



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

**“REDUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS
MEDIANTE FOTOCATÁLISIS CON DIÓXIDO DE TITANIO
PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL
PROCESO DE TEÑIDO DE UNA EMPRESA TEXTIL EN EL
AÑO 2018”**

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autor:

Requejo Cabello, Iveth Ximena

Asesor:

Mg. Castillo Gomero, Elifio Gustavo

Lima - Perú

2020

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado en primer lugar a Dios, por darme la fortaleza para seguir y poder concretar una de mis principales metas trazadas, a mis papás por ser mi motor y motivo en la vida y por brindarme el apoyo infinito en todo lo que he necesitado, a mis hermanas, por su cariño y porque me inspiran a ser cada día mejor persona y a mi enamorado por brindarme su apoyo incondicional y el aliento necesario para no rendirme a pesar de las dificultades que se pudieron presentar.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por regalarme un día más de vida para poder concretar una de mis principales metas y porque cuando necesité las fuerzas necesarias para poder seguir me las concedió.

A mis papás Celinda Cabello Yánac y Mario Requejo Pérez, porque siempre creyeron en mí y me brindaron el apoyo necesario para la realización de mi tesis, gracias por ser una de las principales razones para seguir cumpliendo mis metas y por todo el amor que me brindan, sé que les costó el verme trasnochar pero todo fue parte del sacrificio necesario y miren lo logramos.

A mis hermanas Aracely Requejo Cabello y Maricielo Requejo Cabello, por su amor y por impulsarme a seguir creciendo personalmente y profesionalmente, para poder ser ese buen ejemplo que ustedes merecen.

A mi enamorado Renzo Gutierrez Pereda, por haberse tomado el tiempo necesario para apoyarme cuando a veces no lo tenía, gracias por tus palabras de aliento a lo largo de estos meses, porque no me dejaste caer cuando se presentaron dificultades y porque fuiste una de las piezas importantes para lograr lo que me había propuesto, mil gracias amor.

A mi familia Cabello, muchas gracias por el cariño y apoyo brindado, porque me han demostrado con el ejemplo que el que se esfuerza triunfa.

Al ing. Gustavo Castillo Gomero, porque desde el día que asumió ser mi asesor me brindó la orientación necesaria para poder culminar mi tesis, gracias profesor por compartir sus conocimientos y por haber sumado a mi investigación.

A la Universidad Privada del Norte, por permitirme usar los laboratorios para poder concretar mi investigación, a mi directora de carrera Margarita Cateriano Calderón, gracias por su guía y orientación a lo largo de mi ciclo académico y al profesor Denis Hurtado, gracias por el apoyo brindado cuando lo necesité y por la orientación cuando empecé con mi investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	13
1.3. Objetivos.....	14
1.4. Hipótesis	15
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	17
2.1. Tipo de investigación.....	17
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	17
2.3. Procedimiento.....	20
CAPÍTULO III. RESULTADOS	32
3.1. Resultados del análisis inicial del agua residual del proceso de teñido.....	32
3.2. Resultados del análisis posterior a los tratamientos por fotocatalisis.....	32
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	62
4.1. Discusión	62
4.2. Conclusiones.....	64
4.3. Recomendaciones	66
REFERENCIAS	67
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales empleados para elaboración del reactor tubular para la fotocatalisis	18
Tabla 2. Parámetros físico-químicos de los Valores Máximos Admisibles.....	22
Tabla 3. Tratamientos para la experimentación	30
Tabla 4. Características iniciales del agua residual de la empresa textil.....	32
Tabla 5. Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO ₂	32
Tabla 6. Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO ₂	33
Tabla 7. Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO ₂	34
Tabla 8. Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO ₂	35
Tabla 9. Resultado de conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO ₂	37
Tabla 10. Resultado de conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO ₂	38
Tabla 11. Resultado de conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO ₂	39
Tabla 12. Resultado de conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO ₂	40
Tabla 13. Resultado de DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO ₂	42
Tabla 14. Resultado de DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO ₂	43
Tabla 15. Resultado de DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO ₂	44
Tabla 16. Resultado de DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO ₂	45
Tabla 17. Resultado del color en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO ₂	46
Tabla 18. Resultado de color en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO ₂	47
Tabla 19. Resultado de color en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO ₂	48
Tabla 20. Resultado de color en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO ₂	49
Tabla 21. Análisis de varianza de 2 factores (concentración de TiO ₂ & tiempo) -pH	51
Tabla 22. Análisis de varianza de 2 factores (concentración de TiO ₂ & tiempo) -conductividad.....	53
Tabla 23. Análisis de varianza de 2 factores (concentración de TiO ₂ & tiempo) -DQO.....	57
Tabla 24. Análisis de varianza de 2 factores (concentración de TiO ₂ & tiempo) -color	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la investigación	20
Figura 2. El prototipo de fotocatalisis acondicionado.....	24
Figura 3. Especificaciones de las paredes del reactor tubular fotocatalítico.	27
Figura 4. Especificaciones de los tres discos del reactor tubular fotocatalítico.....	28
Figura 5. Circuito del prototipo de fotocatalisis.	29
Figura 6. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 1.....	33
Figura 7. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 2.....	34
Figura 8. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 3.....	35
Figura 9. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 4.....	36
Figura 10. % de reducción del ph en el proceso fotocatalítico.....	37
Figura 11. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 1.....	38
Figura 12. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 2.....	39
Figura 13. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 3.....	40
Figura 14. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 4.....	41
Figura 15. Variación de la conductividad (us/cm) en el proceso fotocatalítico.....	41
Figura 16. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA al emplear tratamiento N° 1.....	42
Figura 17. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA al emplear tratamiento N° 2.....	43
Figura 18. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA al emplear tratamiento N° 3.....	44
Figura 19. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA al emplear tratamiento N° 4.....	45
Figura 20. Variación del % de degradación del dco en el proceso fotocatalítico.....	46
Figura 21. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 1.....	47
Figura 22. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 2.....	48
Figura 23. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 3.....	49
Figura 24. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 4.....	50
Figura 25. Variación del % de degradación del color en el proceso fotocatalítico	50
Figura 26. Gráfica de intervalos de pH vs la concentración de TiO ₂	52
Figura 27. Gráfica de intervalos de pH vs el tiempo del proceso fotocatalítico.	52
Figura 28. Gráfica de interacción para pH.....	53
Figura 29. Gráfica de optimización de respuesta.....	53
Figura 30. Gráfica de intervalos de la conductividad vs el tiempo del proceso fotocatalítico.....	55
Figura 31. Gráfica de intervalos de la conductividad vs la concentración de TiO ₂	55
Figura 32. Gráfica de interacción para la conductividad	56

Figura 33. Gráfica de optimización de respuesta.....	56
Figura 34. Gráfica de intervalos de la DQO vs el tiempo del proceso fotocatalítico	58
Figura 35. Gráfica de interacción para la DQO	58
Figura 36. Gráfica de optimización de respuesta.....	59
Figura 37. Gráfica de intervalos de color vs la concentración de TiO_2	60
Figura 38. Gráfica de intervalos de color vs el tiempo.	60
Figura 39. Gráfica de interacción para el color.....	61
Figura 40. Gráfica de optimización de respuesta.....	61

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de reynolds.....	25
Ecuación 2. Área de la circunferencia.....	26

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo el reducir la concentración de los parámetros fisicoquímicos mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil. Se consideró una población de 12,5 m³/h y una muestra que fue 50 L. El diseño de la investigación es pre-experimental con un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo. La estructura del prototipo para la fotocatalisis se divide en: el tanque de almacenamiento con agitación automática, en el cual se depositó el TiO_2 y el reactor tubular, que posee la lámpara UV de 36 w con la cual entra en contacto el catalizador al ser transportado. Las variables de operación que se emplearon fueron a diferentes concentraciones de TiO_2 (100, 300, 500 y 1000 mg/L) y tiempos (1, 2,3 y 4 horas), realizándose un total de 16 ensayos de los cuales se determinó que el que presentó mejores resultados por la reducción de los parámetros fue a una concentración de 1000 mg/L de TiO_2 a 4 horas del proceso. Se concluye que la fotocatalisis con TiO_2 es efectiva para tratar las aguas residuales de una industria textil, ya que se consiguió que los parámetros se encuentren dentro de los VMA.

