



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE
FOTOCATÁLISIS CON DIÓXIDO DE TITANIO.

Autora

Nicole Rachel Pérez Cevallos

Año
2018



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE INDUSTRIA TEXTIL
MEDIANTE FOTOCATÁLISIS CON DIÓXIDO DE TITANIO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía

M.Sc. Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Autor

Nicole Rachel Pérez Cevallos

Año

2018

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, (**Tratamiento De Aguas Residuales De Industria Textil Mediante Fotocatálisis Con Dióxido De Titanio**), a través de reuniones periódicas con el estudiante (**Nicole Rachel Pérez Cevallos**), en el semestre (**2018-1**), orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Daniel Hernán Hidalgo Villalba
Magister en Ciencias Especialización Ingeniería Ambiental
C.I.: 180191444-9

DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, (**Tratamiento De Aguas Residuales De Industria Textil Mediante Fotocatálisis Con Dióxido De Titanio**), del (**Nicole Rachel Pérez Cevallos**), en el semestre (**2018-1**), dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Viviana Pavlova Sigcha Terán
Máster Universitario en Gestión Integral del Agua
C.I.: 172221616-3

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Nicole Rachel Pérez Cevallos

C.I.: 171290939-7

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios por siempre guiarme por buen camino. Mis más sinceros agradecimientos a mis padres, Asher y Liz por estar conmigo, por enseñarme a crecer y a que si caigo debo levantarme, por apoyarme y guiarme, por ser las bases que me ayudaron a llegar hasta aquí. Papi, gracias por siempre verme como tu mayor orgullo. Mami, no hay palabras para expresar lo agradecida que estoy, si estoy graduada es gracias a ti. Al Msc. Daniel Hidalgo por su dedicación y motivación durante todo este proceso. Al Ing. Tomas Villón por su gran apoyo y comprensión. A mis amigos Dary, Rita, Nicky y a mi novio Esteban que han demostrado su cariño apoyándome y aconsejándome para poder llegar a cumplir una meta más; y vamos por más.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hermano llán, gracias por ser el mejor hermano del mundo. – I, si algo aprendí de esta experiencia es que tus sueños no tienen fecha de caducidad; así que recuerda que, si algo sale mal, respira hondo y vuelve a intentarlo. A mis padres, este trabajo nos sacó canas verdes a todos, pero al fin lo logré; los amo mucho y disculpen la tardanza. A mi abuelita que siempre ha sabido sacarme una sonrisa con sus ocurrencias. A Delita que me ha visto crecer y está siempre orgullosa de mí. Y, a Esteban porque la vida nos unió en momentos similares; al fin logré mi meta, ahora vamos por la tuya. Ahora me llevo la enseñanza de que los errores son grandes oportunidades para empezar de nuevo, sólo que con más inteligencia y experiencia. A todos ustedes por su amor y apoyo incondicional, esto es para ustedes.

RESUMEN

El propósito fundamental de la actual investigación fue realizar un proceso experimental de tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria textil para eliminación de colorantes mediante fotocátalisis con dióxido de titanio; para lo cual se tuvieron en cuenta las características químicas y físicas del agua residual de la industria textil antes del tratamiento, para luego determinar la efectividad de diferentes concentraciones de dióxido de titanio en procesos de tratamientos de las muestras expuestas a diferentes fuentes de radiación mediante el análisis de la incidencia de las variables estudiadas. Para la investigación en cuestión se aplicó el enfoque mixto, siendo el estudio de tipo histórico, descriptivo y experimental, donde se optó por el diseño factorial completo 2^k en función de combinación de las variables: demanda química del oxígeno (DQO), color, turbidez, pH y temperatura; dando como resultado una exitosa remoción de DQO y disminución de color utilizando luz UV, para un volumen de muestra 1000 ml, con un tiempo de residencia de 6 horas, a 150 rpm y con un pH de 3, como condiciones óptimas obtenidas. En la fotocátalisis, el efecto del pH fue determinante para la degradación del color, siendo éste inversamente proporcional a la variable de respuesta, con un valor óptimo de tres; sin embargo, pudo notarse que la temperatura final de la solución no mostró cambio significativo. En general se concluye que, la fotocátalisis heterogénea (TiO_2) es un tratamiento viable para tratar aguas contaminadas provenientes del proceso de tinturación de industrias textiles y con el cual se alcanzan altos porcentajes en la disminución del color y demanda química de oxígeno, lo cual está condicionado en mayor o menor medida tanto por la concentración del catalizador (TiO_2) como la fuente de radiación que se emplee en su tratamiento.

ABSTRACT

The fundamental purpose of the current research was to carry out an experimental process of wastewater treatment from the textile industry for elimination of dyes by photocatalysis with titanium dioxide; for which the chemical and physical characteristics of the wastewater of the textile industry before the treatment were taken into account, to then determine the effectiveness of different concentrations of titanium dioxide in treatment processes of the samples exposed to different sources of radiation by means of the Analysis of the incidence of the variables studied. For the research in question, the mixed approach was applied, being the study of historical, descriptive and experimental type, where the 2k complete factorial design was chosen based on the combination of the variables: chemical oxygen demand (COD), color, turbidity, pH and temperature; resulting in a successful COD removal and color reduction using UV light, for a sample volume of 1000 ml, with a residence time of 6 hours, at 150 rpm and with a pH of 3, as optimum conditions obtained. In the photocatalysis, the effect of the pH was determinant for the degradation of the color, being this one inversely proportional to the response variable, with an optimal value of three; however, it could be noted that the final temperature of the solution did not show significant change. In general, it is concluded that heterogeneous photocatalysis (TiO_2) is a viable treatment to treat contaminated water coming from the dyeing process of textile industries and with which high percentages of color decrease and chemical oxygen demand are reached, which is conditioned to a greater or lesser extent both by the concentration of the catalyst (TiO_2) and the source of radiation used in its treatment.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes	5
1.3 Formulación del problema	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Justificación del proyecto	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Industria textil	8
2.1.1 Colorantes utilizados en la industria textil	9
2.1.1.1 Colorantes naturales	10
2.1.1.2 Colorantes artificiales	11
2.1.2 Aguas Residuales	14
2.1.3 Tratamientos de aguas residuales de la industria textil.....	14
2.1.3.1 Tratamientos físico-químicos.....	15
2.2 Fundamentos de la fotocatalisis	16
2.2.1 Procesos de Oxidación Avanzados (POAs).....	16
2.2.2 Fotocatalisis homogénea.....	17
2.2.3 Fotocatalisis heterogénea	18
2.3 Dióxido de Titanio	21
2.3.1 Estructura electrónica y cristalográfica del TiO_2	21
2.3.2 Estados superficiales del TiO_2	23
2.3.3 Interfase TiO_2 - Electrolito.....	24
2.3.4 Interacción del TiO_2 con la radiación electromagnética	25
3. METODOLOGÍA.....	26
3.1 Tipo de investigación y proceso de muestreo.....	26
3.1.1 Tipo de investigación.....	27
3.1.2 Proceso de muestreo	27
3.1.2.1 Tipo y clase de muestreo	27
3.2 Caracterización de las aguas residuales de industria textil Fibrán	28

3.3	Materiales para la experimentación	28
3.3.1	Materiales, equipos y reactivos	28
3.3.1.1	Materiales	28
3.3.1.2	Equipos	29
3.3.1.3	Reactivos	29
3.4	Diseño de experimentos	29
3.4.1	Selección de variables.....	29
3.4.2	Selección de diseño experimental y sus matrices.....	30
3.5	Diagrama de proceso	31
3.5.1	Procedimiento	31
4.	RESULTADOS.....	33
4.1	Presentación de resultados obtenidos de los tratamientos en estudio.....	33
4.1.1	pH	38
4.1.2	Temperatura.....	40
4.1.3	Color	42
4.1.4	Turbidez	44
4.1.5	DQO.....	46
4.2	Eficiencia de remoción de Color, Turbidez y DQO	48
4.3	Análisis de Resultados.....	51
4.3.1	Impacto de las fuentes de radiación	52
4.3.2	pH	53
4.3.3	Turbidez	54
4.3.4	Color	54
4.3.5	DQO.....	54
4.3.6	Eficiencia de remoción	55
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1	Conclusiones.....	56
5.2	Recomendaciones	57
	REFERENCIAS.....	58
	ANEXOS.....	72

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El acelerado incremento de la población mundial constituye una de las causas más importantes de la disminución de agua potable disponible, esto está dado fundamentalmente por la contaminación de recursos hídricos producto del vertimiento de aguas residuales (Barba, 2002).

En la actualidad la escasez de agua constituye una problemática latente que afecta a todos los países en una u otra medida; donde se presentan cifras alarmantes que hacen que varias organizaciones mundiales presten importante atención al tema e impulsen programas de concientización al respecto. En este sentido se tiene que: “cerca de 1.200 millones de personas, casi una quinta parte de la población mundial vive en áreas de escasez física de agua, mientras que 500 millones se aproximan a esta situación” (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES), 2014).

Uno de los factores causales de la escasez de agua está dado por la contaminación de la misma, en la cual, una de las fuentes principales son los vertimientos residuales derivados de la producción industrial, cuyos desechos pueden ser de tipo ácidos, álcalis, tóxicos, así como aquellos que, dadas sus características, pueden ser: aceites, grasas, colorantes, pesticidas o productos radiactivos; que pueden disolverse en el agua o quedar suspendidos en la superficie, donde en cualquiera de los dos casos, la acumulación tiene un efecto multiplicador que afecta a los organismos que allí viven, principalmente a los filtradores, haciendo que dichos contaminantes permanezcan en el agua por largos periodos de tiempo, lo que limita no solo el aprovechamiento de la fuente para el consumo doméstico, sino que además constituye un peligro que atenta contra la fauna, la flora y el hombre (Oña, 2013).

En este sentido, la industria textil ocupa uno de los primeros lugares como fuente de generación de contaminantes de agua debido a que en sus procesos productivos se generan grandes cantidades de aguas residuales altamente coloreadas y constituidas por compuestos difícilmente biodegradables (Amjad & Qayyum, 2007), ocasionando no solo la reducción de la transparencia sino también la disminución del oxígeno disuelto, lo que dificulta la función fotosintética de las plantas. Además, los efluentes generados por esta industria no solo suelen presentar altas temperaturas, sino que tiene características alcalinas y de una fuerte coloración, dado por compuestos xenobióticos no biodegradables (Kaushik & Malik, 2009), asimismo pueden presentar altas concentraciones de metales pesados, o contener pesticidas y contaminantes microbiológicos, entre otros patógenos (World Bank Group, 2011).

La industria textil por responsabilidad social y cumplimiento de la legislación ambiental tiene el requerimiento de eliminar los desechos del proceso productivo pero los sobrecostos de esta eliminación no han permitido en muchos casos que cumpla con esta obligación (Hernández & et al, 2010); tales hechos constituyen un estímulo para estudiar y adecuar nuevas tecnologías que posibiliten la protección del recurso hídrico a menores costos, de manera que se convierta en una inversión y un punto a favor para la competitividad de la empresa.

El sector textil en el Ecuador representa uno de los mayores generadores de empleo cerca de 300 empresas en el encadenamiento textil-confección que representan a más de 140 mil empleos directos (Asociación de Industrias Textiles del Ecuador (AITE), 2010). Las provincias con mayor número de establecimientos del sector textil son Pichincha (27%), Guayas (17%), Tungurahua (8,1%), Azuay (7,5%) e Imbabura (4,5%) (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2012); el problema radica en que más del 80% de las empresas del país no invierten en protección ambiental ni cuentan con un estudio de impacto ambiental (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC),

2006), por lo que se generan grandes descargas de desechos, que van directo a la red pública de alcantarillado y luego a los ríos sin ningún tipo de tratamiento.

Según registros del INEC (2006) la industria textil en Quito generó concentraciones de 310.7 mg/l de DBO y 690.8 mg/l de DQO. A pesar de ser valores menores comparados con años anteriores, siguen superando el límite máximo permisible y no representan a la totalidad de descargas de las industrias textiles que operan en la ciudad (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2006). Varias industrias no cumplen con el valor permisible de descarga de efluentes, debido a la falta de interés en la tenencia de sistemas de tratamiento por la creencia de que estos representarán una pérdida para la empresa (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2012).

Existen diversidad de contaminantes en las aguas residuales procedentes de industrias textiles; por ejemplo, la gran cantidad de colorantes, cuya producción mundial se aproxima a 106 toneladas (Sanroman, Pazos, Ricart, & Cameselle, 2004), sustancias que son usadas principalmente en el teñido, proceso que genera alrededor de 50% del agua residual. En estos efluentes, también se puede encontrar partículas suspendidas, altos valores de pH, materia orgánica e inorgánica susceptible de ser oxidada (DBO y DQO) (Mollah, y otros, 2004).

Entre los métodos de tratamiento de aguas residuales de la industria textilera se encuentran la coagulación química, tratamientos biológicos, oxidación electroquímica, ozonización, adsorción con carbón activado, ultrafiltración, entre otros (Cañizares, Martinez, & Jiménez, 2006). Lastimosamente, gran cantidad de estos métodos llegan a considerarse inadecuados e insuficientes, ya que generan altos costos porque requieren grandes cantidades de reactivos químicos y espacio para el montaje de los equipos de tratamiento, también algunos disminuyen la carga orgánica bajando el DQO y DBO pero no tienen la

misma eficacia en la eliminación del color y toxicidad (Garcés, Mejía, & Santa María, 2004).

Ésta es la razón principal por la cual existe interés en la oxidación fotocatalítica como tratamiento de estos efluentes ya que presenta una ventaja sobre las otras técnicas comúnmente utilizadas. Este método consiste en la destrucción de los contaminantes mediante la radiación violeta y un catalizador, para la formación de radicales hidroxilo, estos radicales oxidaran a los contaminantes presentes en el agua residual (Garcés, Mejía, & Santa María, 2004).

Las avanzadas tecnologías de oxidación y siendo más específicos la fotocatalisis heterogénea, representan nuevas opciones de control ambiental para la eliminación de contaminantes. Existen varios semiconductores como CdS, SnO₂, WO₃, SiO₂, ZrO₂, ZnO, Nb₂O₃, Fe₂O₃, SrTiO₃, pero para este estudio el TiO₂ en forma de anatasa ha atraído un gran interés, debido a su fuerte poder oxidante bajo irradiación UV, su estabilidad química y la ausencia de toxicidad (Maggos et al, 2007; Osburn, 2008; Gurol, 2006). Este proceso tiene la capacidad de transformar las sustancias toxicas en compuestos inocuos y el aporte de energía que se necesita es de 30° a 80° y procede de una fuente limpia como el sol (Garcés, Mejía, & Santa María, 2004).

Teniendo en cuenta los planteamientos anteriores, se considera importante el estudio del tema en cuestión, a modo de beneficiar no solo a las industrias textiles ecuatorianas en función de que estas puedan cumplir con el valor permisible de descarga de efluentes, con un tratamiento que no representa un gran costo para las empresas; sino que además, de probarse la eficiencia, efectividad y viabilidad del procedimiento, se estaría aportando a la recuperación de recursos hídricos esenciales del país.

1.2 Antecedentes

Con relación al tema propuesto, existen varias investigaciones que han manejado el método de tratamiento de aguas residuales en la industria textil, tal es el caso de la realizada por Garcés y Peñuela (2007), titulada "Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar", cuyo principal objetivo fue realizar el tratamiento de aguas residuales de la industria textil de manera experimental mediante un colector solar cilindro parabólico compuesto, dando como resultado una degradación del colorante naranja reactivo 84, a partir de lo cual se seleccionaron las mejores condiciones de degradación y mineralización para aplicar dicho método al agua residual real obteniéndose un AM3 (77,77%) utilizando: 80 mg/L de TiO_2 , 3 mL H_2O_2 /L y un porcentaje de mineralización de 56,29%. En este sentido los autores concluyen que los resultados de la experimentación indicaron buenos porcentajes de disminución del color a 604 nm.

Otra de las investigaciones mencionables es la titulada como "Tratamiento de agua residual proveniente de la industria textil mediante fotocátalisis solar", realizada por Chacón, Leal, Sánchez y Bandala (2002), cuyo propósito principal fue aplicar la energía solar como fuente de radiación en procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de agua residual de la industria textil enfocado específicamente a la remoción de colorante, para lo cual se empleó la fotocátalisis solar, probándose dos diferentes procesos fotocatalíticos: homogéneo y heterogéneo. Los principales resultados de esta investigación indicaron que el proceso homogéneo (foto-Fenton) fue más efectivo que el proceso heterogéneo (TiO_2 /UV) respecto a la eliminación del contaminante; concluyéndose además que, con relación a la influencia de la concentración de catalizador sobre el proceso de fotocátalisis, se comprobó que a mayor concentración de éste mayor es la velocidad de la reacción de degradación.

Por último se puede hacer mención de estudio de "Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar" realizado por los autores Tinoco, Medina y

Zapata (2012), cuyo objetivo general fue probar que la luz ultravioleta solar puede emplearse en el tratamiento de los efluentes textiles, para lo cual los autores realizaron ensayos experimentales que les permitió verificar no solo que “a menores concentraciones del peróxido de oxígeno (agua oxigenada) se logra una mejor pérdida de color del colorante”, sino que además, pudieron comprobar que “a menores concentraciones de dióxido de titanio la respuesta del sistema a la degradación del color es mejor”; lo que se explicó bajo el principio de que “a menores concentraciones de dióxido de titanio, la formación del radical hidroxilo es menor”, aumentando así su eficiencia en el proceso. En sentido general los autores concluyeron a partir del análisis experimental que el tiempo óptimo de degradación del color bajo el método aplicado fue de 2 horas, para una concentración de dióxido de titanio 50 ppm (Tinoco, Medina, & Zapata, 2012, pág. 9).

1.3 Formulación del problema

La industria textil es una de las fuentes principales de contaminación del agua, dando lugar a la limitación del recurso hídrico y contribuyendo a la escasez del mismo, por lo que es necesario aplicar estrategias de tratamiento de aguas residuales de manera que estas sean eficientes y viables, donde el método de fotocátalisis con TiO_2 podría ser una alternativa de solución en base a la degradación de colorantes como contaminante fundamental.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar un proceso experimental de tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria textil para eliminación de colorantes mediante fotocátalisis con dióxido de titanio.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir las características químicas y físicas del agua residual de la industria textil antes del tratamiento de fotocátalisis con dióxido de titanio.
- Determinar la efectividad de diferentes concentraciones de dióxido de titanio en procesos de tratamientos de aguas residuales con fotocátalisis a escala de laboratorio, variando fuente de radiación.
- Analizar la incidencia de las variables estudiadas, en la eliminación de los residuos colorantes de aguas residuales de la industria textil.

1.5 Justificación del proyecto

En general, los tratamientos de aguas residuales de la industria textil de la ciudad de Quito son procesos convencionales que incluyen operaciones físicas, químicas y biológicas que generan buenos resultados. No obstante, se conoce que el 31% de las industrias del Distrito Metropolitano de Quito no cumplen con el valor permisible de descarga de efluentes, debido a los altos costos de los sistemas de tratamiento y por la creencia de que estos representarán una pérdida para la empresa (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2012). La realidad es que varios tratamientos convencionales tienen la mayor cantidad de egresos (costos) en la utilización de gran cantidad de energía y la necesidad de gran espacio para el montaje de los equipos de proceso, por lo que la fotocátalisis ayudaría a la reducción de estos egresos sustancialmente.

Una de las áreas de aplicación de la fotocátalisis y que incluso ha tenido mayor implementación, es el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes, obteniendo eficiencias importantes en la degradación de dichos colorantes (Bellardita, y otros, 2010).

En el contexto nacional, la fotocátalisis es una tecnología que no se ha utilizado, porque existen pocos estudios y la mayoría de ellos a nivel de laboratorio, por lo

cual este estudio puede ser un gran aporte al representar otra alternativa para el sector textil del país.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Industria textil

La industria textil constituye una importante fuente de ingresos y empleo para la mayoría de los países en vías de desarrollo como es el caso de Ecuador, en este contexto específico puede decirse que la actividad textil ha estado presente en el país desde la antigüedad como parte de la cultura Inca, puesto que identificaba el estatus entre sus habitantes (Bujaldon, Buscema, Erio, Nielsen, & Ordoñez, 2014).

