexo gráficas.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>Un sistema combinado de electro catálisis-oxidación avanzada permite la remoción de colorantes en las aguas residuales de la industria gráfica, en un porcentaje superior al 90%.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:</p> <p>a. Las características físico-químicas del agua residual de impresión a evaluar antes del tratamiento serán: el color, la alcalinidad, la turbidez, pH y sólidos disueltos totales.</p> <p>b. El control de la densidad de corriente, el pH y el tiempo influirán significativamente en la degradación de los contaminantes en las aguas residuales flexo gráficas.</p>	<p>Variable dependiente</p> <p>Y: Grado de remoción de colorantes en efluentes flexo gráficos</p> <p>Variable independiente</p> <p>X₁ = Concentración de radicales hidroxilos.</p> <p>X₂ = Tiempo de remoción y cantidad de densidad de corriente.</p>	<p>Ph</p> <p>Tiempo</p> <p>Intensidad de corriente.</p> <p>Concentración.</p> <p>pH</p> <p>Concentración</p> <p>Horas dm²</p>	<p>Esacala</p> <p>Días</p> <p>ppm</p> <p>rpm</p> <p>Concentración.</p> <p>Tiempo</p>	<p>Electocatálisis POA.</p> <p>Experimental</p>

Anexo2.

Base de datos



Data (1).xlsx