Palabras clave: fotocatalisis, TiO_2 , luz UV, aguas residuales, proceso de teñido.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

A nivel mundial, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2003) el 22% del consumo total de agua se destina a uso industrial, el 70% a consumo agrícola y solo el 8% a gastos domésticos. Sin embargo, en el 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1170 km³/año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³ /año, ocurriendo un incremento del 24% del consumo total de agua (ONU, 2003, p. 19).

El sector textil, es una de las principales industrias que consume grandes cantidades de agua para la elaboración de sus productos, además de energía, colorantes y productos auxiliares. De las 700.000 toneladas de tintes y colorantes que se producen cada año en todo el mundo, entre 10 al 15% se desechan en las aguas residuales provenientes de las operaciones de teñido, las cuales poseen elevadas concentraciones de colorantes, compuestos tóxicos, tensioactivos, entre otros (Garcés, Mejía y Santamaría, 2015, p.84). Cabe recalcar que estos agentes colorantes poseen características independientes de acuerdo a sus composiciones químicas. Los procesos de la industria textil no liberan grandes cantidades de metales; sin embargo, aún las concentraciones más pequeñas pueden producir acumulación en los tejidos de animales acuáticos y muchas veces los efectos se observan a largo plazo, y en la mayoría de los casos son difíciles y costosos de tratar (Gómez, Escudero y Gamarra, 2011, p.11). Así mismo, la fuerte coloración que imparten a los cuerpos de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en corrientes de agua (Bandala , 2014) y según la investigación del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI, 2015): “Esto produce la disminución de oxígeno disuelto en el agua y con ello la alteración de las funciones de algunos seres acuáticos” (p.6).

Según la ONU (2003), en las naciones en vía de desarrollo el 70% de las aguas residuales se vierten sin ningún tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos. Lo cual representa un problema ambiental serio hoy en día, por eso las regulaciones legales sobre la eliminación de químicos en el ambiente natural son más estrictas, producto a las consecuencias que originan (Grzechulska, Tomaszewska y Morawski, 2009, p.1). Barka, Qourzal, Assabbane, Nounah y Ait Ichou (2010) en su investigación menciona que: las aguas residuales de la industria del teñido de telas son considerables fuente de contaminación ambiental, ya que los efluentes de los procesos de teñido y acabado se caracterizan por un bajo grado de biodegradabilidad (p.2). Representando una amenaza directa para la flora y fauna de los ecosistemas, ya que las aguas residuales de la industria textil contienen grandes cantidades de colorantes, que poseen elevada toxicidad y son potencialmente cancerígeno(Kaushik y Vogelpohl, 2009).

En el Perú, la magnitud real del volumen de las aguas residuales que las industrias formales e informales producen no es conocida con exactitud (Sánchez y Uribe, 2018, p.130). Sin embargo, los entes estatales se encargan de realizar los monitoreos respectivos en mira de que las empresas cumplan con la legislación.

Cabe recalcar que las aguas residuales generalmente son tratadas por las tecnologías de floculación, degradación biológica, coagulación química, adsorción de carbón activado, oxidación química, entre otros; sin embargo, a menudo estos métodos son ineficaces para mineralizar muchos contaminantes existentes en las aguas residuales (Bouarioua y Zerdaoui, 2017). 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 realizar el montaje de los equipos, así mismo porque solo algunos métodos logran disminuir la carga orgánica y eliminar el color y la toxicidad de las aguas residuales(Garcés, Mejía y Santamaría, 2015).

A diferencia de la fotocatalisis, que ha demostrado su eficacia como una técnica alternativa en comparación a los métodos clásicos, debido a su capacidad de eliminar totalmente las sustancias químicas sin ninguna transformación tóxica o transferencia a otro entorno y también es principalmente no selectiva; por lo tanto, puede usarse para una amplia gama de compuestos indeseables que son refractarios, tóxicos y no biodegradables (Bouarioua et al., 2017).

En general, la aplicación de la fotocatalisis, es una tecnología simple, amigable con el ambiente y óptima, ya que requiere solo de la absorción de la luz UV y el catalizador (TiO_2) como material semiconductor para formar radicales hidroxilos, los cuales tendrán un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. La fotocatalisis es considerada como la catálisis de una reacción fotoquímica en una superficie sólida, por lo general un semiconductor (Pey, 2008, p 50). Esta definición simple, aunque correcta oculta el hecho de que debe haber al menos dos reacciones que ocurren simultáneamente, la primera que implica la oxidación, de agujeros fotogenerados, y la segunda que implica la reducción, de los electrones fotogenerados, los cuales deben equilibrarse precisamente para que el propio fotocatalizador no sufra cambio, lo cual es, después de todo, uno de los requisitos básicos para un catalizador (Pey, 2008, p 52). Esta técnica avanzada o terciaria permite mejorar la calidad de las aguas residuales de las industrias textiles y además tiene por ventaja que para su acondicionamiento no se necesitan grandes espacios y los costos económicos que genera su implementación no son muy elevados a diferencia de las otras tecnologías convencionales.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿En qué medida la fotocátalisis con TiO_2 reducirá significativamente la concentración de los parámetros fisicoquímicos en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles serán los valores iniciales de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) del agua residual provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?
- ¿Cuáles serán las condiciones óptimas de las variables de operación (tiempo y concentración de TiO_2) de la fotocátalisis para el tratamiento del agua residual del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?
- ¿De qué manera la fotocátalisis con TiO_2 permitirá la reducción de la concentración del pH en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?
- ¿De qué manera la fotocátalisis con TiO_2 permitirá la reducción de la concentración de la conductividad en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?
- ¿De qué manera la fotocátalisis con TiO_2 permitirá la reducción de la concentración del DQO en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?

- ¿De qué manera la fotocatalisis con TiO_2 permitirá la reducción de la concentración del color en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?
- ¿Cuál será el porcentaje óptimo de reducción de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) posterior al tratamiento del agua residual del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Reducir la concentración de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, DQO y color) mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones iniciales de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, DQO y color) de las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.
- Determinar las condiciones óptimas de las variables de operación (tiempo y concentración de TiO_2) de la fotocatalisis en el tratamiento de las residuales del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.
- Reducir la concentración del pH mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.
- Reducir la concentración de la conductividad mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.

- Reducir la concentración de la DQO mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.
- Reducir la concentración del color mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.
- Determinar el porcentaje óptimo de reducción de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) mediante la fotocatalisis con TiO_2 en las aguas residuales del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Si se aplica la fotocatalisis con TiO_2 influirá significativamente en la reducción de la concentración de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) de las aguas residuales provenientes del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Los valores iniciales de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) del agua residual del proceso de teñido de una empresa textil superan los Valores Máximos Admisibles (VMA).
- Las condiciones óptimas de las variables de operación (tiempo y concentración de TiO_2) de la fotocatalisis influirán significativamente en la reducción de la concentración de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.

- Si se aplica la fotocatalisis con TiO_2 se reducirá significativamente la concentración del pH en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- Si se aplica la fotocatalisis con TiO_2 se reducirá significativamente la concentración de la conductividad en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- Si se aplica la fotocatalisis con TiO_2 se reducirá significativamente la concentración del DQO en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- Si se aplica la fotocatalisis con TiO_2 se reducirá significativamente la concentración del color en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- Los valores finales de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) posterior al tratamiento del agua residual del proceso de teñido de una empresa textil, cumplirán con los Valores Máximos Admisibles (VMA).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación es de enfoque cuantitativo, ya que se emplearon diferentes técnicas para poder estudiar a la variable de interés de la población. Así mismo, es de diseño de tipo pre-experimental, ya que carece de azar en la formación del grupo y se posee el control de la variable independiente. Las variables en la presente investigación son : la fotocatalisis con dióxido de titanio (variable independiente) y el agua residual del proceso de teñido de una empresa textil (variable dependiente).

Esquema:



Dónde:

- **PT1: Pre-Test** (muestra inicial de agua residual del proceso de teñido de una empresa textil).
- **X: Tratamiento** (aplicación de la fotocatalisis con dióxido de titanio)
- **PT2: Post – Test** (muestra final muestra inicial de agua residual del proceso de teñido de una empresa textil).
- **G.E:** Grupo Experimental

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

2.2.1. Población

La población de la presente investigación es el volumen total de agua residual de teñido proveniente de una empresa textil ubicada en el distrito de San Juan de Lurigancho, la cual posee una generación de aproximadamente 12,5 m³/h.