Partiendo de los criterios anteriores puede verse la importancia que tiene dicha industria para el desarrollo del país, sin embargo la no consideración de los impactos que acarrea dicha industria, producto del vertimiento continuo de residuales a las fuentes hídricas, constituye una limitante que podría afectar el crecimiento y/o mantenimiento de la producción debido a posibles cierres condicionados por el incumplimiento de las normas ambientales; es por ello que se hace necesario el análisis de los factores contaminantes que genera la industria textil y que influyen negativamente en el entorno; para ello se procede a la descripción de los procesos fundamentales que intervienen en la producción textil y que se muestran a continuación:



Figura 1. Procesos de producción en la Industria Textil

Tomado de (Walters, Santillo, & Johnston, 2005)

Dentro de los procesos que se muestran en la figura anterior, exceptuando el de “preparación de las fibras”, el resto involucra tratamientos químicos; en este sentido y atendiendo al tema de estudio, se presta mayor atención al proceso de “tintura y estampación” debido a que es en esta actividad donde interviene la participación de los colorantes, los cuales constituyen la principal fuente de contaminación y son los que mayor presencia tienen en los afluentes residuales de la industria, lo que a su vez impide la reutilización del agua en el proceso productivo provocando un sobre consumo del recurso de manera constante. A continuación, se muestran las características de dichos colorantes:

2.1.1 Colorantes utilizados en la industria textil

Como bien se ha mencionado, el proceso de tintura y estampación refiere la aplicación de los colorantes a los tejidos, dichos productos están conformados por auxiliares químicos, los que son utilizados de acuerdo con el método y material en proceso de tintado. A continuación, se clasifican los colorantes principales utilizados en la industria textilera:

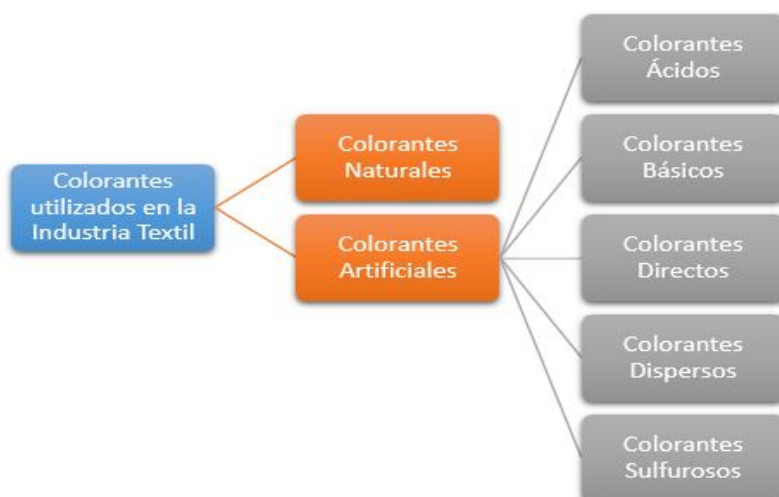


Figura 2. Calificación de colorantes utilizados en la Industria Textil

Tomado de (Sandoval & Mijaylova, 2013)

Teniendo en cuenta el esquema anterior, se procede a la definición y caracterización de cada uno de los colorantes de la siguiente manera:

2.1.1.1 Colorantes naturales

Entre los colorantes naturales que más se utilizan en la industria textil se encuentra el índigo. Esta sustancia proviene de plantas del género indigofera, que lo contienen en forma de glucósido; dando lugar al colorante índigo o añil a través de la hidrólisis de ácidos o por fermentos en glucosa e indoxilo, lo cual se oxida naturalmente al reaccionar con el oxígeno del aire (Sandoval & Mijaylova, 2013).

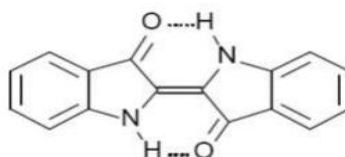


Figura 3. Composición química del índigo

Tomado de (Sandoval & Mijaylova, 2013, pág. 7)

2.1.1.2 Colorantes artificiales

Refiere a los colorantes que se obtienen a partir de aislamientos químicos que se les aplican a sustancias en su estado natural, los cuales encuentran un amplio uso en la industria textil. De acuerdo con las características esenciales que los definen, estos se clasifican en:

2.1.1.2.1 Colorantes ácidos:

Entre las características de estos colorantes, las vinculadas al color están dadas por la calificación de los mismos y por pertenecer al grupo cromóforo aniónico, como se muestra a continuación:

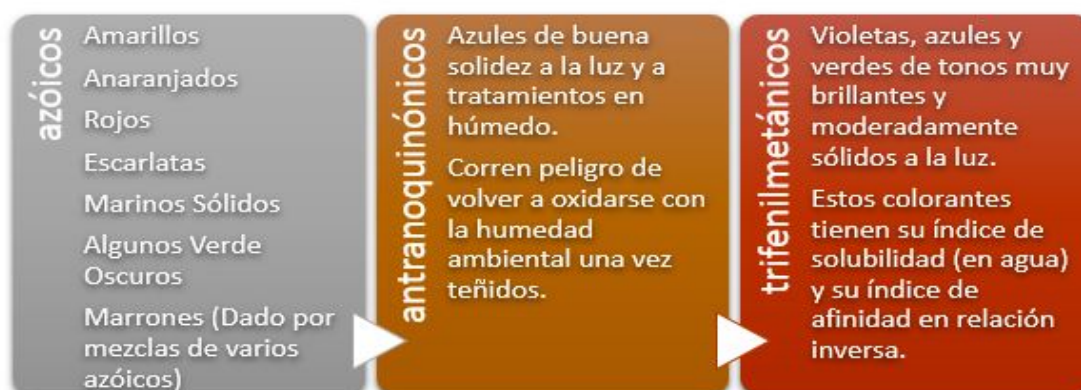


Figura 4. Colorantes ácidos

Tomado de (Sandoval & Mijaylova, 2013, pág. 8)

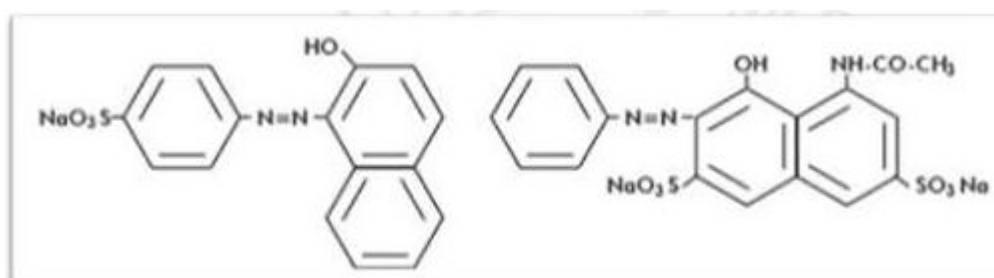


Figura 5. Colorantes azoicos

Tomado de (Sandoval & Mijaylova, 2013, pág. 9)

2.1.1.2.2 Colorantes básicos:

En el proceso de tintado de determinadas fibras aplicando colorantes básicos se utilizan simultáneamente se emplean agentes catiónicos-aniónicos adicionales en forma de “sales de bases orgánicas que fuerzan al grupo cromóforo a unirse al catión, resultando el anión incoloro” (Sandoval & Mijaylova, 2013), dando como resultado otros colorantes básicos que se agrupan de la siguiente manera:

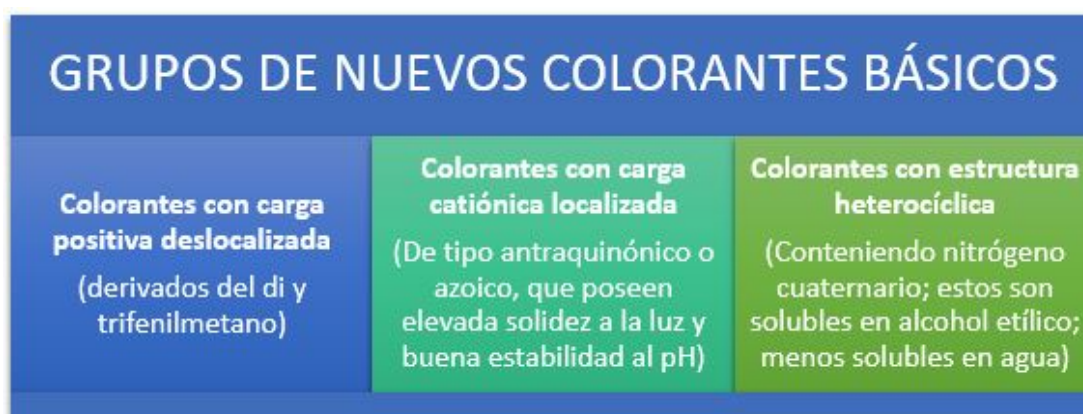


Figura 6. Colorantes básicos

Tomado de: (Sandoval & Mijaylova, 2013, pág. 9)

2.1.1.2.3 Colorantes directos:

Este tipo de colorante se usa fundamentalmente en fibras celulósicas y se caracteriza por contener “moléculas largas más planas que se pueden alinear con las macromoléculas de las fibras. Éstas se fijan por fuerzas (electroestáticas) de Van der Waals y por puentes de hidrógeno.” (Walters, Santillo, & Johnston, 2005, pág. 16).

En el método de aplicación de colorantes directos se utilizan químicos similares a los mencionados en el anterior, tal es el caso del cloruro sódico o sulfato sódico, que ayuda la adherencia de las moléculas del colorante en la tela. Asimismo, se utilizan tanto surfactantes no iónicos para lograr una absorción más eficiente del

colorante, dando mayor durabilidad al color producto de la reducción de la solubilidad en agua; así como agentes de condensación del formaldehído, los que se vuelven poco solubles con el colorante (IPPC, 2003).

2.1.1.2.4 Colorantes dispersos:

Según Sandoval y Mijaylova (2013, pág. 10): “Estos colorantes son compuestos orgánicos no iónicos. Se aplican con un dispersante, porque son insolubles en agua, y se caracterizan fundamentalmente porque tienen un alto grado de dispersión. Se emplean para la tintura de rayón, acetatos y poliésteres.”

En el caso específico del poliéster se utiliza únicamente este tipo de colorante puesto que los que son solubles en agua no se adhieren al tejido debido a su característica hidrófoba, de ahí el empleo de este tipo de colorantes que no presenta grupos polares, sino que con este se genera una interacción electroestáticas que permite que el colorante se adhiera a la fibra (IPPC, 2003).

2.1.1.2.5 Colorantes sulfurosos:

Este tipo de colorantes obtiene su nombre en la clasificación por la presencia del azufre, se basan en agregados que no se disuelven en agua y cuentan con un alto peso molecular lo cual forma reacciones dadas por “compuestos sulfurosos con aminas y ácidos” (Walters, Santillo, & Johnston, 2005, pág. 18), donde este suele ser oxidado con facilidad, contrariamente a como se presenta en los colorantes directos, haciéndoles muy parecidos a los de tina. La absorción de este tipo de colorante está dada por tres características fundamentales de la solución, dígase el porcentaje de colorante, la temperatura y la concentración de sal aplicada para la fijación del color (Sandoval & Mijaylova, 2013).

Son bastantes los colorantes que califican en este grupo, sobre todo porque generan un color intenso pero con matices débiles que los hace ser muy económicos si se comparan con otros tipos de colorantes, pese a ello, el proceso en los que se aplica este tipo de colorantes es altamente perjudicial para el medio ambiente, ya que al momento en que se procesa el colorante a su forma soluble se generan sulfuros e hidrosulfuro sódico a partir de la reacción con el monosulfuro sódico en condiciones alcalinas, convirtiéndole en un contaminante importante del agua (Lacasse & Baumann, 2004).

2.1.2 Aguas Residuales

Las aguas residuales presentan una serie de características, las cuales pueden agruparse esencialmente en: físicas, químicas y biológicas. A continuación, se presentan los aspectos fundamentales que refieren a cada una de las características:

Características Físicas	Características Químicas	Características Biológicas
<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos • Temperatura • Color • Olor • Turbiedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Orgánicos • Inorgánicos y gases • Dureza • pH • Fenoles 	<ul style="list-style-type: none"> • Bacterias • Hongos • Algas • Virus • Crustáceos

Figura 7. Aspectos que caracterizan el agua residual

Tomado de (Cortina & Márquez, 2008)

2.1.3 Tratamientos de aguas residuales de la industria textil

Como bien se ha mencionado con anterioridad, los colorantes son uno de los contaminantes más importantes que se tienen en los afluentes de la industria textil, de ahí que los tratamientos que se aplican a estas aguas residuales se enfoquen fundamentalmente en la remoción del color. En este sentido son

conocidos varios métodos de tratamiento tales como los que involucran procesos biológicos, químicos y físicos. (Cortina & Márquez, 2008) A continuación, se realiza una breve descripción de los procesos químicos más utilizados en el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil:

2.1.3.1 Tratamientos físico-químicos

Existen varios tratamientos físico-químicos pueden llegar a ser muy efectivos, a pesar de ser complejos y de difícil aplicación a gran escala; no obstante, el desarrollo de tecnologías avanzadas de oxidación ha posibilitado el incremento de uso de estos tratamientos, dadas sus aplicaciones en la degradación de colorantes, entre otros (Arroyave, Giraldo, & Mejía, 2008).

En la actualidad, los procesos de oxidación avanzada (POAS), se utilizan para que reaccionen con el contaminante y lo conviertan en productos inocuos al ambiente (Neamtu, Yediler, Siminiceanu, Macoveanu , & Kettrup, 2004); los cuales son capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, debido al elevado poder reductor y alta eficacia en la oxidación de materia orgánica que poseen estos procesos.

Los tratamientos físico-químicos se subdividen en tres tipos, los procesos fotoquímicos y los no fotoquímicos, a continuación, se describen los métodos o procedimientos que se involucran en cada uno de ellos:

Para la descripción de los principales procesos no fotoquímicos como medio de remoción del color en los afluentes, se presenta el Anexo 3 y el Anexo 4 para los principales procesos fotoquímicos.

2.2 Fundamentos de la fotocatálisis

2.2.1 Procesos de Oxidación Avanzados (POAs)

Los *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), como se conoce en inglés, como bien se ha mencionado con anterioridad, están relacionados con los procesos físico-químicos que degradan las moléculas orgánicas a través del rompimiento del enlace estructural de compuestos orgánicos contaminantes, lo cual tiene lugar mediante la reproducción de variedades transitorias gran capacidad oxidante, ejemplo de ello se encuentra el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) (Saber, Rasul, Brown, & Hashib, 2011); el cual, dado su elevado potencial redox se considera con mayor capacidad oxidante que otros compuestos convencionalmente como el ozono o el peróxido de hidrógeno (Saber, Rasul, Martens, Brown, & Hashib, 2010), lo que le permite oxidar casi cualquier especie orgánica obteniéndose como productos finales H_2O , CO_2 e iones inorgánicos (Guillard, y otros, 2003); asimismo, sus altos niveles de reactividad, lo convierte en un radical sumamente inestables, lo que implica su concepción de manera “in situ” mediante diversos procesos (Adán, 2008).

Otra de las características esenciales de los POAs, además de las anteriormente mencionadas, es que no implica altos costos de implementación (Malato, Blanco, Vidal, & Richter, 2002), siempre y cuando los valores de TOC del agua residual a tratar sean inferiores a $< 0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Verlicchi, Aukidi, Galetti, Petrov, & Barceló, 2012), puesto que a mayor concentración mayor demanda de agentes oxidantes y energía. Pese a ello, es importante considerar que el incremento del coste viene dado por el nivel de mineralización deseado, por lo que es recomendable la aplicación de tratamientos integrados a través de la combinación de POAs con procesos biológicos (Ratola, Cincinelli, Alves, & Katsoyia, 2012), asimismo este proceso se ejecuta en dos etapas, en la primera se trata el agua contaminada en un reactor biológico de membrana, y en la segunda etapa, se procede a la eliminación de los patógenos y las moléculas de contaminante orgánico de menor peso molecular mediante fotocatálisis heterogénea (Adán, 2008). A continuación, se muestra la calificación de los

POAs, tanto por métodos fotoquímicos como no fotoquímicos (Adán, y otros, 2007):

No fotoquímicos	Fotoquímicos
<ul style="list-style-type: none"> • Ozonización en medio alcalino [O₃ / OH⁻] • Ozonización con peróxido de hidrógeno [O₃ / H₂O₂] • Ozonización catalítica [O₃ / catalizador] • Procesos Fenton y relacionados [Fe²⁺/H₂O₂] ó [H₂O₂/ Catalizador sólido] • Oxidación electroquímica / electrocatalítica • Radiólisis y tratamiento con haces de electrones • Ultrasonidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Fotólisis con radiación ultravioleta [UV] • Peróxido de hidrógeno con radiación ultravioleta [H₂O₂ / UV] • Ozono y radiación ultravioleta [O₃ / UV] • Peróxido de hidrógeno, ozono y radiación ultravioleta [H₂O₂ / O₃ / UV] • Peróxido de hidrógeno, ozono y radiación ultravioleta [H₂O₂ / O₃ / UV] • Foto-Fenton y relacionados [Fe²⁺ / H₂O₂ / UV] ó [Catalizador / H₂O₂ / UV] • Fotocatálisis heterogénea [Catalizador / O₂ / UV]

Figura 8. Calificación de los POAs

Tomado de (Adán, 2008; Carbajo, 2013)

2.2.2 Fotocatálisis homogénea

Este proceso se basa en la reacción Fenton (1984), a la que se aumenta su eficiencia mediante iluminación, que produce la fotólisis de hidroxocomplejos de Fe⁺³. El Fe⁺² fotogenerado promueve radicales OH• adicionales (Kim & Vogelpohl, 1998). El proceso yace catalítico puesto que el Fe⁺² oxidado a Fe⁺³ en la reacción de Fenton, se somete de nuevo a Fe⁺² por acción de la radiación. Una y otra reacciones forman radicales hidroxilo lo que hace que el proceso Foto-Fenton sea aplicable en la degradación de materia orgánica que contenga cationes metálicos en su estructura (Pey, 2016).

Los procesos Fenton y foto-Fenton, tienen una actividad catalítica máxima a un pH de 2,8 aproximadamente. El pH influye en la concepción de radicales hidroxilo y por ello, en la eficiencia de la oxidación. Para valores del pH por encima de 4, la degradación disminuye drásticamente, aparecen precipitados de hidróxido de

hierro y disminuye la cantidad de Fe^{2+} disponible (Parra, 2001; Faust y Hoigne, 1990).

La velocidad de degradación aumenta con la cantidad de peróxido de hidrógeno, debido a la mayor producción de radicales hidroxilo. Sin embargo, en un nivel determinado de H_2O_2 , la rapidez de la reacción puede afectarse de forma negativa, producto de la auto-descomposición del H_2O_2 , dado por la combinación nuevamente con radicales hidroxilo (Parra, 2000 y 2001).



La concentración de peróxido de hidrógeno óptima depende de la naturaleza y concentración del compuesto a tratar y de la concentración de hierro. Efecto de la cantidad de sal de hierro igual que en el caso del peróxido de hidrógeno, la velocidad de degradación aumenta con la cantidad de sal empleada, pero a partir de una determinada concentración de hierro disminuye la eficiencia de la reacción. Esto puede deberse al aumento de la turbidez de la disolución, que dificulta la absorción de luz necesaria para la realización del proceso foto-Fenton, o a la reacción del Fe^{2+} con radicales hidroxilo; en este sentido son varios los autores han propuesto una relación molar óptima, H_2O_2 /hierro, entre 10 y 25 (Kim & Vogelpohl, 1998; Tang & Huang, 1996).