2.2.2. Muestra

La muestra de la presente investigación, es de 50 litros del agua residual proveniente del proceso de teñido de la empresa textil, la cual fue tomada en la jornada laboral diurna (7am – 3pm). El muestreo realizado es de tipo puntual, tomando en consideración al D.S. N° 010-2019-VIVIENDA “Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

2.2.3. Materiales

Para la elaboración del reactor tubular se emplearon los siguientes materiales:

Tabla 1

Materiales empleados para la elaboración del reactor para la fotocátalisis

Cantidad	Nombre	Descripción
1 unidad	Tapa superior	32 cm de diámetro de acrílico de 3 mm
1 unidad	Tapa media	30 cm de diámetro de acrílico de 3 mm
1 unidad	Tapa inferior	32 cm de diámetro de acrílico de 3 mm
1 unidad	Bombilla UV	36 W
8 metros	Manguera	5 mm
3 unidades	Sinfín	1 m de largo
36 unidades	Tuercas	N° 10
1 unidad	Bomba de agua	24 v
1 unidad	Motor	24 v
1 unidad	Hélice	De plástico

1 unidad	Puente de diodo	3A
2 metros	Cables mellizos	N° 14
1 unidad	Socket para foco	De plástico
1 unidad	Recipiente	Capacidad de 2 L
3 unidades	Switch	De bloque funcionamiento
1 unidad	Enfuche macho	bifásico
1 metro	Cable	Aislante para 220 v
1 plancha	Foam	Espesor de 5 mm

Se detallan todos los materiales que se usaron para la elaboración del reactor tubular.

2.2.4. Instrumentos

Según Cardona (2002) , un instrumento de recolección de datos e información es un recurso metodológico que se materializa mediante un dispositivo o formato (impreso o digital) que se utiliza para obtener, registrar o almacenar los aspectos relevantes del estudio o investigación de las fuentes indagadas.

Correspondiente a la técnica de recolección de datos en campo y experimentales se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Cadena de Custodia para el muestreo del agua residual del proceso de teñido de la empresa textil, la cual se empleará para poder dar seguimiento a las muestras (Anexo N°26)
- Ficha de Registro de toma de muestra de la empresa textil (Anexo N° 27)
- Ficha de resultados de los ensayos experimentales (Anexo N°28, N° 29 y N° 30)

Así mismo se emplearon los instrumentos de medición electrónicos, los cuales nos permiten obtener los datos más confiables de la investigación:

- Conductímetro
- pHmetro
- Balanza Electrónica.

2.2.5. Métodos

Para poder realizar la presente investigación se llevaron a cabo las siguientes 4 etapas:

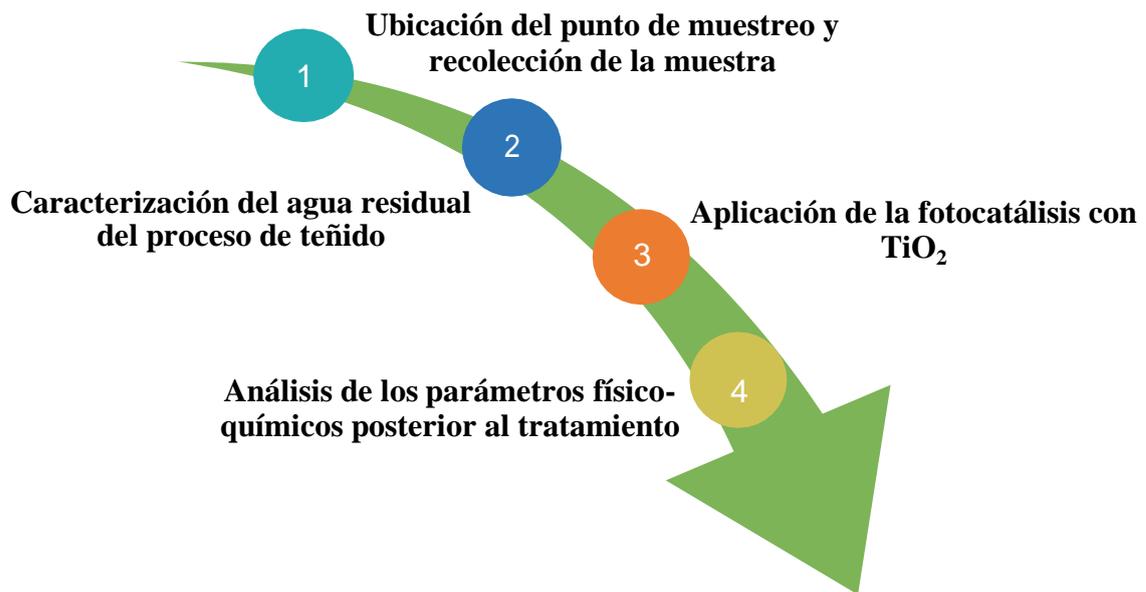


Figura 1. Etapas de la investigación, la primera etapa corresponde a la ubicación del punto de muestreo y la recolección de la muestra, la cual se ejecutó siguiendo el protocolo de muestreo, en segundo lugar, se realizó la caracterización del agua residual del proceso de teñido extraído de la empresa textil, a partir de la cual se evaluaron los 4 parámetros más significativos, posteriormente se realizó la aplicación del tratamiento por fotocátalisis con TiO_2 , basada en información recopilada por investigaciones previas y finalmente se analizaron los parámetros físico-químicos del agua residual posterior al tratamiento.

2.3 Procedimiento

2.3.1. Ubicación del punto de muestreo y recolección de la muestra

La ubicación del punto de muestreo fue tomada al final de la descarga del agua residual del proceso de teñido, la cual es almacenada en especie de piscinas para realizar una regulación de pH y posteriormente ser desembocadas a la línea de alcantarillado. Se tomará únicamente un punto de muestreo en un tiempo específico, ya que solo se

extraerá una muestra puntual al azar según lo indicado en el D.S. N° 010-2019-VIVIENDA “Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario”.

Esta muestra representa la composición del agua original para el lugar, tiempo y circunstancias particulares en las que se realizó su captación (Instituto de Toxicología de la Defensa, 2016) .

La muestra fue recolectada en tres botellas de 250 ml, la cual estaba esterilizada, enjuagada con la misma muestra para que no se altere los datos y debidamente etiquetada, para posteriormente ser trasladada en un cooler al laboratorio de la Universidad Privada del Norte para realizar la medición de los parámetros físico-químicos.

2.3.2. Caracterización del agua residual del proceso de teñido

La muestra extraída fue caracterizada en el laboratorio de biología de la Universidad del Norte, donde se evaluaron los parámetros físico-químicos (pH y conductividad), a excepción de la demanda química de oxígeno (DQO) y color que fueron analizados en el laboratorio externo “Environmental Quality Analytical Services S.A.”. Los parámetros pH y DQO se toman en consideración para realizar la caracterización del agua residual del proceso de teñido, debido a ser mencionados en el D.S.010-2019-VIVIENDA , donde se precisan los parámetros a evaluar referente a cada actividad económica por procesos productivos (Véase Tabla 1) que caracterizan a un efluente no doméstico, debido a la concentración de elementos, sustancias o parámetros físico y/o químicos, ya que si exceden los parámetros aprobados , provocan daño inmediato o progresivo a las instalaciones , infraestructura sanitaria. Correspondiente a los parámetros de color y conductividad estos son considerados a ser evaluados, ya que

según el Instituto de Tecnología Industrial (2015) son parámetros muy característicos de las aguas residuales textiles, a pesar de la gran variedad de procesos y de productos químicos utilizados, las aguas residuales producidas en la industria de fibras naturales presentan unas características comunes, a excepción de los procedentes del lavado de la lana.

Tabla 2

Parámetros físico-químicos de los Valores Máximos Admisibles

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA de descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	DQO	1000
pH	unidad	pH	6-9

Fuente: Ministerio de Vivienda (2019).

La determinación del valor de cada parámetro se realiza con un procedimiento distinto, los cuales se mencionan a continuación:

- Conductividad

La conductividad eléctrica depende de la concentración y naturaleza de los iones y de la temperatura y viscosidad de la solución (INTI, 2015).

La determinación se llevó a cabo mediante el empleo del conductímetro, el cual se verificó previamente que este calibrado.

- pH

Se realizó mediante el empleo del pHmetro, el cual se verificó previamente que este calibrado, a continuación, se procedió a introducir el sensor en la botella de 250 ml

donde se encuentra la muestra, y se esperó a que automáticamente se genere la lectura por el instrumento.

2.3.3. Aplicación de la fotocátalisis con TIO_2

a) Construcción y acondicionamiento del fotoreactor

Para el desarrollo de la investigación se empleó un sistema que incluye un reactor tubular espiral con recirculación de la muestra, que está conformado por 3 discos de acrílico (sujetos por 6 sinfines) y 1 soporte interno del mismo material, por el cual circula una manguera de 5 mm, que posee dos orificios (entrada y salida). El primer orificio se emplea para poder realizar la alimentación desde un tanque de 2L, mediante el empleo de una bomba de agua de 24 v. Así mismo al interior del soporte del reactor se encuentra una lámpara (UV) de 36 w, que sirve como fuente de energía, para que se produzca la reacción con el dióxido de titanio (TIO_2), el cual es incorporado en el tanque de 2L que posee un sistema de agitación automático, comprendido por un motor de 24 v ubicado en la parte superior de la tapa y una hélice que se encuentra suspendida mediante una varilla de plástico de 5mm.

El orificio de salida de la manguera permite el retorno de la muestra al tanque de almacenamiento de 2L, produciéndose de esa manera la recirculación. Cabe mencionar que para el funcionamiento de la lámpara UV, la bomba de agua y el motor de 24 v, se emplearon 3 switch cada uno para cada componente. Así mismo, para regular el voltaje de 220 v (AC) a 24 v (AC) se utilizó un transformador y también un puente de diodo con la finalidad de convertir la corriente alterna (AC) de 24 v producida por el transformador por una corriente continua (DC) de 24 v que sirve de alimentación para el funcionamiento del reactor.

La temperatura no representa un papel significativo en la configuración del sistema, por lo que el aislamiento térmico no resulta necesario, pero si la implementación de

una superficie reflectante, para poder reflejar la luz hacia el interior del reactor y evitar pérdidas innecesarias, es por eso que la carcasa posee un recubierto de platino para un mejor aprovechamiento de la luz (UV).

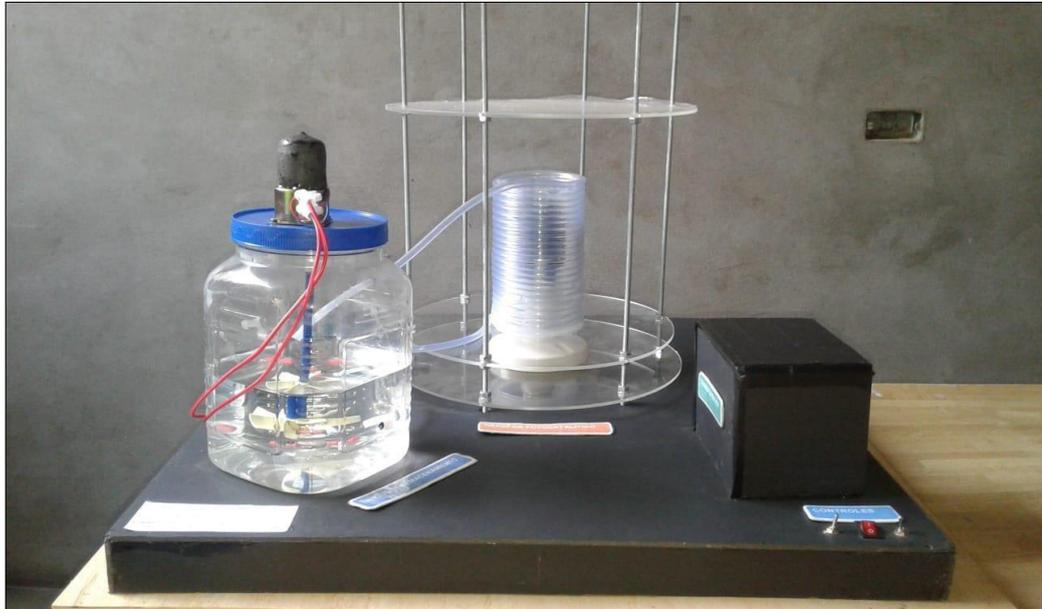


Figura 2. El prototipo de fotocátalisis acondicionado, cuenta con el tanque de almacenamiento con un sistema de agitación y el reactor tubular, el cual posee la lámpara de luz UV.

Cabe recalcar que, para poder construir el reactor tubular espiral, el diseño fue basado en la investigación realizada por Ramírez (2013), al cual se le hicieron algunas modificaciones en cuanto a implementar un tanque de almacenamiento con un sistema de agitación automática y la configuración de algunas características del reactor.

En el caso del proceso heterogéneo en fase acuosa con el catalizador TiO_2 , es muy importante diseñar el sistema evitando cualquier posible sedimentación del catalizador, ya que esto puede ocurrir si se alcanza un flujo laminar en alguna zona del sistema. Es en tal sentido, que para poder construir el prototipo, se consideró la turbulencia, ya que uno de los principales requerimientos del reactor tubular es que

opere en la región turbulenta, esto significa a números de Reynolds iguales o por encima de 4000. Por lo cual, se empleó la ecuación de Reynolds, con la finalidad de poder garantizar el adecuado funcionamiento del equipo.

Formula de Reynolds

$$\text{NRe} = \frac{(\varnothing \times Vs \times D1)}{u}$$

Ecuación 1. Número de Reynolds.

- **NRe:** Número adimensional de Reynolds.
- \varnothing : Densidad del fluido.
- **Vs :** Velocidad del fluido.
- **D1:** Diámetro de la tubería por la que fluye el fluido.
- **u :** Viscosidad dinámica del fluido.

$$\text{NRe} = \frac{(998.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.81 \text{ m/s} \times 0.005 \text{ m})}{1.0 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2}$$

$$\text{NRe} = 4042.71$$

4000 < NRe: Zona de régimen turbulento

Así mismo se consideró importante determinar el volumen del reactor, con la finalidad de poder conocer su capacidad. Para poder hallar el volumen se segmentó el reactor en 3 partes (entrada de la manguera, número de anillos y la salida de la manguera), por lo cual se consideraron a los siguientes criterios:

- **Diámetro interno:**

$$8.70 \text{ cm} = \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} = 87 \text{ mm}$$

- **Perímetro interno de la circunferencia (una vuelta):**

$$\pi \times 87 \text{ mm} = 273.33 \text{ mm o } 27.33 \text{ cm}$$

- **Área interna de la circunferencia:**

$$\pi = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

Ecuación 2. Área de la circunferencia.

$$= \frac{\pi \times 5 \text{ mm}^2}{4} = 19.63 \text{ mm}^2 \text{ o } 0.196 \text{ cm}^2$$

- **V1: Distancia entrada x área interna**

$$30 \text{ cm} \times 0.196 \text{ cm}^2 = 5.88 \text{ cm}^3$$

- **V2: Perímetro interno x área interna x N° de anillos**

$$27.332 \text{ cm} \times 0.196 \text{ cm}^2 \times 23 = 123.213 \text{ cm}^3$$

- **V3: Perímetro interno / 2 x área interna**

$$\frac{27.332 \text{ cm}}{2} \times 0.196 \text{ cm}^2 = 2.67 \text{ cm}^3$$

- **V4: Distancia salida x área interna**

$$35 \text{ cm} \times 0.196 \text{ cm}^2 = 6.86 \text{ cm}^3$$

- **Total: V1 + V2 + V3 + V4**

$$5.88 \text{ cm}^3 + 123.213 \text{ cm}^3 + 2.67 \text{ cm}^3 + 6.86 \text{ cm}^3 = 138.6 \text{ cm}^3 = 138.6 \text{ cm}^3$$

$$138.6 \text{ cm}^3 = 138.6 \text{ ml}$$

A continuación, se muestra la parte interna del reactor tubular espiral, en la cual se visualiza con mayor detalle a la manguera de plástico en forma de espiral y la lámpara de luz ultravioleta de 26 w (Figura N° 3). Así mismo se muestran los 3 discos de acrílico de (32 mm, 30 mm y 32 mm de diámetro) (Figura N° 4) y la configuración del circuito del prototipo fotocatalítico (Figura N° 5).