2.2.3 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatálisis heterogénea, es un buen ejemplo del uso de catalizadores para el tratamiento y degradación de contaminantes (Houas, y otros, 2001). El concepto de fotocatálisis está dado como la reacción catalítica que involucra la absorción de luz mediante un catalizador o sustrato (Hachem, Bocquillon, Zahraa, & Bouchy, 2001), donde tienen lugar la animación inmediata del semiconductor, de forma que éste captive los fotones utilizados en el proceso; y/o la animación de moléculas contaminantes adsorbidas sobre el área del catalizador que al mismo tiempo podrían conferir electrones al catalizador

(Santos, Reis, Almeida, Oliveira, & Vieira, 2003). La primera reacción mencionada no solo es la más habitual, sino que además es la que usualmente se emplea cuando se aborda el término en cuestión.

En los procesos fotocatalíticos los principales catalizadores que se emplean son semiconductores de banda ancha. En este sentido, el TiO_2 no solo es el que presenta mayor actividad fotocatalítica en la mayoría de las reacciones, sino que además es un fotocatalizador estable ante la corrosión, posee alta actividad, baja toxicidad y bajo coste. Sin embargo, su desventaja de uso está dada por su anchura de banda prohibida, que lo sitúa en la zona del espectro electromagnético del ultravioleta cercano, por lo cual solo puede absorber muy poco del espectro solar (Santos, Reis, Almeida, Oliveira, & Vieira, 2003). El proceso fotocatalítico tiene lugar mediante la excitación de un semiconductor, donde se absorbe luz en distintas longitudes de onda tal y como se muestra a continuación:

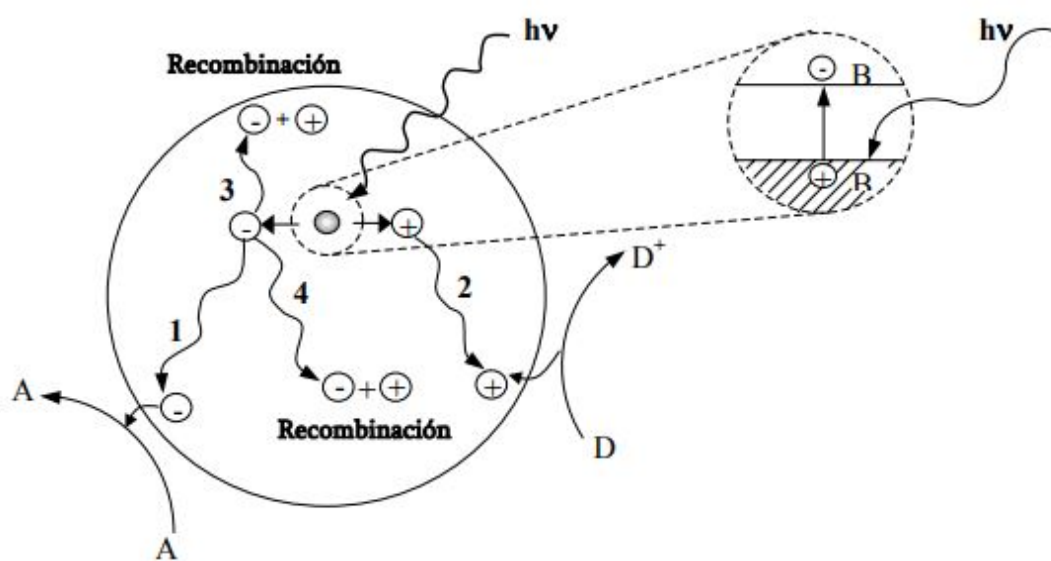


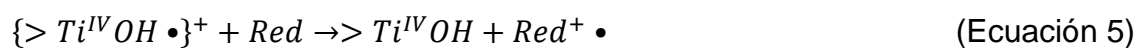
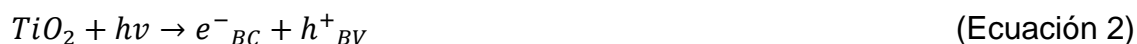
Figura 9. Proceso fotocatalítico

Tomado de (Santos, Reis, Almeida, Oliveira, & Vieira, 2003)

De acuerdo con la figura anterior, el fotocatalizador incide luz suficientemente energética, como para igualar o superar la energía del salto de banda del semiconductor, generándose la excitación de un electrón de la banda de valencia (BV) hacia la banda de conducción (BC), permitiendo crear pares electrón-hueco que serán capaces de migrar a la superficie del catalizador y de este modo reaccionar con las especies adsorbidas.

Los vanos constituidos en la banda de valencia del sólido reaccionan con especies dadoras de electrones; tal es el caso cuando, en presencia de hidroxilos a nivel superficial (formalmente OH⁻), se producen los radicales hidroxilo que generan la degradación de la materia orgánica. Por otra parte, los electrones que llegan a la banda de conducción, la especie aceptora fundamental de electrones y generalmente el oxígeno, puesto que los procesos fotocatalíticos usualmente se desarrollan en ambientes aerobios. Con relación a los procesos de transferencia de carga, estos son comparables con los procesos de recombinación, en los que los pares generados electrón-hueco se recombinan producto de la reacción con las especies de la superficie, dando lugar a la disipación de la energía. Es válido mencionar que la recombinación del par e⁻/h⁺ es perjudicial para la eficiencia del proceso fotocatalítico, puesto que provoca la reducción del número de electrones y huecos que podrían ser transferidos a las especies adsorbidas en la superficie del semiconductor que produce la generación de especies activas en el proceso fotocatalítico. De ahí la eficiencia final de esta reacción depende de varios y diferentes factores que inciden sobre el grado de oxidación total de la materia orgánica.

La recombinación del par electrón-hueco en el seno o en la superficie del semiconductor constituye un proceso crítico, lo cual está dado porque no existe separación física entre los espacios de las reacciones anódicas y catódica.



Otros parámetros importantes relacionados con el grado total de mineralización, que en definitiva determinan la selección de las mejores condiciones de operación son, la masa de catalizador, la concentración inicial de contaminante, el pH del medio, la longitud de onda de la radiación, el flujo de radiación y el tipo de agente oxidante y su concentración.

2.3 Dióxido de Titanio

2.3.1 Estructura electrónica y cristalográfica del TiO₂

El dióxido de titanio TiO₂ presenta un ancho de banda de 3,2 eV, lo que lo hace prácticamente un aislante, pese a ello y por razones termodinámicas, su estructura no resulta eficiente en oxígeno, ya que este último provoca estados localizados cerca de la banda de conducción haciendo del primero un semiconductor (Tuesta & Gutarra, 2004).

Existe abundantes resultados experimentales sobre la estructura de bandas del TiO₂, tales casos se muestran en la figura a continuación, donde puede observarse la distancia entre el máximo valor de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción, y la banda Ud localizada debajo del nivel de Fermi,

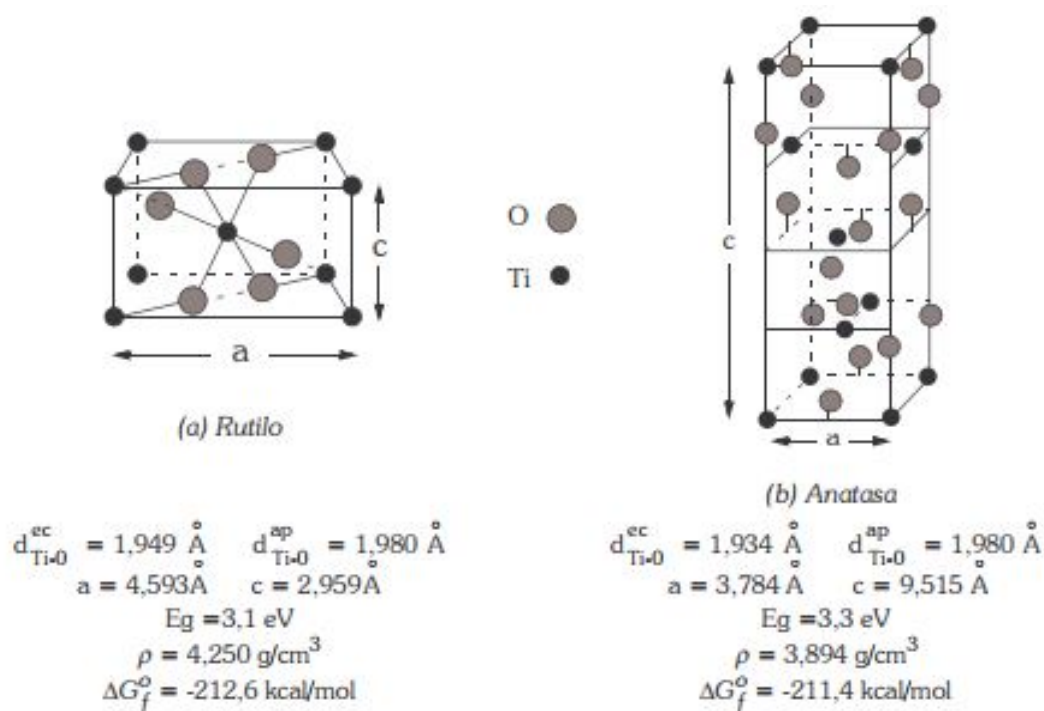


Figura 11. Fases del TiO_2

Tomado de (Tuesta & Gutarra, 2004, pág. 24)

Las estructuras cristalinas de las fases anatasa y rutilo pueden visualizarse alternativamente como cadenas de octaedros TiO_6 compartiendo dos lados para rutilo y cuatro para anatasa, en este ordenamiento espacial se presentan canales entre los octaedros mediante los que podrían difundirse iones en un proceso de intercalación (Tuesta & Gutarra, 2004).

2.3.2 Estados superficiales del TiO_2

Los planos cristalinos expuestos en la superficie del TiO_2 pueden determinar la capacidad reactiva del óxido (actividad catalítica). En este sentido, cuando se tiene el plano (001) de anatasa, la superficie contiene átomos de titanio penta-coordinados y átomos de oxígeno con número de coordinación dos, donde la reactividad química de estos átomos es mayor que la de los internos y puestos en contacto con el agua, forman moléculas hidroxilos (-OH) en un proceso

conocido como hidroxilación lo cual es esencial en el proceso de degradación de contaminantes orgánicos (Tuesta & Gutarra, 2004).

2.3.3 Interfase TiO₂ - Electrolito

Cuando un semiconductor se encuentra en contacto con un electrolito, ocurre un intercambio de carga en la superficie hasta que se igualan los potenciales electroquímicos de ambas fases. La redistribución de carga se detiene cuando se igualan la energía de Fermi E_F del semiconductor y la energía correspondiente al potencial de la cupla redox (C/C-) de la solución electrolítica (Tuesta & Gutarra, 2004).

La forma de cuantificar sería:

$$E_{F(C/C^-)} = -4.5eV + q\varepsilon \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

q : Es la carga del electrón

ε : Es el potencial de Nerst

$$\varepsilon = \varepsilon^\circ + (RT/nF) \ln\left(\frac{[C]}{[C^-]}\right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

- 4,5eV: proviene de utilizar como potencial de referencia el par del electrodo normal de hidrógeno.

A continuación, se muestra la relación entre la energía de bandas de varios semiconductores y el potencial redox de una especie aceptadora cualquiera A/A- y una donadora D/D+. Como referencia se indica al par, que de acuerdo con la ecuación 1 ocupa la posición $\varepsilon = 0$ ($E = -4,5eV$).

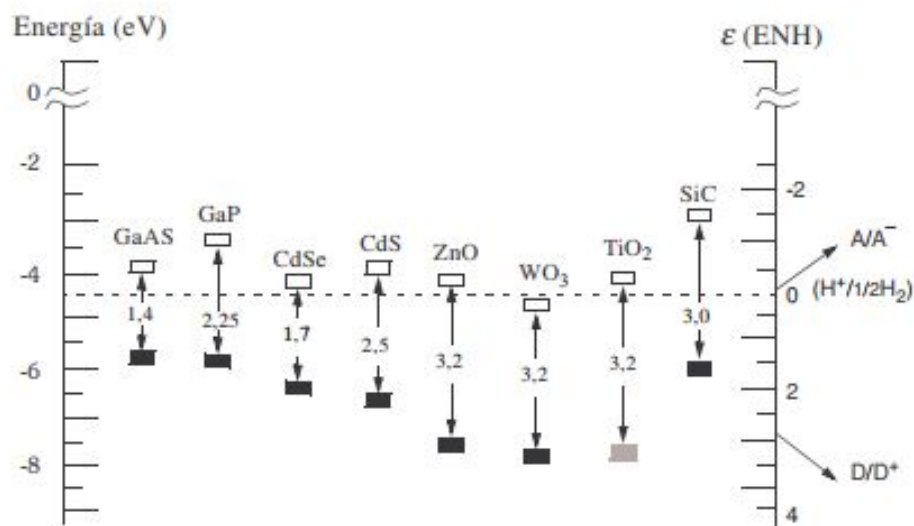


Figura 12. Relación entre la energía de bandas de varios semiconductores y el potencial redox

Tomado de (Tuesta & Gutarra, 2004, pág. 27)

2.3.4 Interacción del TiO₂ con la radiación electromagnética

Si la energía del fotón que incide sobre un semiconductor es mayor que su ancho de banda prohibida ocurre una absorción. Un electrón de la banda de valencia, BV, adquiere suficiente energía para ocupar estados en la banda de conducción, BC (Tuesta & Gutarra, 2004).

El par electrón–hueco (e-h) generado conforma una pseudopartícula (excitón) con un tiempo de vida medio relativamente corto, debido a que pueden ocurrir los siguientes mecanismos (Tuesta & Gutarra, 2004):

- El electrón generado se recombina con algún defecto superficial.
- El electrón se recombina con centros al interior del material (bulk).
- El electrón alcanza la superficie y reduce a la especie A (aceptora).
- El hueco alcanza la superficie y oxida a la especie D (donadora).

Aquellos fotoelectrones que no se recombinan y alcanzan la superficie, tienen la posibilidad de intercambiar carga con especies que se encuentren en la interfase. En este sentido, las trampas producidas por defectos superficiales juegan un papel importante como intermediarios para evitar la recombinación y facilitar el proceso de transferencia. Sin embargo, esta no es la única condición impuesta a los fotoelectrones para producir una reacción química.

3 METODOLOGÍA

Con el propósito de alcanzar los objetivos planteados, se analizó el comportamiento de las variables de la investigación y su efecto con respecto a otros indicadores del proceso.

Además, se llevó a cabo diferentes etapas a escala de laboratorio, las cuales fueron realizadas en el Laboratorio Ingeniería Ambiental de la Universidad de las Américas.

3.1 Tipo de investigación y proceso de muestreo

El proceso experimental de tratamiento de aguas residuales para eliminación de colorantes mediante fotocatalisis con dióxido de titanio (TiO_2) se llevó a cabo en la industria textil FIBRAN CIA. LTDA, que se encuentra ubicada en la parroquia Comité del Pueblo del Cantón Quito.

La empresa confecciones recreativas FIBRAN CÍA. LTDA., realiza actividades de producción de acabados de tejidos, incluyendo tinturación y estampado, a partir de fibra sintética (polyester) y algodón.

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación utilizado fue la combinación entre los métodos histórico, descriptivo y experimental. El histórico se utilizó para indagar y analizar todas las investigaciones relacionadas con el tema, donde se consolida con base teórica los aspectos a tratar. El descriptivo permitió realizar una observación de los fenómenos a partir de la descripción y caracterización del objeto de estudio. En el caso del experimental, posibilitó la planeación, ejecución y análisis de los experimentos para eliminar impurezas del agua residual de la industria textil para ser reutilizada en otros procesos, disminuyendo los costos de la empresa y contaminación medioambiental.

3.1.2 Proceso de muestreo

La muestra fue escogida de un subconjunto de la población. Se dice que una muestra es representativa de la población cuando reúne las características principales de la población en relación con la variable en estudio. (Ludewig, 2000). En este caso la población es el efluente total del proceso de tinturación de la industria textil FIBRAN.

3.1.2.1 Tipo y clase de muestreo

Para realizar la fotocatalisis a las aguas residuales se parte de un muestreo probabilístico aleatorio simple porque los integrantes de la muestra se escogen al azar y, aun así, se puede considerar la probabilidad que tiene cada elemento de la población de ser incluido en la muestra. Es decir, el efluente no varía su composición en la producción de telas que se analiza en la investigación. Se toma una sola muestra que sea representativa y esta se llevó a posterior análisis.

3.2 Caracterización de las aguas residuales de industria textil Fibrán

Para la caracterización de las aguas residuales de la fase de teñido de la curtiembre se realizaron las medidas de: la Demanda Química del Oxígeno (DQO), Color, turbidez, pH y temperatura.

Tabla 1.

Características del agua residual de la industria textil FIBRAN

pH	T°	DQO	Color	Turbidez
6.89	20.9 °C	176 mg/L O ₂	L* = 72.2	38.7 NTU

3.3 Materiales para la experimentación

3.3.1 Materiales, equipos y reactivos

3.3.1.1 Materiales

- Vasos de precipitación
- Soporte Universal
- Pinza para bureta
- Bureta
- Agitador de vidrio
- Espátula
- Matraces Erlenmeyer
- Papel filtro
- Embudos
- Gradilla
- Tubos de ensayo
- Viales para medición de DQO
- Pipeta
- Puntas para pipeta

3.3.1.2 Equipos

- pHmetro
- Balanza analítica
- Fotómetro
- Test de jaras
- Cámara de luz UV
- Espectrofotómetro UV-VIS
- Bloque digestor

3.3.1.3 Reactivos

- Ácido Clorhídrico (HCl)
- Dióxido de Titanio (TiO₂)
- Agua Destilada

3.4 Diseño de experimentos

3.4.1 Selección de variables

Los factores o variables más influyentes para el proceso de fotocátalisis son: longitud de onda (254nm), el tipo de catalizador, la temperatura, el pH, el efecto del oxígeno (Konstantinou, Albanis, 2003; Garcés et. al., 2004).

Por ello, se tomó en cuenta investigaciones sobre ensayos ya realizados con el objetivo de fijar ciertos factores como: pH (3), tiempo de reacción: 6 horas; temperatura: ambiente, para de esta forma obtener un mejor resultado al adaptar el equipo de fotocátalisis y una mejor remoción de carga contaminante.

Las variables seleccionadas para el proceso fueron:

- Tipo de fuente de radiación: Lámpara de luz ultravioleta y luz blanca
- Concentración del catalizador: TiO₂ de 1gr/l y 2 gr/l

3.4.2 Selección de diseño experimental y sus matrices

Al momento de elegir el diseño de experimento se ha optado por el diseño factorial completo 2^k ya que con este diseño se puede medir como influyen k factores en un tratamiento en este caso, la fotocatalisis.

Cada factor en este tipo de diseños posee dos niveles y sus experimentos proponen todas las combinaciones posibles que se puedan dar en cada nivel de un factor con los otros niveles de los otros factores. En la matriz se puede observar 2^k filas ($2 * 2... * 2 = 2^k$ experimentos) y k columnas, indicando los k factores en estudio. Finalmente, la primera columna comienza con el signo negativo (-) y se alternan los signos - y + (Ferré, 2002). Como en el caso de estudio en cuestión se ha optado por la elección de dos factores o variables la matriz del diseño sería 2^2 presentando en la Tabla 2:

- **Variables:** 2 (tipo de fuente de radiación: luz UV-C y blanca, concentración del catalizador: TiO_2 de 1gr/l y 2 gr/l).
- **Niveles:** 2 (-, +)
- **Tratamientos:** 4
- **Réplicas:** 4
- **Muestras:** 16

Tabla 2.

Matriz del diseño factorial completo

Tratamientos	A	B	Resultados
1	-	-	Y_1
2	+	-	Y_2
3	-	+	Y_3
4	+	+	Y_4

Tomado de (Ferré, 2002)

Tabla 3.

Niveles de los factores que interviene en el experimento

Factores	Nivel (-)	Nivel (+)
A: Tipo de fuente de radiación	Luz Blanca (400-700 nm)	Luz UV-C (280-100 nm)
B: Concentración del catalizador (TiO ₂)	1 gr/L	2 gr/L

Adaptado de (Ferré, 2002)

Tabla 4.