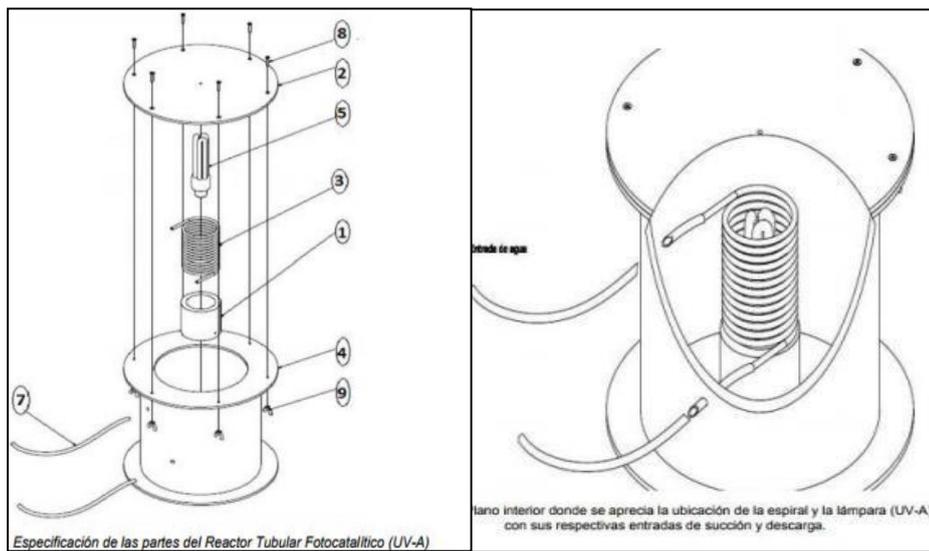


Figura 3. Especificaciones de las paredes del reactor tubular fotocatalítico.

Fuente: Ramírez (2013)

Aplicación de la fotocatalisis con dióxido de titanio para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de teñido de una empresa textil.

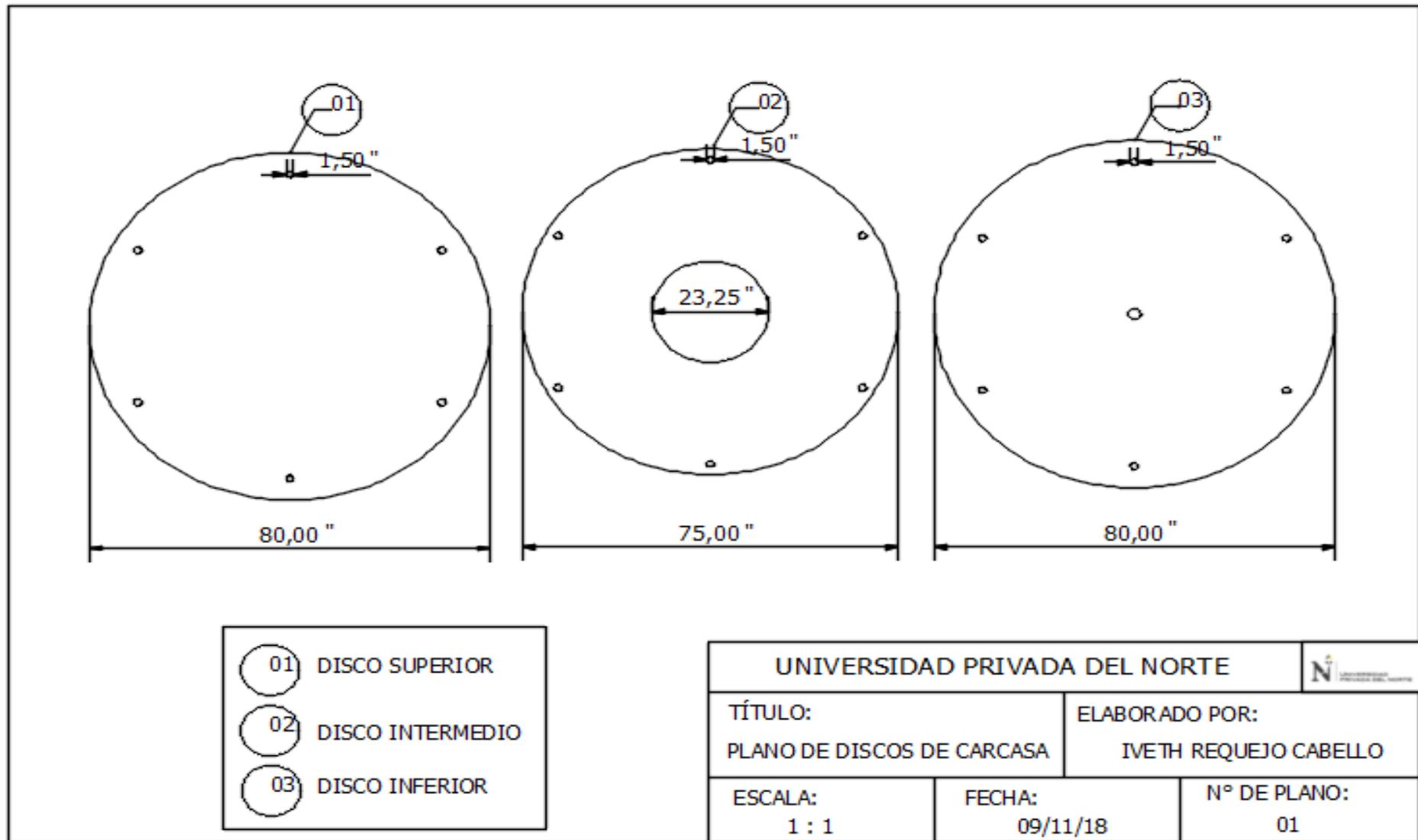


Figura 4. Especificaciones de los tres discos del reactor tubular fotocatalítico.

“Reducción de los parámetros fisicoquímicos mediante fotocatalisis con dióxido de titanio para el tratamiento del agua residual del proceso de teñido de una empresa textil en el año 2018”