Desarrollo del diseño factorial completo

Tratamientos	A	B	Resultados
1	Luz Blanca (400-700 nm)	1 gr/L	Y ₁
2	Luz UV-C (280-100 nm)	1 gr/L	Y ₂
3	Luz Blanca (400-700 nm)	2 gr/L	Y ₃
4	Luz UV-C (280-100 nm)	2 gr/L	Y ₄

Adaptado de (Ferré, 2002)

3.5 Diagrama de proceso

3.5.1 Procedimiento

El procedimiento que se utilizará para llevar a cabo los diferentes tratamientos a escala laboratorio se describe a continuación:

- Colocar 1 L del agua a tratar en vasos de precipitación.
- Medir el pH, el color, turbidez, temperatura, y DQO iniciales de la muestra de agua.
- Ajustar el pH a 3 si es necesario.
- Adicionar las dosis necesarias de Dióxido de Titanio (TiO₂).
- Realizar la medición con el fotómetro.

- Iniciar la prueba de jarras a 150 rpm y por un tiempo de 6 horas según lo estipulado en referencias bibliográficas.
- Una vez terminado el tiempo de reacción, sedimentar por 1 hora.
- Filtrar la muestra.
- Medir el pH, el color, turbidez, temperatura, y DQO finales de la muestra de agua.
- Evaluar la eficiencia del proceso determinando los porcentajes de remoción de color, DQO.

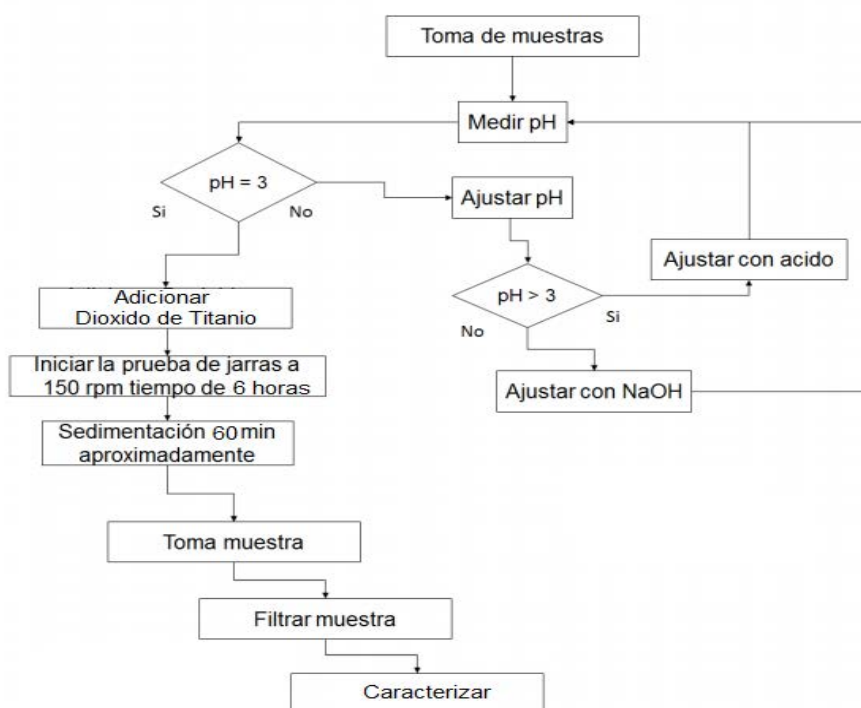


Figura 13. Diagrama de proceso

Tomado de: (American Society of Mechanical Engineers, 2016)

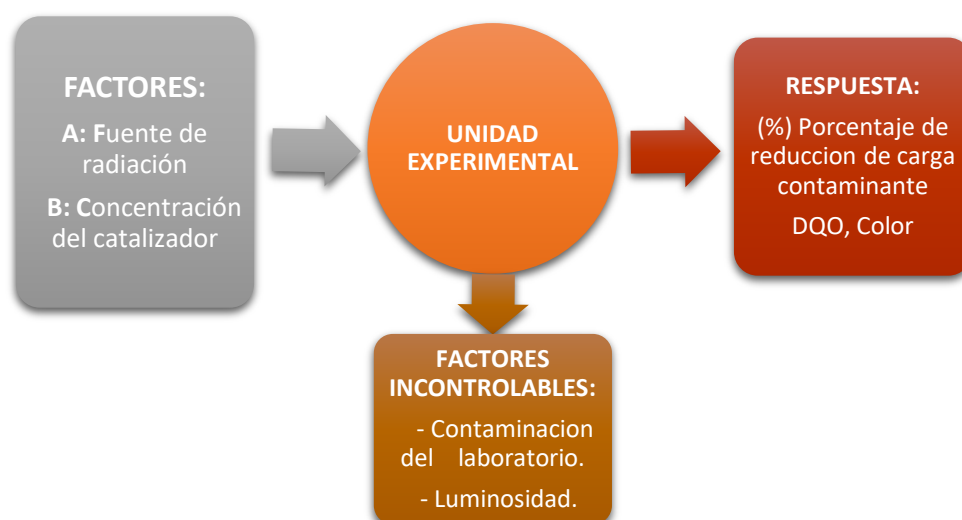


Figura 14. Esquema de experimentación

4 RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados obtenidos de los tratamientos en estudio

Atendiendo al diseño de experimentación planteado, se procede a la exposición y análisis de los resultados obtenidos a partir del manejo de las fuentes de radiación y la concentración del catalizador (TiO_2), aplicados a las muestras de aguas residuales procedentes de la fase de teñido de la empresa textil Fibran.

En la Tabla 5, se muestran los resultados correspondientes a la utilización de la luz UV-C, aplicando concentraciones de TiO_2 de 1gr/l y 2 gr/l, donde se exponen los valores de DQO, color, turbidez, pH y temperatura obtenidos a partir de la disposición de los factores controlados antes mencionados:

Tabla 5.

Tratamiento con luz UV-C y concentraciones de TiO₂ de 1gr/l y 2 gr/l

TRATA MIEN TOS	Fuente de radiación	Concentración de catalizador (gr/l)	Resultados				
			DQO (mgO ₂ /l)	Color (%)	Turbidez (NTU)	pH	T (°C)
1	UV-C	1	37	93,9	6,7	2,88	19,9
2	UV-C	1	41	97,9	0,9	3,02	18,7
3	UV-C	1	53	94,8	16,9	3,72	18,4
4	UV-C	1	28	95,4	15,4	2,95	18,4
5	UV-C	2	23	98,4	7,5	3,00	18,5
6	UV-C	2	26	97,7	1,1	2,95	18,3
7	UV-C	2	21	95,7	1,2	2,98	18,6
8	UV-C	2	20	96,1	26,7	2,98	18,6

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 5, se crea el gráfico a continuación donde se muestra una comparación de los valores promedios resultantes de la variación de la concentración del catalizador en función de denotar las diferencias en las características del agua.

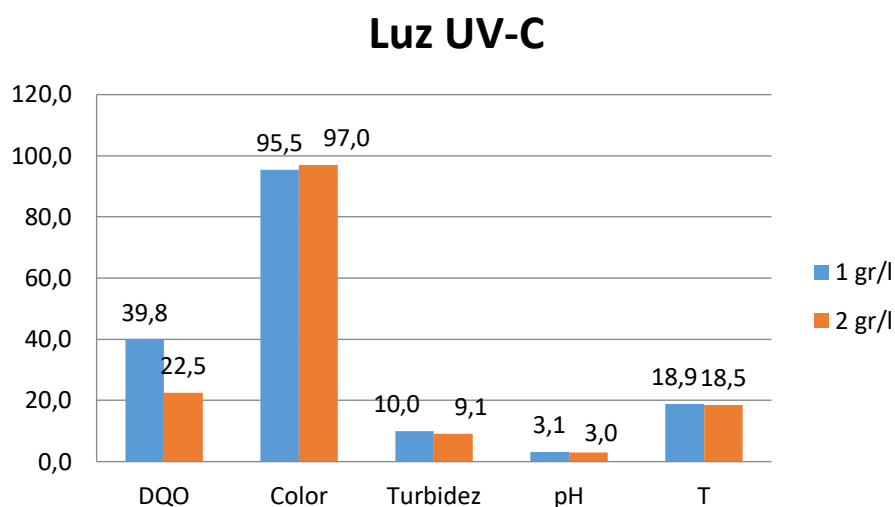


Figura 15. Valores promedios de las características del agua vs variación de la concentración del catalizador

Para poder analizar el impacto que tiene el uso de luz UV-C y la aplicación del TiO_2 en concentraciones de 1 gr/l y 2 gr/l en el agua residual de Fibrán, es necesario realizar una comparación entre los valores normales de la muestra y los valores obtenidos con el tratamiento. Es por ello que en el gráfico a continuación se muestra la variación de las características de agua residual antes y después del tratamiento, cuyo propósito visual es mostrar fundamentalmente el impacto de la fuente de radiación UV-C, por lo cual se utilizaron los valores promedios totales de las concentraciones de TiO_2 empleadas.

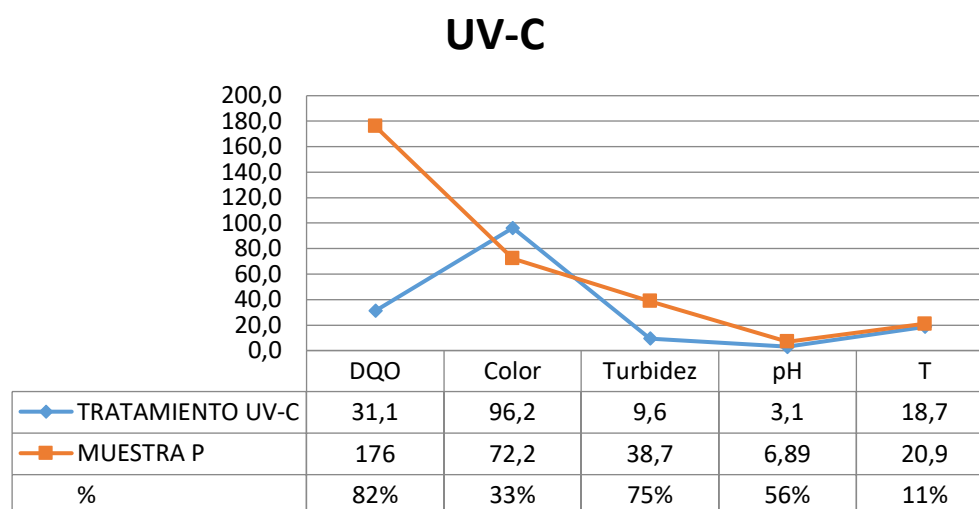


Figura 16. Características del agua residual antes y después del tratamiento con luz UV-C

En la Tabla 6, se muestran los resultados correspondientes a la utilización de la luz blanca, aplicando concentraciones de TiO_2 de 1 gr/l y 2 gr/l, donde se exponen los valores de DQO, color, turbidez, pH y temperatura obtenidos a partir de la disposición de los factores controlados antes mencionados:

Tabla 6.

Tratamiento con luz blanca y concentraciones de TiO₂ de 1gr/l y 2 gr/l

TRATA MIENTOS	Fuente de radiación	Concentración de catalizador (gr/l)	Resultados				
			DQO (mgO ₂ /l)	Color (%)	Turbidez (NTU)	pH	T (°C)
1	BLANCA	1	267	21,1	1200,3	2,97	20,7
2	BLANCA	1	191	19,5	1160,6	2,91	20,7
3	BLANCA	1	231	11,2	1286,9	2,99	20,8
4	BLANCA	1	203	20,7	1179,2	2,97	20,8
5	BLANCA	2	29	82,8	102	3,03	20,8
6	BLANCA	2	23	93,6	30,2	3,03	20,8
7	BLANCA	2	37	92,7	68,3	2,92	20,7
8	BLANCA	2	31	92,4	72	2,99	20,8

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 6, se crea la Figura 17, donde se muestra una comparación de los valores promedios resultantes de la variación de la concentración del catalizador en función de denotar las diferencias en las características del agua.

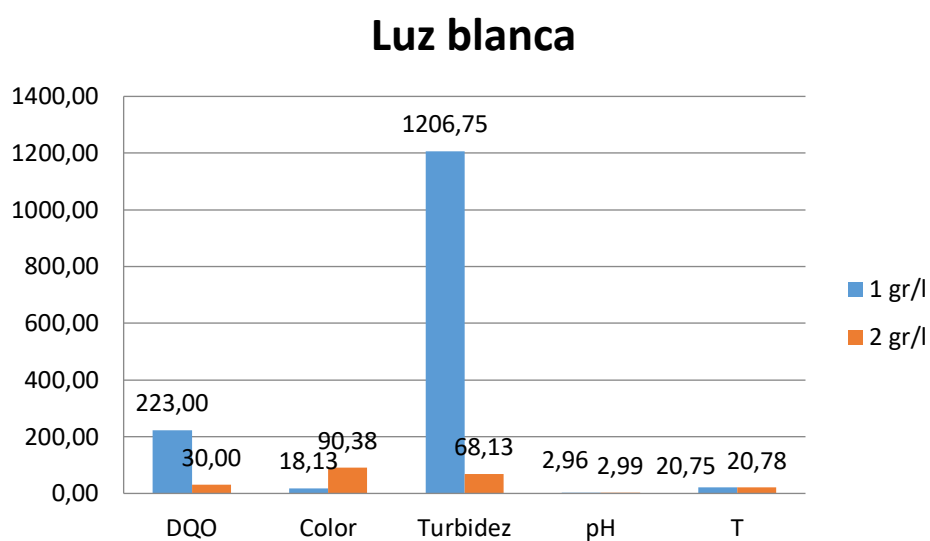


Figura 17. Valores promedios de las características del agua vs variación de la concentración del catalizador

Para poder visualizar la incidencia de la luz blanca y la aplicación del TiO₂ en concentraciones de 1 gr/l y 2 gr/l en el agua residual de Fibran, es necesario realizar una comparación entre los valores normales de la muestra y los valores obtenidos con el tratamiento. Es por ello que en el gráfico a continuación se muestra la variación de las características de agua residual antes y después del tratamiento.

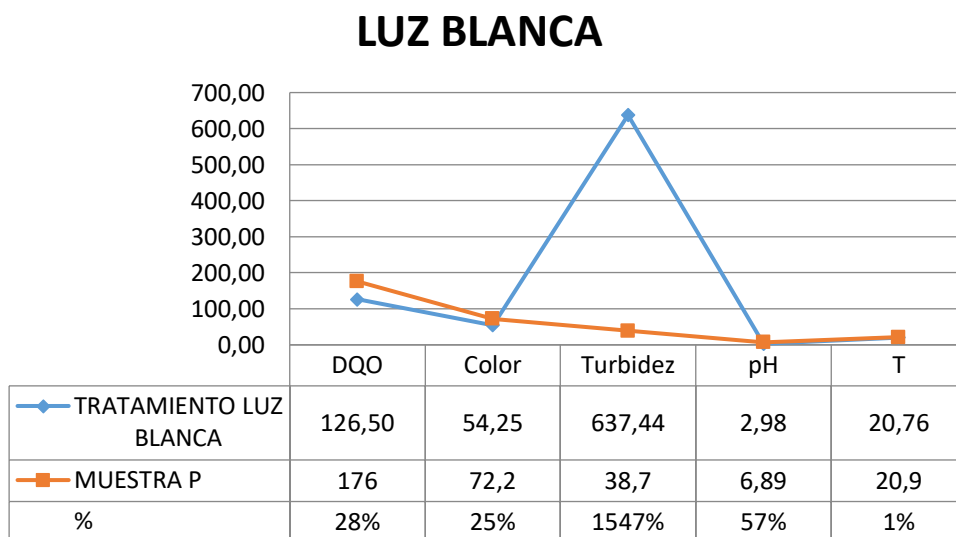


Figura 18. Características del agua residual antes y después del tratamiento con luz blanca

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de manera consolidada respecto a los tratamientos aplicados acordes con el diseño de experimentación y según los factores controlados definidos en el mismo como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7.

Factores controlados por tratamiento

Tratamientos	A	B	Resultados
1	Luz Blanca	1 gr/L	Y ₁
2	Luz UV-C	1 gr/L	Y ₂
3	Luz Blanca	2 g/L	Y ₃
4	Luz UV-C	2 g/L	Y ₄

4.1.1 pH

A continuación, se muestran en la Tabla 8 los resultados correspondientes a la variación de pH de las muestras en las réplicas de tratamiento:

Tabla 8.

Resultados de pH inicial y final según réplica de tratamiento

Tratamientos	Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		Réplica 4		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tratamiento 1	2.93	2.97	2.89	2.91	2.89	2.99	3.02	2.97	2,93	2,96
Tratamiento 2	2.35	2.88	2.91	3.02	3.53	3.72	3.00	2.95	2,95	3,14
Tratamiento 3	2.91	3.03	2.86	3.03	2.88	2.92	2.96	2.99	2,90	2,99
Tratamiento 4	2.97	3.00	2.99	2.95	3.02	2.98	3.02	2.98	3,00	2,98

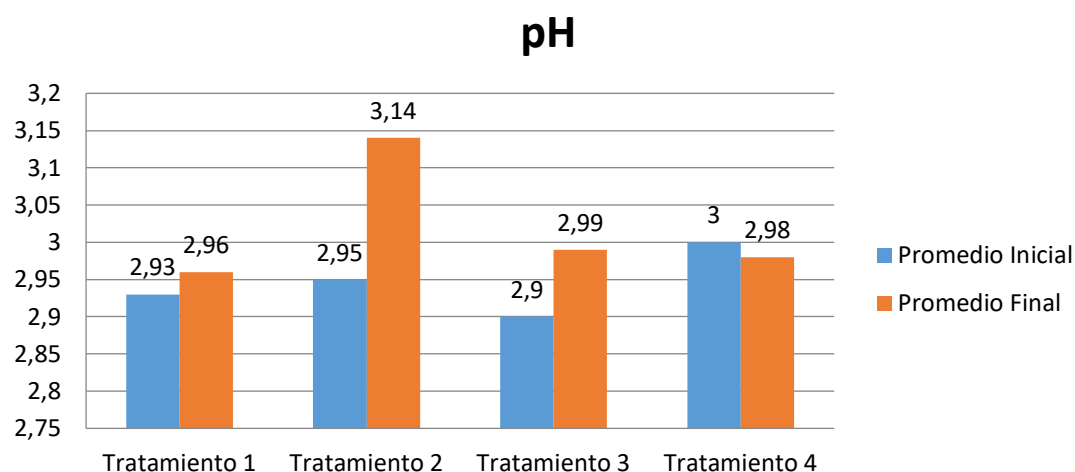


Figura 19. Resultados de pH inicial y final según réplica de tratamiento

Para la validación de las muestras de pH obtenidas por tratamientos aplicados, se utilizó la prueba F de Fisher que se basa en un análisis de varianzas en dos poblaciones (antes y después de aplicados los tratamientos), para lo cual se tuvieron en cuenta los valores promedios en cada caso y un nivel de confianza

del 95%, con un margen de error (normal) de 0.05; cuyos resultados indican que el valor crítico, atendiendo a 3 grados de libertad equivalente a la distribución de filas y columnas de la matriz de datos analizadas, tiene un valor en la Tabla Fisher de 9.27, lo cual es mayor que $F=2.40$; por tanto, los resultados de las muestras no presenta diferencia entre varianzas y puede decirse que son válidas para el análisis (Ver Tabla 9).

Tabla 9.

Prueba F para varianzas (pH)

	Inicial	Final
Media	2,883125	3,018125
Varianza	0,016976563	0,007051562
F	2,407489475	
P(f<=f) una cola	0,244721034	
Valor crítico para f (una cola)	9,276628153	

Adaptado de: Anexo 5

Por otra parte, para determinar si existe asociación entre las variables “tratamientos” y “pH”, se aplicó la Prueba Chi Cuadrado a partir de las frecuencias observadas y esperadas que se generan de los datos obtenidos en la Tabla 8 (promedio); cuyas hipótesis se definieron como:

- H0 (Hipótesis Nula): Los tratamientos aplicados no influyen en el pH resultante.
- HA (Hipótesis Alternativa): Los tratamientos aplicados influyen en el pH resultante.

Donde los resultados mostraron un valor de chi cuadrado para estas dos variables de 0.0232 con 3 grados de libertad (gl), que tiene asociada una probabilidad de significación asintótica (valor de p) de 0.9991, es decir, $(p) > 0,05$ se considera significativa, por lo tanto, se acepta la H0 de independencia y se infiere que estas 2 variables no están asociadas, o lo que es lo mismo, los tratamientos no ejercen influencia significativa en el pH (Ver Tabla 10).

Tabla 10.

Prueba Chi Cuadrado (pH)

	Prueba chi cuadrado	Valor p	Hipótesis aceptada
Resultados	0,0232	0,9991	H0

Adaptado de: Anexo 5

4.1.2 Temperatura

A continuación, se muestran en la Tabla 11 los resultados correspondientes a la variación de temperatura de las muestras en las réplicas de tratamiento:

Tabla 11.

Resultados de temperatura inicial y final según réplica de tratamiento (°C)

Tratamientos	Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		Réplica 4		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tratamiento 1	17.9	20.7	17.8	20.7	17.8	20.8	17.8	20.8	17,8	20,8
Tratamiento 2	19.5	19.9	18.1	18.7	18.2	18.4	18.3	18.4	18,5	18,9
Tratamiento 3	17.8	20.8	17.8	20.8	17.8	20.7	17.8	20.8	17,8	20,8
Tratamiento 4	18.4	18.5	18.7	18.3	18.2	18.6	18.4	18.6	18,4	18,5

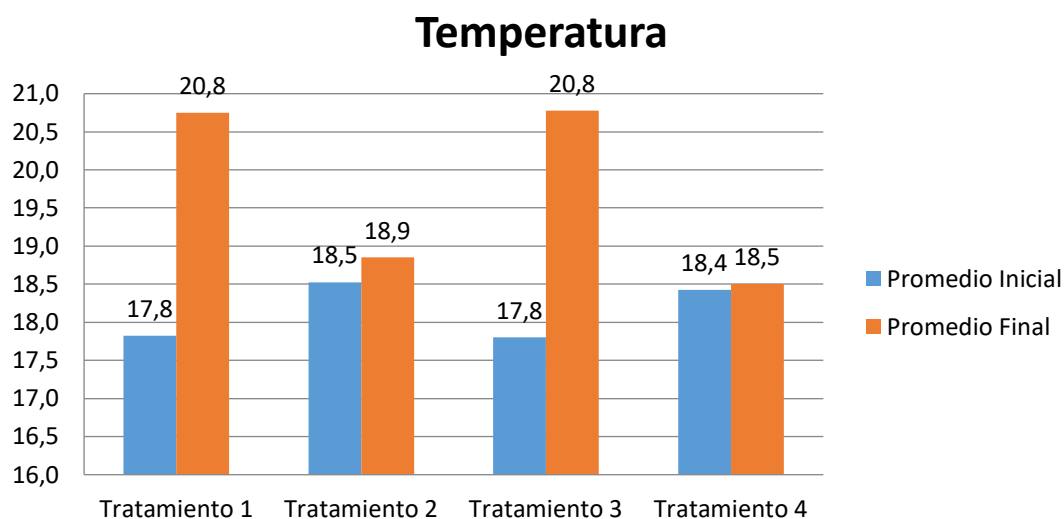


Figura 20. Resultados de temperatura inicial y final según réplica de tratamiento

Para la validación de las muestras de temperatura obtenidas por tratamientos aplicados, la prueba F de Fisher refiere un valor en la Tabla Fisher de 0.1078, lo cual es mayor que $F=0.1005$; por tanto, los resultados de las muestras no presentan diferencia entre varianzas y puede decirse que son válidas para el análisis. (Ver Tabla 12)

Tabla 12.

Prueba F para varianzas (Temperatura)

	Inicial	Final
Media	18,14375	19,71875
Varianza	0,148072917	1,473072917
F	0,100519747	
P(f<=f) una cola	0,045557061	
Valor crítico para f (una cola)	0,107797789	

Adaptado de: Anexo 6

Por otra parte, para determinar si existe asociación entre las variables “tratamientos” y “temperatura”, se aplicó la Prueba Chi Cuadrado a partir de las frecuencias observadas y esperadas que se generan de los datos obtenidos en la Tabla 11 (promedio); cuyas hipótesis se definieron como:

- H0 (Hipótesis Nula): Los tratamientos aplicados no influyen en la temperatura resultante.
- HA (Hipótesis Alternativa): Los tratamientos aplicados influyen en la temperatura resultante.

Donde los resultados mostraron un valor de chi cuadrado para estas dos variables es de 0.1925 con 3 grados de libertad (gl), que tiene asociada una probabilidad de significación asintótica (valor de p) de 0.9788, por tanto, $(p) > 0,05$ se considera significativa, por consiguiente, se acepta la H0 de independencia y se infiere que estas 2 variables no están asociadas, o lo que es lo mismo, los tratamientos no ejercen influencia significativa en la temperatura de las muestras analizadas (Ver Tabla 13).

Tabla 13.

Prueba Chi Cuadrado (Temperatura)

	Prueba chi cuadrado	Valor p	Hipótesis aceptada
Resultados	0,1925	0,9788	H0

Adaptado de: Anexo 6

4.1.3 Color

A continuación, se muestran en la Tabla 14 los resultados correspondientes a la variación de color de las muestras en las réplicas de tratamiento:

Tabla 14.

Color inicial y final según réplica de tratamiento (% de luminosidad)

Tratamientos	Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		Réplica 4		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tratamiento 1	72.2	21.1	72.2	19.5	72.2	11.2	72.2	20.7	72,20	18,13
Tratamiento 2	72.2	93.9	72.2	97.9	72.2	34.8	72.2	95.4	72,20	80,50
Tratamiento 3	72.2	82.8	72.2	93.6	72.2	92.7	72.2	92.4	72,20	90,38
Tratamiento 4	72.2	98.4	72.2	97.7	72.2	95.7	72.2	96.1	72,20	96,98

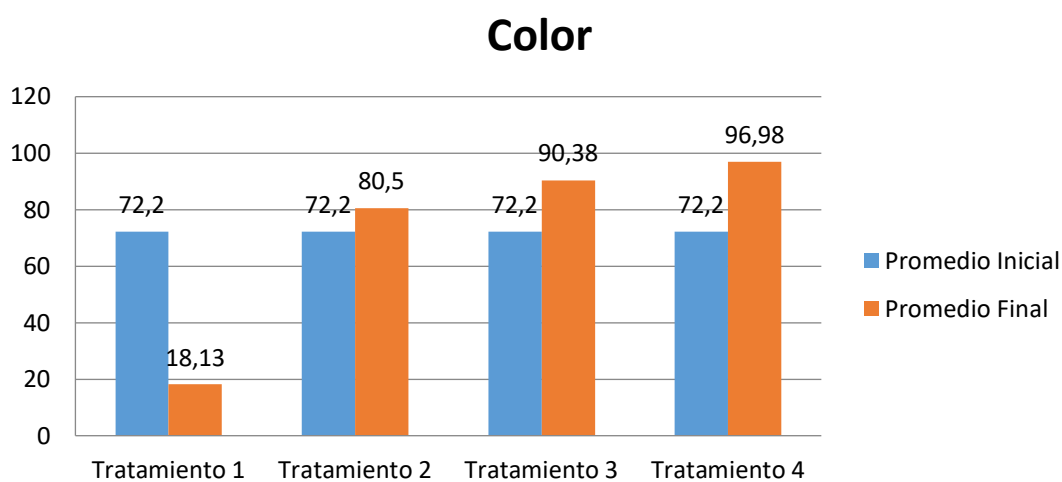


Figura 21. Color inicial y final según réplica de tratamiento

Para la validación de la variable color por tratamientos aplicados, la prueba F de Fisher refiere un valor en la Tabla Fisher de 0.1078, lo cual es mayor que $F=0$; por tanto, los resultados de las muestras no presentan diferencia entre varianzas y puede decirse que son válidas para el análisis. (Ver Tabla 15)

Tabla 15.

Prueba F para varianzas (Color)

	Inicial	Final
Media	72,2	71,4975
Varianza	0	1311,680558
F	0	
P(f<=f) una cola	0	
Valor crítico para f (una cola)	0,107797789	

Adaptado de: Anexo 7

Por otra parte, para determinar si existe asociación entre las variables “tratamientos” y “color”, se aplicó la Prueba Chi Cuadrado a partir de las frecuencias observadas y esperadas que se generan de los datos obtenidos en la Tabla 14 (promedio); cuyas hipótesis se definieron como:

- H0 (Hipótesis Nula): Los tratamientos aplicados no influyen en el color resultante.
- HA (Hipótesis Alternativa): Los tratamientos aplicados influyen en el color resultante.

Donde los resultados mostraron un valor de chi cuadrado para estas dos variables es de 38.4662 con 3 grados de libertad (gl), que tiene asociada una probabilidad de significación asintótica (valor de p) de 0.00, por tanto, $(p) < 0,05$ se considera significativa, por lo tanto, se rechaza la Ho de independencia y se infiere que estas 2 variables están asociadas, o lo que es lo mismo, los tratamientos influyen significativamente en el color de las muestras analizadas (Ver Tabla 16).

Tabla 16.

Prueba Chi Cuadrado (Color)

	Prueba chi cuadrado	Valor p	Hipótesis aceptada
Resultados	38.4662	0,0000	HA

Adaptado de: Anexo 7

4.1.4 Turbidez

A continuación, se muestran en la Tabla 17 los resultados correspondientes a la variación de la turbidez de las muestras en las réplicas de tratamiento:

Tabla 17.

Turbidez inicial y final según réplica de tratamiento (NTU)

Tratamientos	Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		Réplica 4		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tratamiento 1	38.7	1200.3	38.7	1160.6	38.7	1286.9	38.7	1179.2	38,70	1206,75
Tratamiento 2	38.7	6.7	38.7	0.9	38.7	966.9	38.7	15.4	38,70	247,48
Tratamiento 3	38.7	102	38.7	30.2	38.7	68.3	38.7	72	38,70	68,13
Tratamiento 4	38.7	7.5	38.7	1.1	38.7	1.2	38.7	26.7	38,70	9,13

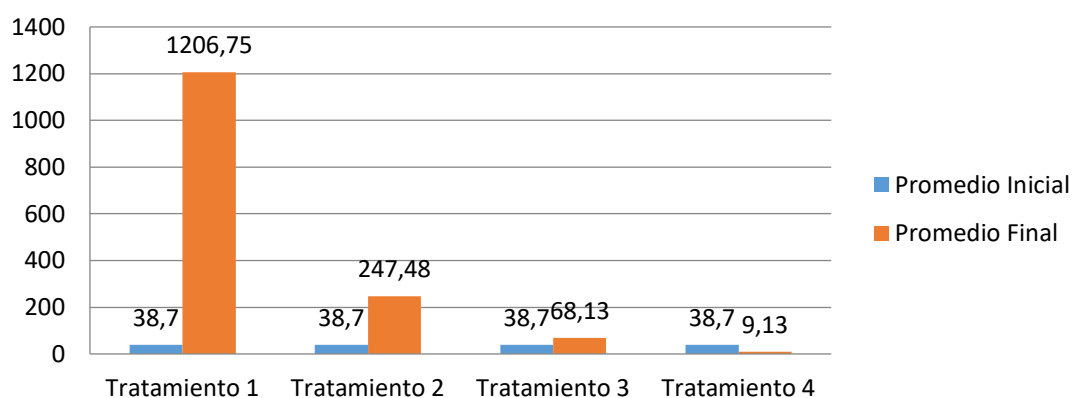
Turbidez

Figura 22. Turbidez inicial y final según réplica de tratamiento

Para la validación de la variable turbidez por tratamientos aplicados, la prueba F de Fisher refiere un valor en la Tabla Fisher de 0.1078, lo cual es mayor que $F=0$; por tanto, los resultados de las muestras no presentan diferencia entre varianzas y puede decirse que son válidas para el análisis. (Ver Tabla 18)

Tabla 18.

Prueba F para varianzas (Turbidez)

	Inicial	Final
Media	38,7	382,8725
Varianza	0	311950,5206
F	0	
P(f<=f) una cola	0	
Valor crítico para f (una cola)	0,107797789	

Adaptado de: Anexo 8

Asimismo, para determinar si existe asociación entre las variables “tratamientos” y “”, se aplicó la Prueba Chi Cuadrado a partir de las frecuencias observadas y esperadas que se generan de los datos obtenidos en la Tabla 17 (promedio); cuyas hipótesis se definieron como:

- H0 (Hipótesis Nula): Los tratamientos aplicados no influyen en la turbidez resultante.
- HA (Hipótesis Alternativa): Los tratamientos aplicados influyen en la turbidez resultante.

Donde los resultados mostraron un valor de chi cuadrado no concluyente, que tiene asociada una probabilidad de significación asintótica (valor de p) de 0.00, por tanto, $(p) < 0,05$ se considera significativa, por consiguiente, se rechaza la H0 de independencia y se infiere que estas 2 variables están asociadas, o lo que es lo mismo, los tratamientos influyen significativamente en la turbidez de las muestras analizadas (Ver Tabla 19).

Tabla 19.

Prueba Chi Cuadrado (Turbidez)

	Prueba chi cuadrado	Valor p	Hipótesis aceptada
Resultados	No concluyente	0,0000	HA

Adaptado de: Anexo 8

4.1.5 DQO

A continuación, se muestran en la Tabla 20 los resultados correspondientes a la variación de DQO de las muestras en las réplicas de tratamiento:

Tabla 20.

DQO inicial y final según réplica de tratamiento (mg O₂/l)

Tratamientos	Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		Réplica 4		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tratamiento 1	176	267	176	191	176	231	176	203	176	223
Tratamiento 2	176	37	176	41	176	153	176	28	176	65
Tratamiento 3	176	29	176	23	176	37	176	31	176	30
Tratamiento 4	176	23	176	26	176	21	176	20	176	23

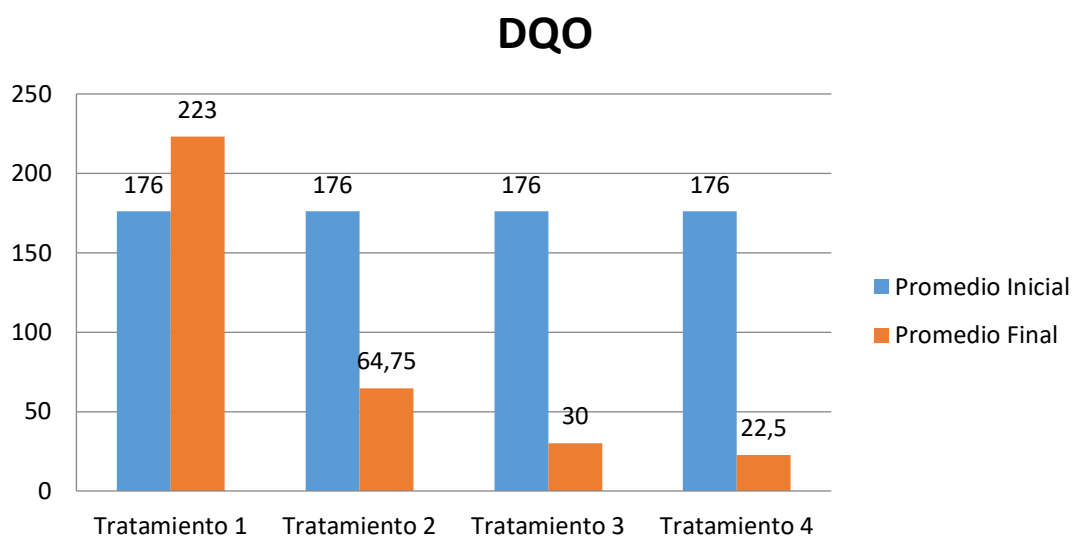


Figura 23. DQO inicial y final según réplica de tratamiento

Para la validación de la variable DQO por tratamientos aplicados, la prueba F de Fisher refiere un valor en la Tabla Fisher de 0.1078, lo cual es mayor que $F=0$; por tanto, los resultados de las muestras no presentan diferencia entre varianzas y puede decirse que son válidas para el análisis. (Ver Tabla 21)

Tabla 21.

Prueba F para varianzas (DQO)

	Inicial	Final
Media	176	85,0625
Varianza	0	8795,098958
F	0	
P(f<=f) una cola	0	
Valor crítico para f (una cola)	0,107797789	

Adaptado de: Anexo 9

Asimismo, para determinar si existe asociación entre las variables “tratamientos” y “”, se aplicó la Prueba Chi Cuadrado a partir de las frecuencias observadas y esperadas que se generan de los datos obtenidos en la Tabla 20 (promedio); cuyas hipótesis se definieron como:

- H0 (Hipótesis Nula): Los tratamientos aplicados no influyen en el DQO resultante.
- HA (Hipótesis Alternativa): Los tratamientos aplicados influyen en el DQO resultante.

Donde los resultados mostraron un valor de chi cuadrado no concluyente, que tiene asociada una probabilidad de significación asintótica (valor de p) de 0.00, por tanto, $(p) < 0,05$ se considera significativa, por consiguiente, se rechaza la Ho de independencia y se infiere que estas 2 variables están asociadas, o lo que es lo mismo, los tratamientos influyen significativamente en la DQO de las muestras analizadas. (Ver Tabla 22)

Tabla 22.

Prueba Chi Cuadrado (DQO)

	Prueba chi cuadrado	Valor p	Hipótesis aceptada
Resultados	No concluyente	0,0000	HA

Adaptado de: Anexo 9

4.2 Eficiencia de remoción de Color, Turbidez y DQO

Se presenta a la eficiencia de remoción de una carga contaminante en este caso color, temperatura y DQO en la siguiente formula:

$$\%Remoción = \frac{(S_0 - S)}{S_0} \times 100 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Tabla 23.

Eficiencia de remoción del color (% de luminosidad)

Tratamientos	Promedio		%Remoción
	Inicial	Final	
Tratamiento 1	72,2	18,13	N/A
Tratamiento 2	72,2	80,5	11,50%
Tratamiento 3	72,2	90,38	25,18%
Tratamiento 4	72,2	96,98	34,32%

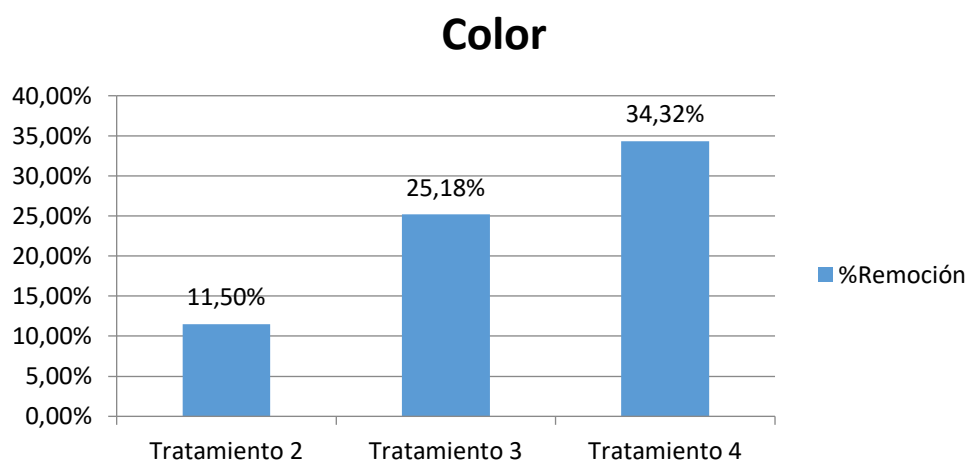


Figura 24. Eficiencia de remoción del color

En el análisis de la eficiencia de los diferentes tratamientos para la remoción de color es necesario comparar los valores iniciales de la muestra y los valores obtenidos posteriormente a los tratamientos. Es por ello que en la Figura 24, se muestran los porcentajes de remoción de color, de cada uno de los tratamientos en base a sus promedios. También se presenta en la Tabla 23, un valor de ineficiencia (N/A) que no se lo representa en la Figura 24, ya que con dicho tratamiento no se obtuvo un resultado favorable.

Tabla 24.