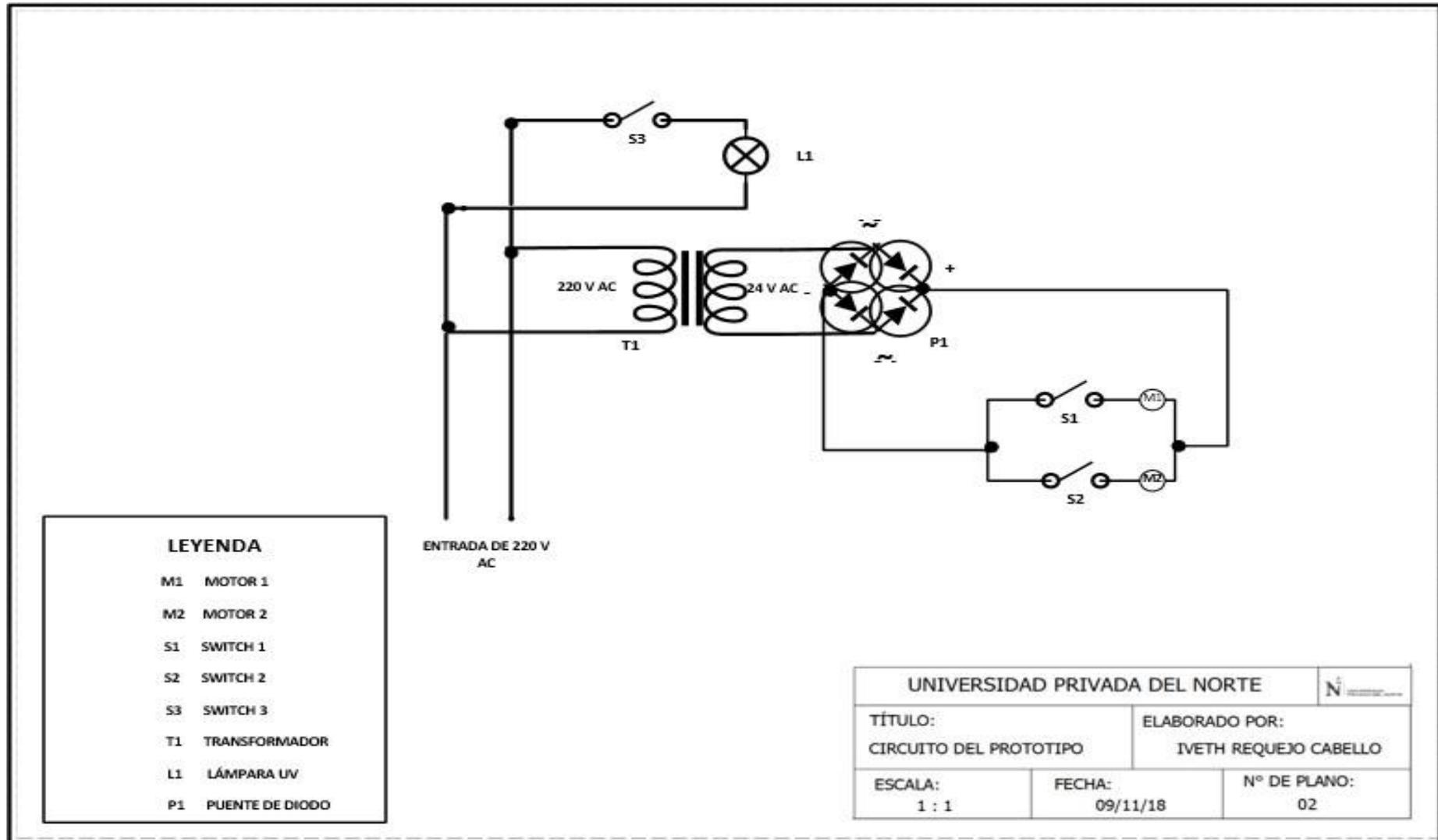


Figura 5. Circuito del prototipo de fotocatalisis.

b) Tratamiento fotocatalítico con TiO₂

Se aplicaron 4 tratamientos los cuales fueron al emplear una concentración de 100 mg/l de TiO₂, 300 mg/l de TiO₂, 500 mg/l de TiO₂ y 1000 mg/l de TiO₂ con un tiempo de exposición a 1,2,3 y 4 h, realizándose 16 ensayos por triplicado en total, para los cuales se empleó un volumen igual de 1L del agua residual extraída del proceso de teñido. Para cada uno de los tratamientos se realizó la medición de los parámetros físico-químicos (color, conductividad, DQO y pH).

Por lo cual es necesario desarrollar la siguiente matriz en la toma de datos, con la siguiente distribución:

Tabla 3
Tratamientos para la experimentación

	N° de repeticiones: 3	Tiempo de duración del proceso de fotocatalisis (horas)			
		1	2	3	4
Concentración de dióxido de titanio (mg/l)	100	T _{1.1.1}	T _{1.2.1}	T _{1.3.1}	T _{1.4.1}
		T _{1.1.2}	T _{1.2.2}	T _{1.3.2}	T _{1.4.2}
		T _{1.1.3}	T _{1.2.3}	T _{1.3.3}	T _{1.4.3}
	300	T _{2.1.1}	T _{2.2.1}	T _{2.3.1}	T _{2.4.1}
		T _{2.1.2}	T _{2.2.2}	T _{2.3.2}	T _{2.4.2}
		T _{2.1.3}	T _{2.2.3}	T _{2.3.3}	T _{2.4.3}
	500	T _{3.1.1}	T _{3.2.1}	T _{3.3.1}	T _{3.4.1}
		T _{3.1.2}	T _{3.2.2}	T _{3.3.2}	T _{3.4.2}
		T _{3.1.3}	T _{3.2.3}	T _{3.3.3}	T _{3.4.3}
	1000	T _{4.1.1}	T _{4.2.1}	T _{4.3.1}	T _{4.4.1}
		T _{4.1.2}	T _{4.2.2}	T _{4.3.2}	T _{4.4.2}
		T _{4.1.3}	T _{4.2.3}	T _{4.3.3}	T _{4.4.3}

Se detallan cuáles son los tratamientos a emplear a diferentes tiempos y concentraciones de TiO₂.

El tratamiento en el reactor fotocatalítico consiste en que 1L de la muestra del agua residual ingresa al tanque de almacenamiento de 2L, que posee un sistema de agitación constante, en el cual se mezcla con el dióxido de titanio. Continuando con

el proceso esta solución pasa por la bomba de agua para ser trasladada al reactor fotocatalítico en el cual es expuesto a una lámpara UV de 36 W para poder activar al TiO_2 . Este prototipo posee un sistema de recirculación por ende el ensayo se realizó hasta finalizar con el tiempo establecido.

Cabe mencionar que en los ensayos realizados durante los primeros 15 minutos la lámpara UV permaneció apagada para permitir el fenómeno de adsorción del colorante sobre el catalizador (TiO_2).

Finalmente, al terminar con cada tratamiento se procedió a filtrar cada muestra con el empleo del papel filtro con la finalidad de eliminar el precipitado formado.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 Resultados del análisis inicial del agua residual del proceso de teñido de la empresa textil

Se determinaron los valores iniciales de los parámetros DQO, pH, conductividad y color del agua residual del proceso de teñido de la empresa textil, los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 4

Características iniciales del agua residual de la empresa textil

Parámetros	Concentración				Unidad de medida
	R*1	R*2	R*3	PROMEDIO	
DQO	1100	1100	1100	1100	mg/L
pH.	8.41	8.39	8.40	8.40	Unidad de pH.
Conductividad	2100	2100	2100	2100	us/cm
Color	560	560	560	560	UC

Se observa que los valores iniciales de los parámetros físico-químicos del agua residual del proceso de teñido de la empresa textil.

3.2 Resultados del análisis posterior a los tratamientos por fotocátalisis

A continuación, se detallan los valores obtenidos de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad, DQO y color) a diferentes concentraciones de TiO_2 y tiempos:

Tabla 5

Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados	Unidad
---------	--------	------------	--------

		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 1 100 mg/L	1 hora	8.32	8.32	8.31	8.32	unidad de pH
	2 hora	8.3	8.3	8.3	8.3	unidad de pH
	3 hora	8.17	8.15	8.15	8.16	unidad de pH
	4 hora	8.11	8.13	8.11	8.12	unidad de pH

Donde, R*es Repetición.

Se observa que el valor promedio del pH posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 100 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 8.32 a 1 hora, 8.3 a 2 horas, 8.16 a 3 horas y 8.12 a 4 horas.

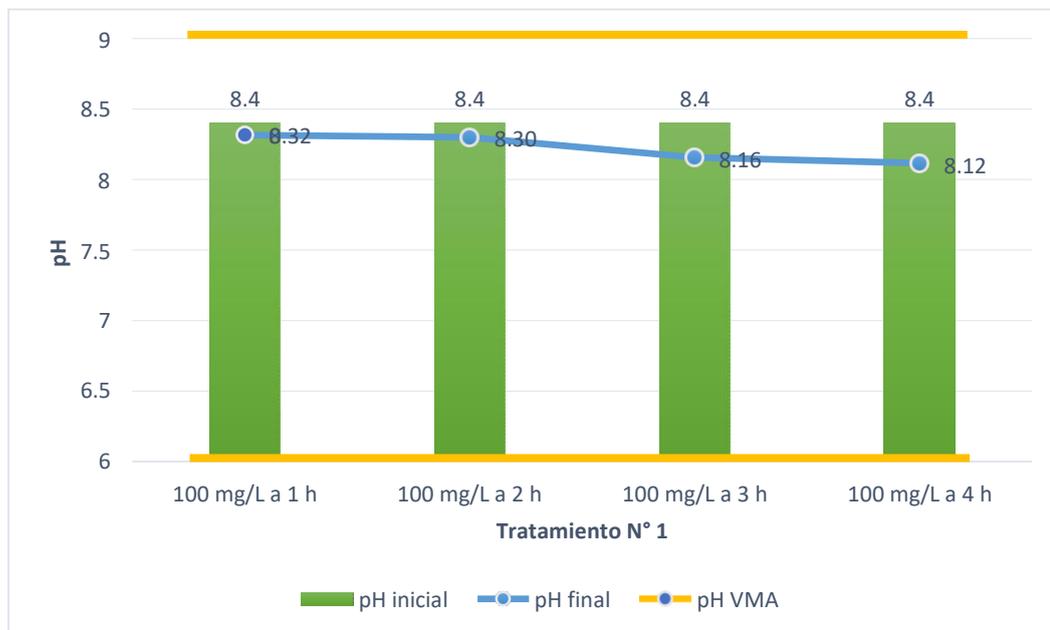


Figura 6. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 1, se evidencia que el pH inicial del agua residual del proceso de teñido no supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 100 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (8.12) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 6

Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO₂

Muestra	Tiempo	Resultados	Unidad
		R*1	R*2
		R*3	Promedio

Concentración 2 300 mg/L	1 hora	8.02	8.01	8.01	8.01	unidad de pH
	2 hora	7.97	7.99	7.97	7.98	unidad de pH
	3 hora	7.81	7.81	7.81	7.81	unidad de pH
	4 hora	7.8	7.8	7.78	7.79	unidad de pH

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del pH posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 300 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 8.01 a 1 hora, 7.98 a 2 horas, 7.81 a 3 horas y 7.79 a 4 horas.