Eficiencia de remoción de la turbidez

Tratamientos	Promedio		%Remoción
	Inicial	Final	
Tratamiento 1	38,7	1206,75	N/A
Tratamiento 2	38,7	247,48	N/A
Tratamiento 3	38,7	68,13	N/A
Tratamiento 4	38,7	9,13	76,41%

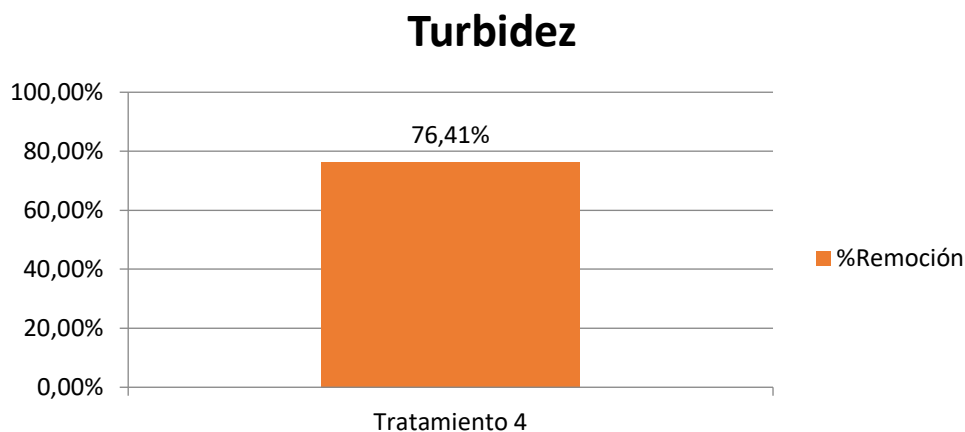


Figura 25. Eficiencia de remoción de la turbidez

Para el análisis de la eficiencia de los tratamientos para la remoción de turbidez es necesario comparar los valores iniciales de la muestra y los valores obtenidos posteriormente a los tratamientos. Por lo tanto, en la Figura 25, se muestran el porcentaje de remoción de turbidez, del único tratamiento con resultados

favorables, en base a sus promedios. También se presenta en la Tabla 24, unos valores de ineficiencia (N/A) que no se los representa en la Figura 25, por sus resultados desfavorables.

Tabla 25.

Eficiencia de remoción de DQO

Tratamientos	Promedio		%Remoción
	Inicial	Final	
Tratamiento 1	176	223	N/A
Tratamiento 2	176	64,75	63,21%
Tratamiento 3	176	30	82,95%
Tratamiento 4	176	22,5	87,22%

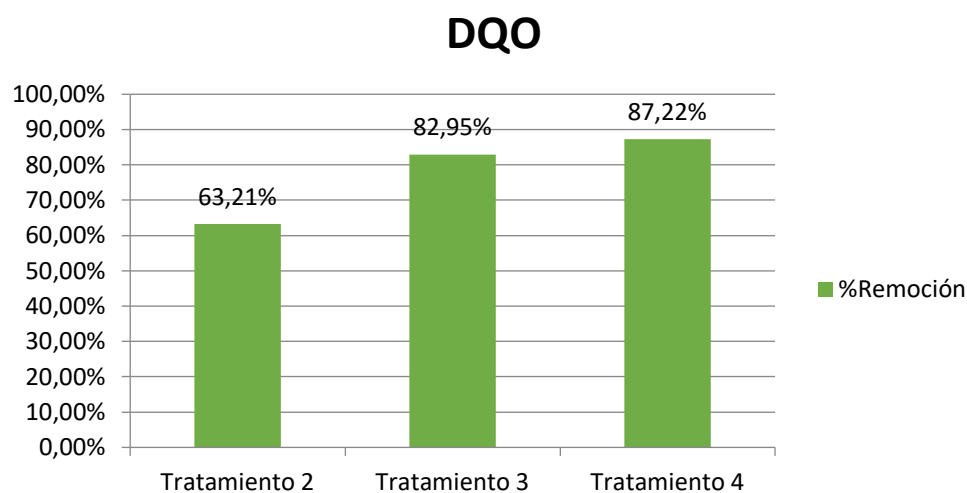


Figura 26. Eficiencia de remoción de DQO

En el análisis de la eficiencia de los diferentes tratamientos para la remoción de DQO es necesario comparar los valores iniciales de la muestra y los valores obtenidos posteriormente a los tratamientos. Por lo tanto, en la Figura 26, se muestran los porcentajes de remoción de DQO, de cada uno de los tratamientos en base a sus promedios. También se presenta en la Tabla 25, un valor de

ineficiencia (N/A) que no se lo representa en la Figura 26, ya que con dicho tratamiento no se obtuvo un resultado favorable.

4.3 Análisis de Resultados

Se realizaron corridas experimentales a escala de laboratorio para evaluar la remoción del DQO, de color y turbidez, al emplear la fotocatalisis. En los ensayos se empleó fuente de radiación de luz UV y luz blanca; y una concentración del catalizador de 1 gr/lit y otra de 2 gr/lit en 4 combinaciones diferentes con el fin evaluar que concentración de catalizador y fuente de radiación son los que favorecen a una mayor remoción de contaminantes.

Mediante la aplicación de procedimientos estadísticos fue posible comprobar los datos registrados en cada uno de los tratamientos aplicados, a fin de confirmar que los resultados en cada una de las variables estudiadas se encontraban en los rangos aceptables como fuente de información fidedigna. En este caso se aplicó la Prueba de Fisher, la cual dio criterios positivos de validación de las variables: pH, temperatura, color, turbidez y DQO.

Asimismo, mediante la Prueba Chi Cuadrado y la comparación de Coeficiente de Pearson (p), fue posible determinar si efectivamente existe asociación entre las variables estudiadas y los tratamientos aplicados, con lo cual se pudo comprobar estadísticamente que las variaciones obtenidas como resultado del experimento no influyeron en pH y la temperatura de las muestras estudiadas, sin embargo, los tratamientos aplicados sí influyeron de forma significativa en el color, la turbidez y el DQO de las muestra, lo que se debe a la dependencia que se demostró que existe entre estos factores.

4.3.1 Impacto de las fuentes de radiación

Dados los resultados obtenidos se puede analizar el impacto que tuvieron las fuentes de radiación utilizadas como factor controlable, en el comportamiento de las variables estudiadas. En este sentido se puede notar en la Figura 16, donde muestra el efecto que produce la luz UV-C mejora los niveles de las variables una vez que se han aplicado los tratamientos a la muestra p, lo que se explica porque el DQO disminuye en un 82%, el color aumenta en luminosidad en un 33%, la turbidez disminuye en un 75%, el pH disminuye en un 56% y la temperatura disminuye en un 11%.

Por otra parte, el impacto de la luz blanca como fuente de radiación también incide en los resultados (Figura 18), pero no todas las variables son afectadas de la misma manera, sino que cada una presenta diferentes criterios de evaluación. Entre las variables que mostraron un comportamiento positivo bajo esta fuente de radiación fueron el DQO, ya que disminuye en un 28% y el pH que también disminuye en un 57%; la temperatura no presentó un cambio significativo, ya que solo disminuyó en 1%; mientras que la luminosidad del color se vio disminuida en un 25% y la turbidez aumentada en un 154%, lo cual fue desfavorable para el mejoramiento del agua.

Teniendo en cuenta los criterios anteriormente planteados, se evidencia claramente que con relación al impacto de las fuentes de radiación utilizadas en el experimento, tanto la luz UV-C como la luz blanca influyeron en la variación del DQO, el pH, la temperatura, el color y la turbidez; sin embargo, se puede reconocer que evidentemente con la luz UV-C como fuente de radiación en los tratamientos, se obtuvieron mejores resultados con respecto a los obtenidos con la luz blanca, y por tanto puede decirse la aplicación de UV-C fue más eficiente en el tratamiento del agua residual estudiada.

A continuación, se realiza el análisis puntual por cada una de las variables estudiadas:

4.3.2 pH

Para todos los experimentos se observó un ligero incremento del pH de la solución después del proceso de fotocátalisis como se observa en la (Figura 19) El pH es un parámetro complejo dado que está relacionado con el estado de ionización de la superficie del catalizador, así como el estado de ionización de los reactivos y productos, tales como ácidos y aminos.

Se puede considerar tres diferentes mecanismos que influyen en la disminución del colorante; la reacción de los radicales hidroxilos, la oxidación de espacios positivos y disminución de electrones en la banda de conducción, todo esto también se ve influenciado por el sustrato y los valores de pH que tenga la muestra.

Se estudió que el máximo porcentaje de disminución de color ocurre en un pH de 3, por lo que se concluye que la variación del pH influye en el porcentaje de degradación de color debido a las propiedades de ácido y base que posee el catalizador TiO_2 . En conclusión, mientras más bajo el valor del pH mayor dejación de color se obtiene.

En la (Figura 19) se observa que los tratamientos (2,3) presentan el mayor incremento de pH después del proceso de fotocátalisis por lo que se concluye que el pH inicial provoca un mayor incremento del pH al finalizar la fotocátalisis.

4.3.3 Turbidez

En el caso de la turbidez, se pudo observar en la (Figura 22) en los tratamientos con luz blanca se presentó un resultado negativo ya que aumento la turbidez después del tratamiento, sin embargo, con luz UV y con 2 gr/lit de catalizador se obtuvo el mejor resultado debido a la fuente de radiación y al catalizador, ya que se puede presentar un resultado desfavorable conocido como efecto pantalla que es resultado de la cantidad de solidos disuelto en la muestra, lo que provoca un oscurecimiento en la misma y por ende dificulta la exposición a la fuente de radiación en este caso la luz blanca.

4.3.4 Color

Para los tratamientos (2,3,4) se presentó una disminución del color que se puede observar en la (Figura 21) se pudo considerar que la relación de decoloración aumenta de forma proporcional a la medida de concentración de catalizador, hasta llegar a un límite máximo del cual se puede producir el efecto de apantallamiento y por ende el porcentaje de decoloración disminuye.

Tanto en la (Figura 21) como en la (Tabla 12) se puede apreciar el hecho de que los tratamientos con mayor concentración del catalizador y luz UV presentaron una mayor luminosidad en un 34 % mientras que con luz blanca y con baja concentración de TiO_2 la luminosidad baja en un 74% indicando que la luz UV es una opción favorable para este tipo de carga contaminante.

4.3.5 DQO

En la (Figura 23) se pudo analizar que en el tratamiento (1) con luz blanca y 1 gr/lit no hubo una disminución en el DQO de hecho todo lo contrario aumento el DQO debido a que se pudo haber formado micro coágulos que no subieron a formar parte del lodo y aumentaron el DQO tomado en la medición final.

Tanto en la (Figura 23) como en la (Tabla 12) se puede apreciar el hecho de que los tratamientos con luz UV y mayor concentración de catalizador presentaron una disminución de DQO de casi 85 % indicando que es un tratamiento factible para industrias textiles, mientras que para el tratamiento 3 tuvo una disminución de 65 % por lo que se concluye que el catalizador es inversamente proporcional al DQO y no influye tanto la fuente de radiación. Sin embargo, con luz blanca y bajo concentración del catalizador se presentó un incremento del DQO de aproximadamente en un 26 %.

4.3.6 Eficiencia de remoción

En consideración al límite de descarga al alcantarillado que exige el registro Oficial N°387 con respecto al DQO de 500 mg/lit se concluye que con la fotocatalisis se llega a cumplir este límite resultando positivo su uso en una industria textilera.

Se pudo observar que el mayor porcentaje de disminución de DQO fue de 87.22% obtenido en la cuarta réplica del tratamiento, donde en la primera replica este criterio se vio aumentado en un 26,70%, para luego seguir una tendencia de disminución debido a las condiciones de cada tratamiento que se puede ver en la Figura 26.

Por consiguiente, se puede concluir que la fotocatalisis es factible para una industria textilera, que a mayor concentración de catalizador TiO_2 y con luz UV existirá mejor remoción de DQO.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto se encontró que la fotocatalisis heterogénea (TiO_2), es un tratamiento viable para tratar aguas contaminadas provenientes del proceso de tinturación de industrias textiles y con el cual se alcanzan altos porcentajes en la disminución del color y demanda química de oxígeno.

La evaluación de la remoción de DQO y disminución de color por fotocatalisis fue exitosa, se pudo realizar, utilizando luz UV, para un volumen de muestra 1000 ml para un tiempo de residencia de 6 horas, a 150 rpm y con un pH de 3, condiciones óptimas obtenidas que permitieron un buen porcentaje de remoción de DQO y de color para las aguas residuales tratadas.

En los tratamientos llevados a cabo se observó que la temperatura final de la solución al igual que el pH no mostraron un cambio significativo.

El tipo de fuente de radiación es uno de los factores más significativos en el proceso de fotocatalisis. El porcentaje de degradación de la DQO y la disminución de color se ven afectados por el tipo de fuente, la luz UV, incrementa el porcentaje de degradación de la DQO.

Así mismo un aumento en la concentración del catalizador (TiO_2) aumenta el porcentaje de remoción de color y de DQO para los tratamientos.

En la fotocatalisis, el efecto del pH es muy determinante para la degradación del color, siendo éste inversamente proporcional a la variable de respuesta, con un valor óptimo de tres, debido a que los compuestos aniónicos, como el contaminante a tratar, se adsorben preferiblemente sobre superficies cargadas positivamente, esto es, a bajos valores de pH. La disminución de carga orgánica no se ve afectada significativamente por esta variable y su efecto es directamente proporcional al porcentaje de degradación de DQO.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda para próximos análisis realizar ensayos preliminares analizando por ejemplo el uso de luz natural como fuente de radiación para comparar su capacidad de remoción de DQO y de color, la distancia a la que se encuentra la fuente de radiación, el tiempo de operación, etc.

También se recomienda buscar una opción para aumentar el pH para que pueda cumplir con la Normativa del país que exige un pH de 6 a 9.

El proceso de fotocatalisis permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año. Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos, de la época del año y de la región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento.

REFERENCIAS

- Adán, C. (2008). *Fotocatalizadores nanoestructurados de TiO₂ y Fe-TiO₂ para la degradación de compuestos aromáticos en medio acuoso empleando luz solar*. Madrid: Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10486/1604>
- Adán, C., Bahamonde, A., Martínez, A., Fernández, M., Pérez, .., & Matalo, S. (2007). *Solar light assisted photodegradation of ethidium bromide over titania-based catalysts*. *Catalysis Today*, 129(1-2), 79-85. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.06.051>.
- Ahmed, N. (2005). *The use of sodium EDTA in the dyeing of cotton with reactive dyes*. *Dyes and Pigments*(65), 221-225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.07.014>
- Aitken, M. (1993). *Waste treatment applications of enzymes: Opportunities and obstacles*. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 52, B49–B58. doi: [https://doi.org/10.1016/0300-9467\(93\)80057-U](https://doi.org/10.1016/0300-9467(93)80057-U)
- Alatorre, F. (2007). *Diseño de reactores empacados para la remoción de color en aguas residuales industriales*. México, D.F.: UNAM. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2099/alatorreacosta.pdf?sequence=1>
- Amjad, A., & Qayyum, H. (2007). *Decolorization and removal of textile and non-textile dyes from polluted wastewater and dyeing effluent by using potato (*Solanum tuberosum*) soluble and immobilized polyphenol oxidase*. *Bioresource Technology*, 98, 1012-1019. doi: [10.1016/j.biortech.2006.04.008](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.008)
- Arroyave, J., Giraldo, L., & Mejía, J. (2008). *Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina*. *Revista Lasallista de*

investigación, 6(1), s.p. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v6n1/v6n1a04.pdf>

Asociación de Industrias Textiles del Ecuador (AITE). (2010). *La industria textil apuesta e invierte en el Ecuador*. Quito, Ecuador: Boletín Mensual AITE. Recuperado de: <http://www.aite.com.ec/boletines/2010/inversion-ecuador.pdf>

Barba, L. (2002). *Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición*. Recuperado de:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/conceptos.pdf>

Bautista, L. (2015). *Evaluación de la Fijación de TiO₂ sobre láminas de Pet y su eficiencia en la Foto-Oxidación de fenol*. Xalapa: Universidad Veracruzana.

Bellardita, M., Addamo, M., Di Paola, A., Marcía, G., Palmisano, L., Cassar, L., & Borsa, M. (2010). *Photocatalytic activity of TiO₂/SiO₂ systems*. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.108>

Bishop, P., & Jiang, H. (1994). *Aerobic biodegradation of azo dyes in biofilms*. *Water Science and Technology*, 29, 525-530. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/279549006_Aerobic_biodegradation_of_azo_dyes_in_biofilms

Blackburn, R., & Burkinshaw, S. (2002). *A greener approach to cotton dyings with excellent wash fastness*. *Green Chemistry*(4), 47-52. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/255743806_A_greener_approach_to_cotton_dyeings_Part_2_Application_of_12_metal_complex_acid_dyes

Bujaldon, I., Buscema, F., Erio, L., Nielsen, K., & Ordoñez, F. (2014). *Industria Textil*. Recuperado de Universidad Nacional de Cuyo.

Bumpus, J., & Brock, B. (1988). *Biodegradation of crystal violet by the white rot fungus Phanerochaete chrysosporium*. *Appl Environ Microbiol*, 54(5), 1143-1150. Recuperado de:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC202618/pdf/aem00110-0081.pdf>

- Burkinshaw, S., Mignanelli, M., Froehling, P., & Bide, M. (2000). *The use of dendrimers to modify the dyeing behaviour of reactive dyes on cotton*. *Dyes and Pigments*(47), 259-267. doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(00\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(00)00053-X)
- Cañízares, P., Martínez, F., & Jiménez, C. (2006). *Coagulation and Electrocoagulation of Waste Polluted with Dyes*. *Environ. Sci. Technol.* España: Universidad de Castilla. doi: 10.1021/es0608390
- Carbajo, J. (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂*. Madrid: Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC). Recuperado de: http://digital.csic.es/bitstream/10261/100081/1/Carbajo%20Olleros,%20J.%20_Tesis_2013.pdf
- Chacón, I., Leal, M., Sánchez, M., & Bandala, E. (2002). *Tratamiento de agua residual proveniente de la industria textil mediante fotocatalisis solar*. Cancún, México: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/237433507_TRATAMIENTO_DE_AGUA_RESIDUAL_PROVENIENTE_DE_LA_INDUSTRIA_TEXTIL_MEDIANTE_FOTOCATALISIS_SOLAR
- Cohen, R., Persky, L., & Hadar, Y. (2002). *Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus Pleurotus*. *Appl. Microbial. Biotechnology.*, 58, 582-594. doi: 10.1007/s00253-002-0930-y
- Cortazar, A., González, C., Coronel, C., Escalante, J., Castro, J., & Villagómez, J. (2012). *Biología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil*. *Universidad y Ciencia*, 28(2), 187-199. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000200009

- Cortina, C., & Márquez, R. (2008). *Alternativa de tratamiento de aguas residuales de la Industria Textil*. México, D.F.: Escuela Politécnica Nacional (IPN) y Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA). Recuperado de: <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/2029/1/tesis%20coruinado minguez.pdf>
- Dávila, S. (2005). *Degradación Fúngica del Colorante Naranja ácido 24*. México, DF: UNAM. Recuperado de: https://smbb.mx/congresos%20smbb/puertovallarta03/TRABAJOS/AREA_VII/CARTEL/CVII-31.pdf
- Dellamatrice, P., Monteiro, R., Kamida, H., Nogueira, N., Rossi, M., & Blaise, C. (2005). *Decolourization of municipal effluent and sludge by Pleurotus sajor-caja and Pleurotus ostreatus*. *World journal of microbiology and Biotechnology*, 21, 1363-1369. doi: 10.1007/s11274-005-5143-y
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES). (2014). *La escasez de agua*. Recuperado de ONU: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones y Dirección de Promoción de Exportaciones. (2012). *Análisis Sectorial de Textiles y Confecciones*. Recuperado de: <http://ecociencia.ecotec.edu.ec/upload/php/files/agosto/03.pdf>
- EPA. (1996). *Best Management Practices for pollution prevention in the textile Industry*. Cincinnati, USA: U.S. Environmental Protection Agency. Recuperado de: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004Q2U.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995%20Thru%201999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C95THRU99%5CTXT%5C00000006%5C30004Q2U.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C->

&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=4

- Faroco, V., Pezzella, C., Miedele, A., Giardina, P., & Sanna, G. (2009). *Bio-remediation of colored industrial wastewaters by the white-rot fungi Phanerochaete chrysosporium and Pleurotus ostreatus and their enzymes*. *Biodegradation*, 20, 209-220. doi: 10.1007/s10532-008-9214-2
- Faust, B., & Hoigne, J. (1990). *Photolysis of Fe(III)-hydroxy complexes as sources of OH radicals in clouds, fog and rain*. *Atmosphere Environmental*, 24A(1), 79-89. doi: [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90443-Q](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90443-Q)
- Fenton, H. (1984). *Oxidation of tartaric acid in presence of iron*. *J. Chem. Soc. Trans.*, 65, 899-910. Recuperado de: <http://sci-hub.tw/http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1894/ct/ct8946500899#!divAbstract>
- Ferré, J. (2002). *Técnicas de Laboratorio: El Diseño Factorial Completo 2k*. Tarragona, España: Universidad Rovira i Virgili. Recuperado de: <http://www.quimica.urv.es/quimio/general/doecast.pdf>
- Garcés, L., & Peñuela, G. (2007). *Revista Lasallista de Investigación*. *Recista L*, 4(2), 7-14.
- Garcés, L., Mejía, E., & Santa María, J. (2004). *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. *Lasallista de investigación*, 1, 83-90. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/html/695/69511013/>
- Guillard, C., Lacheb, H., Houas, A., Ksibi, M., Elaloui, E., & Herrmann, J. (2003). *Influence of chemical structure of dyes, of pH and of inorganic salts on their photocatalytic degradation by TiO₂ comparison of the efficiency of powder and supported TiO₂*. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 158, 27–36. doi: [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(03\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(03)00016-9)

- Gupta, V., & Suhas, L. (2009). *Application of low-cost adsorbents for dye removal*. Journal of environmental Management(90), 2313-2342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Guroi, M. (2006). *Photo-Catalytic Construction Materials And Reduction In Air Pollutants*. United States of America: San Diego University. Recuperado de: <http://sor.senate.ca.gov/sites/sor.senate.ca.gov/files/ctools/%7B35A800C0-093D-4591-AB46-9277FC2B9112%7D.PDF>
- Hachem, C., Bocquillon, F., Zahraa, O., & Bouchy, M. (2001). *Decolourization of textile industry wastewater by the photocatalytic degradation process*. Dyes and Pigments, 49, 117-125. doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(01\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(01)00014-6)
- Hernández, L., & et al. (2010). *Contaminación Ambiental en Colombia. Problemas Ambientales, Globales y Nacionales*. Colombia: Movimiento Político MIRA. Recuperado de: <https://partidomira.com/ambiente/libro/tomo1/tomo1/tomo%201.pdf>
- Houas, A., Lachheb, H., Ksibi, M., Elaloui, E., Guillard, C., & Herrmann, J. (2001). *Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water*. Applied Catalysis B: Environmental, 31, 145-157. doi: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00276-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00276-9)
- Hunger, K. (2003). *Industrial dyes: Chemistry, Properties, Applications*. Cambridge: Wiley-VCH Weinheim. doi: 10.1002/3527602011
- Husain, Q. (2006). *Potential Applications of the oxidoreductive enzymes in the decoloration and detoxification of textile and other synthetic dyes from polluted water*. Critical reviews in Biotechnology(26), 201-221. doi: 10.1080/07388550600969936
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2006). *Estadísticas de Gasto Empresarial en Protección Ambiental*. Quito, Ecuador: INEC. Recueprado de: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp->

content/descargas/Presentaciones/estadisticas_gasto_+proteccion_ambiental.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2012). *Infoeconomía*. Recuperado de INEC: <http://www.inec.gob.ec/inec/revistas/info6.pdf>

IPPC. (2003). *Reference Document on Best Available Techniques for the Textiles Industry*. Recuperado de IPPC: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/txt_bref_0703.pdf

Kandelbauer, A., & Guebitz, G. (2005). *Bioremediation for the decolorization of textile dyes - a review*. En: En E. Lichtfouse, S. Dudd, & D. Robert, *Environmental Chemistry* (págs. 269-288). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. Recuperado de: https://sci-hub.tw/https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-26531-7_26

Kaushik, P., & Malik, A. (2009). *Fungal dye decolorization: Recent advances and future potential*. *Environmental International*, 35, 127-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.010>

Kim, S., & Vogelpohl, A. (1998). *Degradation of organic pollutants by the Photo Fenton Process*. *Chem. Eng. Technol.*, 21, 187-191. doi: 10.1002/(SICI)1521-4125(199802)21:2<187::AID-CEAT187>3.0.CO;2-H

Konstantinou, I., & Albanis, T. (2003). *TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations A review*. s.c.: Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.11.010>

Kuhad, R., Sood, N., Tripathi, K., Singh, A., & Ward, O. (2004). *Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents*. *Adv. Appl. Microbiol*(56), 185-213. doi: 10.1016/S0065-2164(04)56006-9

Kulla, H. (1981). *Aerobic Bacterial Degradation of Azo Dyes*. En L. Hutter, A. Cook, & J. Nuesch, *Microbial Degradation of Xenobiotics and recalcitrant compounds*. FEMS Symp. No 12. (págs. 387-399). London: Academic Press. doi: 10.12691/ijebb-2-3-5

- Lacasse, K., & Baumann, W. (2004). *Textile Chemicals*. Environmental data and facts. Springer-Verlag. Recuperado de: <http://scihub.tw/http://www.springer.com/la/book/9783642623462#>
- Landolo, D., Amore, A., Birolo, L., Leo, G., Olivieri, G., & Farazo, V. (2011). *Fungal solid state fermentation on agro-industrial wastes for acid wastewater decolorization in a continuous flow packed-bed bioreactor*. *Bioresource Technology*, 102, 7603-7607. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.029>
- López, V., & Crespi, M. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*. Buenos Aires: UE-INTI. Recuperado de: <https://www.inti.gob.ar/ue/pdf/publicaciones/cuadernillo18.pdf>
- Maggos, T., Plassais, A., Bartzis, J., Vasilakos, C., Moussiopoulos, N., & Bonafous, L. (2007). *Photocatalytic degradation of NO_x in a street canyon configuration using TiO₂- mortar panels*. *Springer Science*, 1-3. doi: [10.1007/s10661-007-9722-2](https://doi.org/10.1007/s10661-007-9722-2)
- Malato, S., Blanco, J., Vidal, A., & Richter, C. (2002). *Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 37, 1-15. doi: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(01\)00315-0](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00315-0)
- Moeller, C., & Garzón, Z. (2003). *Desarrollo de tecnologías no convencionales para el tratamiento de efluentes de la fabricación de colorantes tipo azo*. México: Proyecto Interno IMTA. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/267414147_Desarrollo_de_tecnologias_no_convencionales_para_el_tratamiento_de_efluentes_de_la_fabricacion_de_colorantes_del_tipo_azo
- Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. (2004). *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation*. *Journal of Hazardous Materials*, B114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>

- Neamtu, M., Yediler, A., Siminiceanu, L., Macoveanu, M., & Kettrup, A. (2004). *Decolorization of disperse red 354 azo dye in water by several oxidation processes-a comparative study*. *Dyes Pigm*, 60(1), 61-68. doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(03\)00129-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(03)00129-3)
- Nitheranont, T., Watanabe, A., Suzuki, T., Katayama, T., & Asada, Y. (2011). *Decolorization of synthetic dyes and biodegradation of bisphenol A by laccase from the edible mushroom, Grifola frondosa*. *Biosci. Biotechnol. Biochem*, 75(9), 1845-1847. doi: 10.1271/bbb.110329
- O'Neill, C., Hawkes, F., Hawkes, D., Lourenço, N., Pinheiro, H., & Delée, W. (1999). *Colour in textile effluents-sources, measurement, discharge contents, and simulation: A review*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*(74), 1009-1018. doi: 10.1002/(SICI)1097-4660(199911)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N
- Oña, V. (2013). *Gestión y tratamiento de aguas en la UEB Central Azucarero "Héctor Rodríguez"*. La Habana, Cuba: Universidad Central "Marta Abreus" de las Villas. Recuperado de: <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/3395>
- Osburn, L. (2008). *A Literature Review On The Application Of Titanium Dioxide Reactive Surfaces On Urban Infrastructure For Depolluting And Selfcleaning Applications*. Recuperado de: https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/3044/Osburn_2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Parra, S. (2000). *Photochemical versus coupled photochemical biological flow system for the treatment of two biorecalcitrant herbicides: metobromuron and isoproturon*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 27, 153-168. doi: [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00151-X](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00151-X)
- Parra, S. (2001). *Coupling photocatalytic and biological processes as a contribution to the detoxification of water: catalytic and technological aspects*. Lausanne: Departement de Génie Rural. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. doi: 10.5075/epfl-thesis-2470

- Pasti-Grigsby, M., Paszczynski, A., Goszczynski, S., Crawford, D., & Crawford, R. (1992). *Influence of aromatic substitution patterns on azo dye degradability by Streptomyces spp. and Phanerochaete chrysosporium*. *Appl Environ Microbiol*, 58(11), 3605-3613. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC183151/pdf/aem00052-0173.pdf>
- Pey, J. (2016). *Aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada (Fotocatálisis Solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. doi: 10.4995/Thesis/10251/2241
- Quezada, M., & Buitrón, G. (1996). *Biodegradación aerobia de colorantes tipo azo (rojo ácido 151)*. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. *Tratamiento de aguas residuales*. México: Memoria. Recuperado de: <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IscScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=Ink&exprSearch=50334&indexSearch=ID>
- Ramirez, C. (1991). *Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*. México: s.e. Recuperado de: http://cbsuami.org/documentos/ueas/lic_hidrobiologia/2352012.pdf
- Ratola, N., Cincinelli, A., Alves, A., & Katsoyia, A. (2012). *Occurrence of Organic Microcontaminants in the Wastewater Treatment Process. A Mini Review*. *Journal of Hazardous Materials*, 239-240, 1-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.040>
- Reiger, P., & et al. (2002). *Xenobiotics in the environment: present and future strategies to obviate the problem of biological persistence*. *Journal of Biotechnology*(94), 101-123. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00422-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00422-9)
- Renhammar, B., & Malstrom, B. (1981). "Blue" copper-containing oxidases. In *copper proteins*. En T. Spiro, & J. Wiley, *Metal ions in biology* (págs. 109-149). New York: N.Y. Recuperado de: <https://sci-hub.tw/https://link.springer.com/article/10.1007/BF02407305>

- Robison, T., McMullan, G., Marchan, R., & Nigman, P. (2001). *Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on concurrent treatment technologies with a proposed alternative*. *Bioresource technology*(77), 247-255. Recuperado de: [https://sci-hub.tw/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://sci-hub.tw/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)
- Rodríguez, E., Pickard, M., & Vázquez-Duhalt, R. (1999). *Industrial dye decolorization by laccases from ligninolytic fungi*. *Current Microbiology*, 38, 27-32. Recuperado de: <http://pt7mdv.ceingebi.unam.mx/computo/pdfs/1999CURRMICROBIOL.pdf>
- Rodríguez, P., Rosa, C., Bermúdez, S., Serrat, D., & Kouroma, A. (2006). *Selección de cepas de Pleurotus ostreatus para la decoloración de efluentes industriales*. *Revista Mexicana de Micología*, 23, 9-15. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/274385313_Seleccion_de_cepas_de_Pleurotus_ostreatus_para_la_decoloracion_de_efluentes_industriales
- Saber, A., Rasul, M., Brown, R., & Hashib, M. (2011). *Influence of parameters on the heterogeneous photocatalytic degradation of pesticides and phenolic contaminants in wastewater: A short review*. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 311-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.028>
- Saber, A., Rasul, M., Martens, W., Brown, R., & Hashib, M. (2010). *Heterogeneous photocatalytic degradation of phenols in wastewater : a review on current status and developments*. *Desalination*, 261(1-2), 3-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.062>
- Sandoval, L., & Mijaylova, P. (2013). *Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria Textil*. México: SERMANAT. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1406>

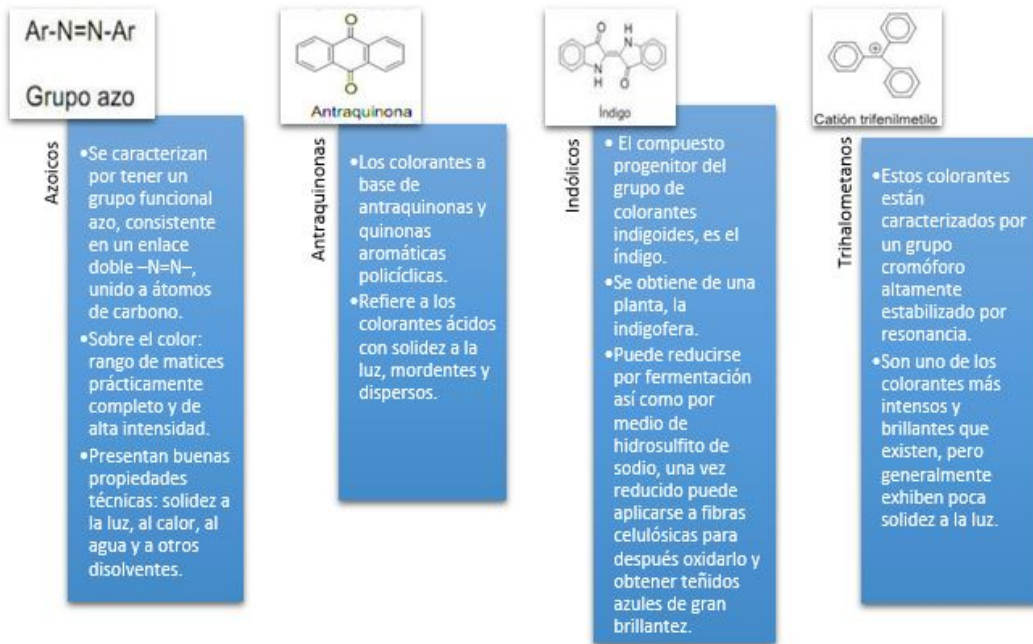
- Sanroman, M., Pazos, M., Ricart, M., & Cameselle, C. (2004). *Decolourisation of Textile Indigo Dye by DC Electric Current*. *Engineering Geology*(77). doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.07.016>
- Santos, P., Reis, L., Almeida, P., Oliveira, A., & Vieira, L. (2003). *Singlet oxygen generation ability of squarylium cyanine dyes*. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 160, 159-161. doi: [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(03\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(03)00203-X)
- Siddique, M., St. Pierre, C., Biswas, N., Bewtra, J., & Taylor, K. (1993). *Immobilized enzyme catalyzed removal of 4-chlorophenol from aqueous solutions*. *Water Research*, 27, 883-890. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(93\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(93)90153-9)
- Solis, Y. (2013). *Remoción del compuesto emergente carbamazepina mediante Fotocatálisis Heterogénea con TiO₂*. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/6159>
- Tang, W., & Huang, C. (1996). *2,4-diclorophenol oxidation kinetics by Fenton's reagent*. *Environmental Technology*, 17, 137-1378. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.1996.9618465>
- Tinoco, O., Medina, A., & Zapata, H. (2012). *Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar*. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 14(2), 9-15. Recuperado de: <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/viewFile/6217/5422>
- Tuesta, E., & Gutarra, A. (2004). *Aplicaciones electrocrómicas y fotocatalíticas del dióxido de titanio*. *REVCUNI*, 8(2), 21-45. Recuperado de : http://www.bibliotecacentral.uni.edu.pe/pdfs/REVCUNI/2,2004/art_0003.pdf
- Van der Zee, F., & Villaverde, S. (2005). *Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes – a short review of bioreactor studies*. *Water Resource*(39), 1425–1440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.007>

- Vandevivere, P., & Veartraete, W. (1998). *Treatment and reuse of wastewater from the textile industry: review of emerging technologies*. Journal of chemical technology and biotechnology(72), 289-302. doi: 10.1002/(SICI)1097-4660(199808)72:4<289::AID-JCTB905>3.0.CO;2-#
- Verlicchi, P., Aukidi, M., Galetti, A., Petrov, M., & Barceló, D. (2012). *Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment*. Science of the Total Environment, 430, 109-118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.055>
- Villalobos, D., & Buchanan, I. (2002). *Removal and aqueous phenol by Arthromyces ramosus peroxidase*. Environmental Engineer Science, 1, 65-73. doi: <https://doi.org/10.1139/s01-003>
- Villegas, R., Geissler, G., Silva, H., & Vergara, G. (2003). *Inmovilización de una peroxidasa de chayote y su potencial aplicación en la remoción de sustancias fenólicas en aguas contaminadas*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 19(2), 73-81. Recuperado de : https://www.researchgate.net/publication/26475219_Inmovilizacion_de_una_peroxidasa_de_chayote_Sechium_edule_jacq_SW_y_su_potencial_aplicacion_en_la_remocion_de_sustancias_fenolicas_en_aguas_contaminadas
- Wagner, & Nicell, J. (2002). *Detoxification of phenolic solutions with horseradish peroxidase and hydrogen peroxide*. Water Resource, 36, 4041-4052. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00133-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00133-1)
- Walters, A., Santillo, D., & Johnston, P. (2005). *El tratamiento de textiles y sus repercusiones ambientales*. Reino Unido: GreenPeace. Recuperado de: <https://internationalesommeruni.files.wordpress.com/2017/06/el-tratamiento-de-textiles-y-sus-repercusiones-ambientales.pdf>
- World Bank Group. (2011). *Pollution Prevention and Abatemen Handbook: Textiles Industry*. Draft Technical Back-ground Document. Washington, D.C.: Environment Department. Recuperado de:

https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/55bd0c0048855a26853cd76a6515bb18/textile_PPAH.pdf?MOD=AJPERES

ANEXOS

Anexo 1. Calificación de colorantes según su grupo cromóforo



1

Fuente: (EPA 1996; O' Neil et al., 1999; Robinson et al., 2001; Hunger, 2003; Husain 2006; Gupta y Suhas 2009)

Anexo 2. Clasificación de colorantes según se aplicación

Clase	Solubilidad	Producto Químico Principal	Aplicación	% de Fijación	Contaminantes antes
Ácidos	Solubles en agua	Tipo azo, antraquinona, trihalometano	Nylon, lana, seda, acrílicos modificados, y también en cierta medida para el papel, cuero, impresión de chorro de tinta, los alimentos y cosméticos	80-93	Ácidos orgánicos, aminas aromáticas
Básicos	Solubles en agua	Tipo azo, antraquinona, oxazina, triarilmetano	Papel, nylon, poliéster modificado, seda, lana y el algodón tanino mordentado	97-98	Ácidos orgánicos, aminas aromáticas
Dispersos	No iónicos insolubles en agua	Contienen azoicos, antraquinona, nitro y grupo benzodifuranona	Poliéster, en cierta medida nylon, celulosa, acetato de celulosa y fibras de acrílico	80-92	Sales, surfactantes, fosfatos, lubricantes, dispersantes
Directos	Solubles en agua, aniónicos	Contienen poliazos, ftalocianinas y oxazinas	Algodón, rayón, cuero y en cierta medida en nylon	70-95	Aminas aromáticas, sales, surfactantes
Reactivos	Solubles en agua	Contienen grupos cromóforos, como azo, antraquinona, triarilmetano, ftalocianina	Generalmente se utilizan para el algodón y otros materiales celulósicos, pero también se utiliza en menor medida en lana y nylon	60-90	Aminas aromáticas, sales, surfactantes
Sulfurados	Solubles en agua	No poseen una estructura determinada	Algodón, rayón, tienen un uso limitado con fibras de poliamida, seda, cuero, papel y madera	60-70	Aminas aromáticas, álcalis, agentes oxidantes y reductores

Mordentes	Solubles en agua	Azo y antraquinona	Lana y seda	85- 98	Aminas aromáticas, sales orgánicas, halogenados, metales pesados, color no fijado
------------------	---------------------	-----------------------	-------------	-----------	---

Fuente: (EPA, 1996; O'Neil et al., 1999; Robinson et al., 2001; Hunger, 2003; Husain, 2006; Gupta y Suhas, 2009)