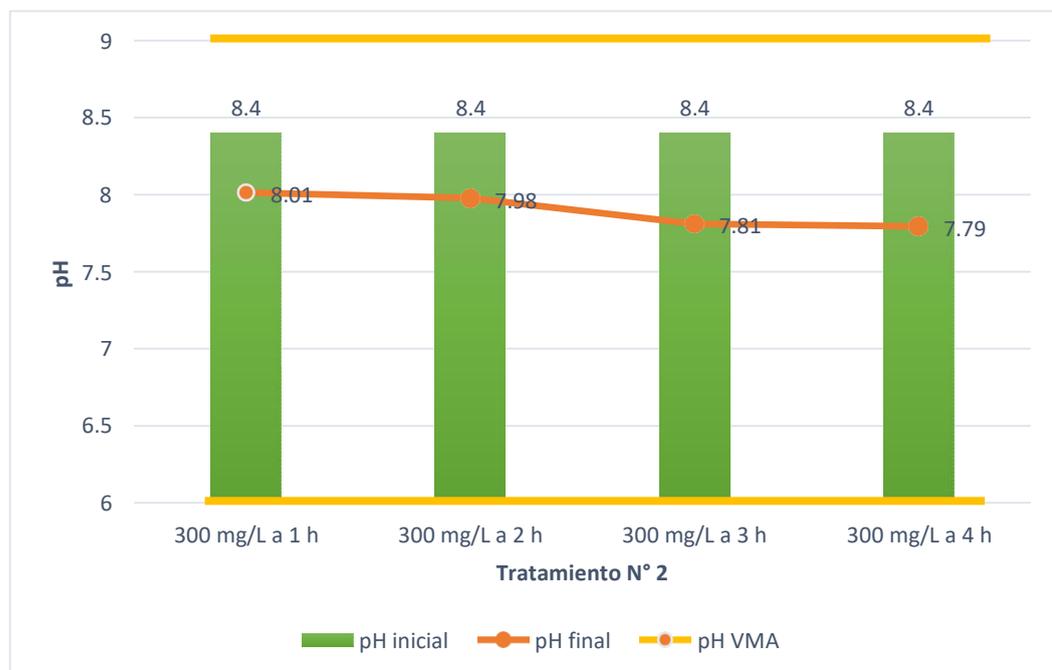


Figura 7. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 2, se evidencia que el pH inicial del agua residual del proceso de teñido no supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 300 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (7.79) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 7

Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO₂

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	

Concentración	1 hora	7.54	7.54	7.55	7.54	unidad de pH
3 500 mg/L	2 hora	7.54	7.53	7.53	7.53	unidad de pH
	3 hora	7.5	7.5	7.5	7.50	unidad de pH
	4 hora	7.5	7.48	7.47	7.48	unidad de pH

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del pH posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 500 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 7.54 a 1 hora, 7.53 a 2 horas, 7.50 a 3 horas y 7.48 a 4 horas.

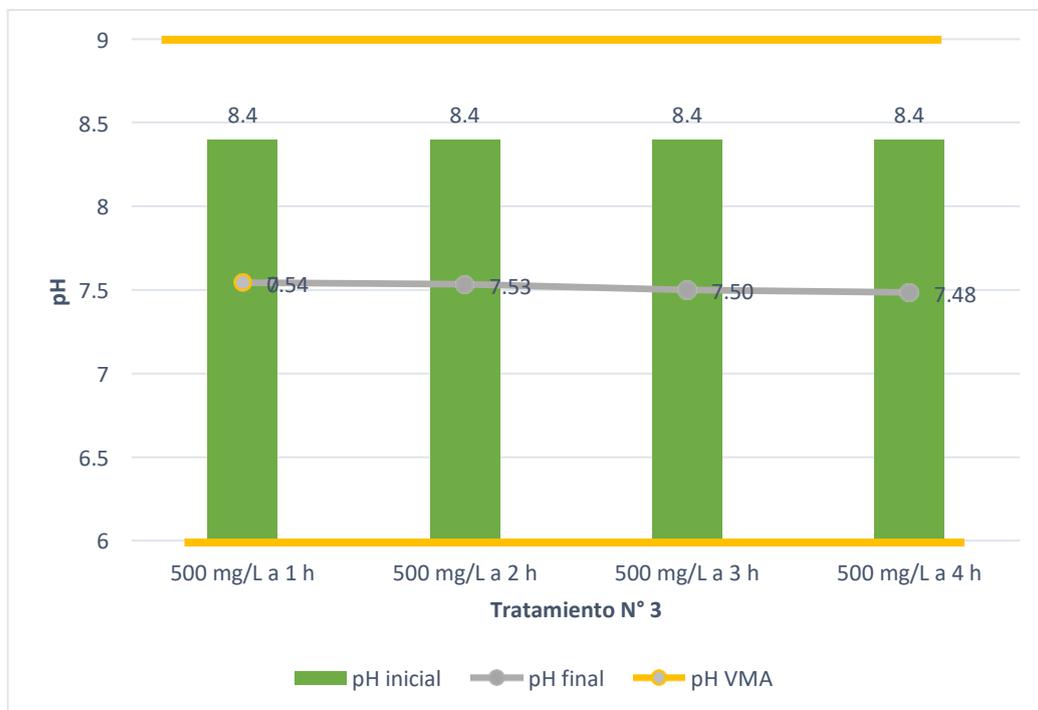


Figura 8. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 3, se evidencia que el pH inicial del agua residual del proceso de teñido no supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 500 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (7.48) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 8

Resultado del pH en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO₂

Muestra	Tiempo	Resultados	Unidad
		R*1 R*2 R*3 Promedio	

Concentración	1 hora	7.47	7.45	7.45	7.46	unidad de pH
4 1000 mg/L	2 hora	7.47	7.44	7.46	7.5	unidad de pH
	3 hora	7.43	7.44	7.44	7.44	unidad de pH
	4 hora	7.45	7.44	7.44	7.44	unidad de pH

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del pH posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 1000 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 7.46 a 1 hora, 7.5 a 2 horas, 7.40 a 3 horas y 7.44 a 4 horas.



Figura 9. Comparación del pH final e inicial con el VMA del pH al emplear tratamiento N° 4, se evidencia que el pH inicial del agua residual del proceso de teñido no supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 1000 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (7.44) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