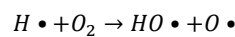
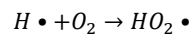
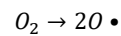
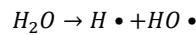
Anexo 3. Procesos no fotoquímicos

Proceso no fotoquímico	Descripción
Ozonización en medio alcalino (O3/OH-)	<p>El ozono puede reaccionar de forma directa con un sustrato orgánico a través de una reacción lenta y selectiva (ecuación 1) o de una reacción radical favorecida en medio alcalino, rápida y no selectiva (ecuación 2)</p> $O_3 + S \rightarrow S_{ax}; k = 1 - 100M^{-1}S^{-1} \quad (1)$ $2O_3 + H_2O \rightarrow 2HO \cdot + 2O_2 + HO_2 \cdot; k = 1^8 - 10^{10}M^{-1}S^{-1} \quad (2)$
Ozonización con peróxido de hidrógeno (O3/H2O2)	<p>La ozonización transforma los contaminantes en compuestos más simples, más refractarios al reactivo. Se logra una mejora agregando agua oxigenada (peróxido de hidrógeno, H2O2), que es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable:</p> $O_3 + H_2O_2 \rightarrow HO \cdot + O_2 + HO_2 \cdot; \text{siendo:}$ $H_2O_2 = HO_2^- + H^+ \text{ y } HO_2 \cdot = O_2 \cdot^- + H^+; \therefore$ $HO_2^- + O_3 \rightarrow O_3^- + HO_2 \cdot; k = 2,8 * 10^6 M^{-1} S^{-1}$ $O_2 \cdot^- + O_3 \rightarrow O_3^- + O_2; k = 1,6 * 10^9 M^{-1} S^{-1}$ $HO_3 \rightarrow HO \cdot + O_2; k = 1,1 * 10^5 S^{-1}$ $O_3 + HO \cdot \rightarrow O_2 + HO_2 \cdot; k = 1,1 * 10^5 S^{-1}$ $O_3 + HO_2 \cdot \rightarrow 2O_2 + HO \cdot$
Procesos Fenton (Fe2+ /H2O2)	<p>La combinación de Fe²⁺ y H₂O₂ va a generar radicales HO•, que a su vez van a reaccionar a continuación por dos vías: la oxidación de Fe (II) (reacción improductiva) y el ataque a la materia orgánica:</p> $Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + HO^- + HO \cdot; k = 76M^{-1}S^{-1}$ $Fe(II) + HO \cdot \rightarrow Fe(III) + HO^-$ $RH + HO \cdot + H_2O \rightarrow ROH + H_3O^+ \rightarrow \text{productos oxidados}$
Oxidación electroquímica	<p>La aplicación de una corriente eléctrica (2 – 20 A) entre dos electrodos en agua produce reacciones químicas primarias que van a generar HO•, que oxidará la materia orgánica:</p> $H_2O \rightarrow HO \cdot + H^+ + e^-; \text{oxidación anódica}$ $O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2; \text{reacción catódica}$
Radiólisis g y tratamiento con haces de electrones	<p>Estos procesos se basan en la generación de electrones altamente reactivos, iones radicales y radicales neutros por exposición de las aguas a tratar a haces de partículas másicas u ondas electromagnéticas de alta energía. Se pueden usar rayos γ, rayos X o aceleradores de haz de electrones como los de tipo Van-de-Graaf o los lineales. Cuando el haz de electrones penetra en el agua, los electrones pierden energía por colisiones no elásticas con las moléculas de H₂O, y se generan especies reactivas:</p> $H_2O \rightarrow e^-_{aq} + H \cdot + HO \cdot + H_2 + H_2O_2 + H^+$
Plasma no térmico	<p>El plasma es considerado el cuarto estado de la materia que contiene iones y electrones libres (gas eléctrico). El plasma puede generarse, en forma no térmica, por una descarga eléctrica o bombardeo de un gas con un haz de</p>

electrones de alta energía; la energía de los electrones en el plasma es de unos 10 eV, lo que equivale a temperaturas elevadas. Estos plasmas son buenas fuentes de especies reactivas altamente reductoras y oxidantes, como O (3P), HO•, N, H, NH, CH, O3.

Descarga electrohidráulica
- Ultrasonido

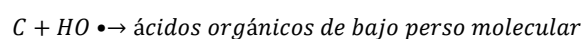
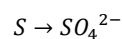
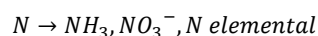
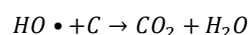
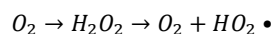
Esta tecnología usa ultrasonido de alta potencia (de 15 kHz hasta 1 MHz), y se aprovecha la cavitación electrohidráulica, es decir, el crecimiento y colapsado cíclico de burbujas de gas. El gas implota y se alcanzan temperaturas y presiones locales muy altas (4.000-10.000 K y 1.000- 10.000 bares en el centro de las burbujas colapsadas). La degradación de materia orgánica ocurre a través de reacciones con los radicales generados por la reacción térmica, o por las reacciones en presencia de oxígeno:



Oxidación en agua suby supercrítica

El proceso que opera en condiciones subcríticas es llamado también oxidación en aire húmedo; se trabaja a presiones entre 10-220 bars y temperaturas entre 150-370 °C. El mecanismo involucra la carbonización primaria de los sustratos orgánicos y su posterior reacción con los HO• producidos en la transformación catalítica del O2 disuelto en la superficie del centro carbonoso. El nitrógeno, los halógenos y el azufre son también mineralizados:

La oxidación con agua supercrítica usa agua en condiciones de presión y temperatura superiores que las del punto crítico, entre 450 y 700 °C y presiones cercanas a los 25 MPa. En estado supercrítico, el agua se comporta como un fluido cuya viscosidad, densidad y constante dieléctrica son relativamente bajas. En condiciones supercríticas, disminuye el número de uniones puente hidrógeno, aumenta la solubilidad de los compuestos orgánicos y gases y disminuye la solubilidad de los electrolitos. Por ello, este método posee características que lo llevan a ser un excepcional sistema de tratamiento, con una eficiencia de oxidación mayor que 99,99 % en tiempos de contacto muy breves (5-60 segundos), que no requiere ningún tratamiento adicional de los productos gaseosos. Debido a la alta solubilidad del O2 en el agua supercrítica, no existen problemas de transferencia de masa. Como además la tensión superficial es nula, el O2 penetra en los poros más pequeños y puede oxidar cualquier sustancia orgánica.



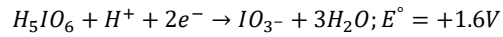
Fuente: (Sandoval & Mijaylova, 2013)

Anexo 4. Procesos fotoquímicos

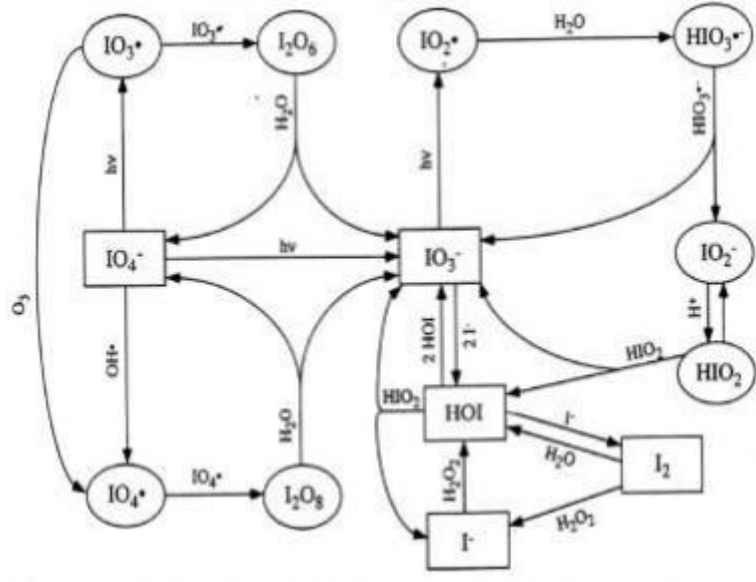
Proceso fotoquímico	Descripción
Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)	<p>Se utiliza radiación con una longitud de onda menor a la UV-C (menores a 190 nm) que producen la degradación de la materia orgánica en fases condensadas o gaseosas o la fotólisis del agua, que produce radicales hidroxilo, átomos de hidrógeno y electrones acuosos:</p> $H_2O + hv \rightarrow HO \cdot + H \cdot$ $H_2O + hv \rightarrow HO \cdot + H^+ + e_{aq}^-$ <p>A partir de los radicales primarios se generan rápidamente: $HO_2 \cdot$ y $O_2 \cdot^-$</p> $O_2 + H \cdot \rightarrow HO_2 \cdot; k = 1 * 10^{10} M^{-1} S^{-1}$ $O_2 + e_{aq}^- \rightarrow O_2 \cdot^-; k = 2 * 10^{10} M^{-1} S^{-1}$
UV/peróxido de hidrógeno	<p>La fotólisis del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se realiza utilizando lámparas de vapor de mercurio de media o baja presión:</p> $H_2O_2 + hv \rightarrow 2HO \cdot$ <p>En exceso de peróxido y con altas concentraciones de HO• tienen lugar reacciones competitivas que producen un efecto inhibitorio para la degradación. Los HO• son susceptibles de recombinarse o de reaccionar de acuerdo con el siguiente esquema:</p> $HO \cdot + H_2O_2 \rightarrow HO_2 \cdot + H_2O$ $HO_2 \cdot + H_2O_2 \rightarrow HO \cdot + H_2O + O_2$ $2HO_2 \cdot \rightarrow H_2O_2 + O_2$ $HO_2 \cdot + HO \cdot \rightarrow H_2O + O_2$
UV/O₃	<p>Combinación de los métodos UV/H₂O₂ y O₃/H₂O₂:</p> $O_3 + hv + H_2O \rightarrow H_2O_2 + O_2$ $H_2O_2 + hv \rightarrow 2HO \cdot$ $O_3 + H_2O_2 \rightarrow HO \cdot + O_2 + HO_2 \cdot$
Foto-Fenton	<p>La reacción de Fenton aumenta su eficacia por irradiación luminosa debido a varios factores, entre ellos la reacción adicional:</p> $Fe(III)(OH)^{2+} + hv \rightarrow Fe(II) + HO \cdot$
Ferrioxalato y otros complejos de Fe(III)	<p>En presencia de ligandos orgánicos, como por ejemplo ácidos carboxílicos, el Fe (III) puede formar complejos estables o pares iónicos asociados que exhiben bandas de transferencia de carga del ligando al metal en el espectro UV-visible. Son fotoquímicamente activos y generan Fe (II) por irradiación:</p> $Fe(III)(O^2CR)^{2+} + hv \rightarrow Fe(II) + CO_2 + R \cdot$ <p>La fotólisis del trisoxalato ferrato (III) (ferrioxalato) se aprovecha para la medición de intensidades de luz, y constituye el actinómetro químico más utilizado:</p> $[Fe(C_2O_4)_3]^{3-} + hv \rightarrow [Fe(C_2O_4)_2]^{2-} + C_2O_4 \cdot^-$ $C_2O_4 \cdot^- + [Fe(C_2O_4)_3]^{3-} \rightarrow [Fe(C_2O_4)_2]^{2-} + 2CO_2$ $C_2O_4 \cdot^- + O_2 \rightarrow O_2 \cdot^- + 2CO_2$

UV/periodato

El ácido periódico (H_5IO_6) y el ion periodato (IO_4^-) son oxidantes fuertes:



La irradiación de soluciones de periodato con luz UV corta genera radicales (IO_3^\bullet , HO^\bullet , IO_4^\bullet) y otras especies oxidantes (IO_3^- , O_3). El ataque a contaminantes orgánicos se vuelve así menos selectivo, pero más eficiente. El mecanismo es complejo como se muestra en la siguiente figura:

**Fotocatálisis heterogénea**

Se basa en la absorción de energía radiante (visible o UV) por un fotocatalizador heterogéneo, que normalmente es un semiconductor sólido. Las reacciones de destrucción de los contaminantes tienen lugar en la región interfacial entre el catalizador y la solución.

Fuente: (Sandoval & Mijaylova, 2013)

Anexo 5. Validación de variable pH y asociación con los tratamientos aplicados

PRUEBA F PARA VARIANZAS DE DOS

MUESTRAS	Inicial	Final
MEDIA	2,883125	3,018125
VARIANZA	0,016976563	0,007051562
OBSERVACIONES	4	4
GRADOS DE LIBERTAD	3	3
F	2,407489475	
P(F<=F) UNA COLA	0,244721034	
VALOR CRÍTICO PARA F (UNA COLA)	9,276628153	

FRECUENCIAS OBSERVADAS (TRATAMIENTOS/PH)

TRATAMIENTOS	Promedio
TRATAMIENTO 1	2,93
TRATAMIENTO 2	2,70
TRATAMIENTO 3	2,90
TRATAMIENTO 4	3,00
TOTAL	11,53

FRECUENCIAS ESPERADAS (TRATAMIENTOS/PH)

TRATAMIENTOS	Promedio		Tratamientos		Promedio	Prueba Chi Cuadrado	Valor P	Hipótesis Aceptada
	Inicial	Final	Inicial	Final				
TRATAMIENTO 1	2,96	2,96	5,89	5,89	2,88	3,01	0,9991	H0
TRATAMIENTO 2	3,14	3,14	5,84	5,84	2,85	2,99		
TRATAMIENTO 3	2,99	2,99	5,90	5,90	2,88	3,01		
TRATAMIENTO 4	2,98	2,98	5,98	5,98	2,92	3,06		
TOTAL	12,07	12,07	23,61	23,61				

Anexo 6. Validación de variable temperatura y asociación con los tratamientos aplicados

PRUEBA F PARA VARIANZAS DE DOS

MUESTRAS

	Inicial	Final
MEDIA	18,14375	19,71875
VARIANZA	0,148072917	1,473072917
OBSERVACIONES	4	4
GRADOS DE LIBERTAD	3	3
F	0,100519747	
P(F<=F) UNA COLA	0,045557061	
VALOR CRÍTICO PARA F (UNA COLA)	0,107797789	

FRECUENCIAS OBSERVADAS

(TRATAMIENTOS/TEMPERATURA)

TRATAMIENTOS	Promedio	Inicial	Final	Total	Tratamientos	Promedio	Inicial	Final
TRATAMIENTO 1	17,83	20,75	38,58	38,58	Tratamiento 1	18,49	20,09	20,09
TRATAMIENTO 2	18,53	18,85	37,38	37,38	Tratamiento 2	17,91	19,46	19,46
TRATAMIENTO 3	17,80	20,78	38,58	38,58	Tratamiento 3	18,49	20,09	20,09
TRATAMIENTO 4	18,43	18,50	36,93	36,93	Tratamiento 4	17,69	19,23	19,23
TOTAL	72,58	78,88	151,45	151,45				

FRECUENCIAS ESPERADAS

(TRATAMIENTOS/TEMPERATURA)

TRATAMIENTOS	Promedio	Inicial	Final	Total	Prueba Chi Cuadrado	Valor P	Hipótesis
TRATAMIENTO 1	17,83	20,75	38,58	38,58	0,1925	0,9788	Aceptada
TRATAMIENTO 2	18,53	18,85	37,38	37,38			H0
TRATAMIENTO 3	17,80	20,78	38,58	38,58			
TRATAMIENTO 4	18,43	18,50	36,93	36,93			
TOTAL	72,58	78,88	151,45	151,45			

Anexo 7. Validación de variable color y asociación con los tratamientos aplicados

PRUEBA F PARA VARIANZAS DE DOS

MUESTRAS

	Inicial	Final
MEDIA	72,2	71,4975
VARIANZA	0	1311,680558
OBSERVACIONES	4	4
GRADOS DE LIBERTAD	3	3
F	0	
P(F<=F) UNA COLA	0	
VALOR CRÍTICO PARA F (UNA COLA)	0,107797789	

FRECUENCIAS OBSERVADAS (TRATAMIENTOS/COLOR)

TRATAMIENTOS	Promedio
TRATAMIENTO 1	72,20
TRATAMIENTO 2	72,20
TRATAMIENTO 3	72,20
TRATAMIENTO 4	72,20
TOTAL	288,80

FRECUENCIAS ESPERADAS (TRATAMIENTOS/COLOR)

TRATAMIENTOS	Promedio	Tratamientos		Promedio	Prueba Chi	Valor P	Hipótesis
		Inicial	Final	Final	Cuadrado	0,0000	Aceptada
TRATAMIENTO 1	72,20	18,13	90,33	45,39	38,4662		H1
TRATAMIENTO 2	72,20	80,50	152,70	76,72			
TRATAMIENTO 3	72,20	90,38	162,58	81,69			
TRATAMIENTO 4	72,20	96,98	169,18	85,00			
TOTAL	288,80	285,99	574,79	84,18			

Anexo 8. Validación de variable turbidez y asociación con los tratamientos aplicados

PRUEBA F PARA VARIANZAS DE DOS MUESTRAS

	Inicial	Final
MEDIA	38,7	382,8725
VARIANZA	0	311950,5206
OBSERVACIONES	4	4
GRADOS DE LIBERTAD	3	3
F	0	
P(F<=F) UNA COLA	0	
VALOR CRÍTICO PARA F (UNA COLA)	0,107797789	

FRECUENCIAS OBSERVADAS (TRATAMIENTOS/COLOR)

TRATAMIENTOS	Promedio		Total		Promedio		Prueba Chi Cuadrado	Valor P	Hipótesis Aceptada
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
TRATAMIENTO 1	38,7	1206,75	1245,45	1131,12	114,33	1131,12	No concluyente	0,0000	H1
TRATAMIENTO 2	38,7	247,48	286,18	259,91	26,27	259,91			
TRATAMIENTO 3	38,7	68,13	106,83	97,02	9,81	97,02			
TRATAMIENTO 4	38,7	1206,75	1245,45	43,44	4,39	43,44			
TOTAL	154,8	1531,49	1686,29						

FRECUENCIAS ESPERADAS (TRATAMIENTOS/COLOR)

TRATAMIENTOS	Promedio		Total		Promedio		Prueba Chi Cuadrado	Valor P	Hipótesis Aceptada
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
TRATAMIENTO 1	38,7	1206,75	1245,45	1131,12	114,33	1131,12	No concluyente	0,0000	H1
TRATAMIENTO 2	38,7	247,48	286,18	259,91	26,27	259,91			
TRATAMIENTO 3	38,7	68,13	106,83	97,02	9,81	97,02			
TRATAMIENTO 4	38,7	1206,75	1245,45	43,44	4,39	43,44			
TOTAL	154,8	1531,49	1686,29						

Anexo 9. Validación de variable DQO y asociación con los tratamientos aplicados

PRUEBA F PARA VARIANZAS DE DOS

MUESTRAS

	Inicial	Final
MEDIA	176	85,0625
VARIANZA	0	8795,098958
OBSERVACIONES	4	4
GRADOS DE LIBERTAD	3	3
F	0	
P(F<=F) UNA COLA	0	
VALOR CRÍTICO PARA F (UNA COLA)	0,107797789	

FRECUENCIAS OBSERVADAS (TRATAMIENTOS/COLOR)

TRATAMIENTOS	Promedio	Total	
	Inicial	Final	Total
TRATAMIENTO 1	176	223	399
TRATAMIENTO 2	176	64,75	240,75
TRATAMIENTO 3	176	30	206
TRATAMIENTO 4	176	22,5	198,5
TOTAL	704	340,25	1044,25

FRECUENCIAS ESPERADAS (TRATAMIENTOS/COLOR)

TRATAMIENTOS	Promedio	Promedio		Prueba Chi Cuadrado	Valor P	Hipótesis Aceptada
	Inicial	Final	Inicial	Final	No concluyente	H1
TRATAMIENTO 1	176	223	268,993057	130,006943	0,0000	
TRATAMIENTO 2	176	64,75	162,305961	78,4440388		
TRATAMIENTO 3	176	30	138,878621	67,121379		
TRATAMIENTO 4	176	22,5	133,822361	64,6776395		
TOTAL	704	340,25	1044,25			