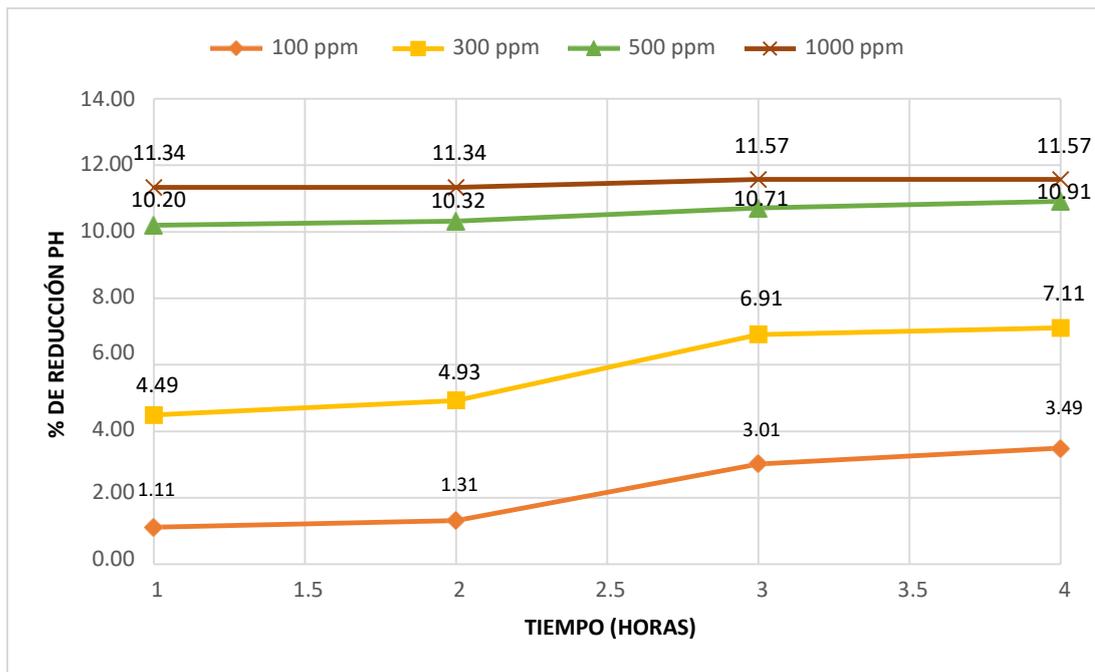


Figura 10. % de reducción del pH en el proceso fotocatalítico, se muestran los resultados experimentales obtenidos correspondiente al pH en diferentes tiempos y concentraciones, de los cuales se evidencian mejores resultados cuando la concentración del TiO_2 es 1000 mg/L y en un tiempo de exposición de 3 y 4 horas, ya que ocurrió un mayor % de reducción de 11.57.

Tabla 9

Resultado de la conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 1 100 mg/L	1 hora	1910	1911	1911	1911	us/cm
	2 hora	1890	1890	1890	1890	us/cm
	3 hora	1873	1873	1871	1872	us/cm
	4 hora	1859	1859	1859	1859	us/cm

Nota: Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio de la conductividad posterior a realizarse el tratamiento por fotocatalisis con una concentración de 100 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 1911 us/cm a 1 hora, 1890 us/cm a 2 horas, 1872 us/cm a 3 horas y 1872 us/cm a 4 horas.

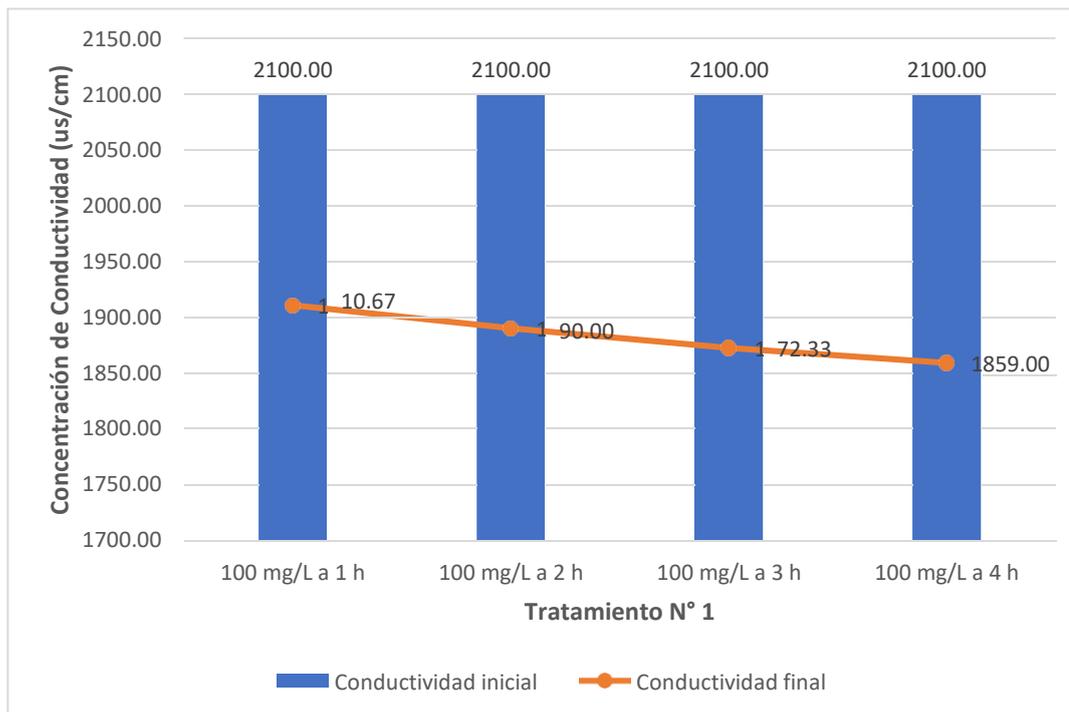


Figura 11. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 1, se evidencia que la conductividad inicial 2100 us/cm a medida que se aplicó la concentración de 100 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (1859 us/cm) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 10

Resultado de la conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 2 300 mg/L	1 hora	1741	1741	1741	1741	us/cm
	2 hora	1690	1691	1691	1691	us/cm
	3 hora	1672	1671	1671	1671	us/cm
	4 hora	1635	1637	1637	1636	us/cm

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio de la conductividad posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 300 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 1741 us/cm a 1 hora, 1691 us/cm a 2 horas, 1671 us/cm a 3 horas y 1636 us/cm a 4 horas.

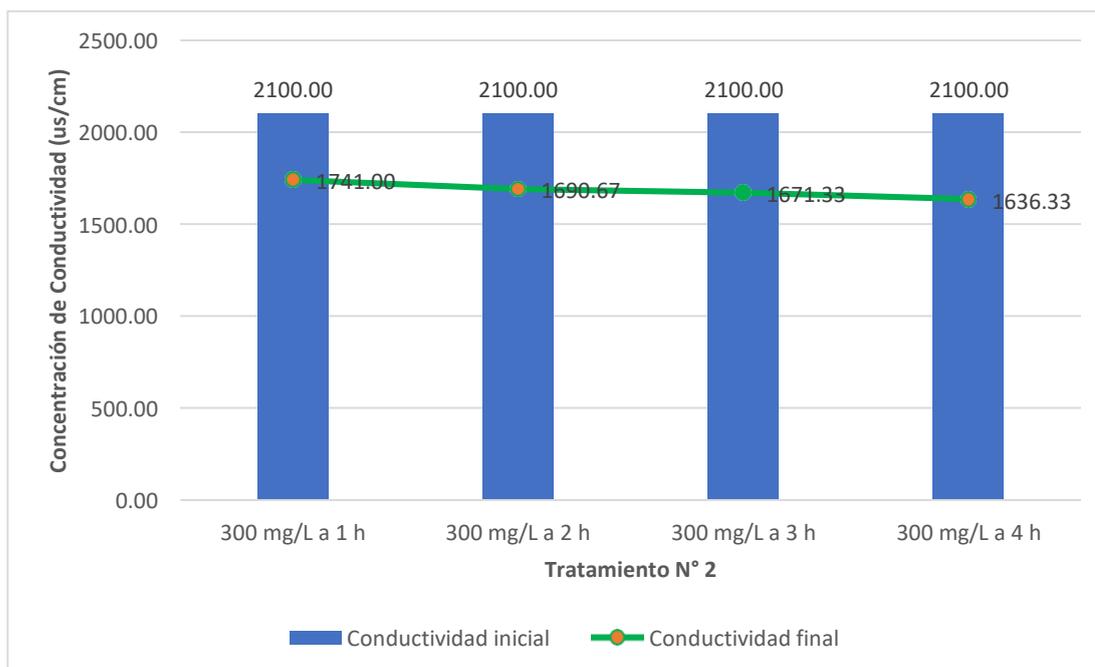


Figura 12. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 2, se evidencia que la conductividad inicial 2100 us/cm a medida que se aplicó la concentración de 300 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (1636.3 us/cm) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 11

Resultado de la conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
3 500 mg/L	1 hora	1564	1564	1564	1564.00	us/cm
	2 hora	1560	1561	1560	1560.33	us/cm
	3 hora	1511	1512	1513	1512.00	us/cm
	4 hora	1477	1476	1476	1476.33	us/cm

Nota: Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio de la conductividad posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 500 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 1564 us/cm a 1 hora, 1560 us/cm a 2 horas, 1513 us/cm a 3 horas y 1476 us/cm a 4 horas.

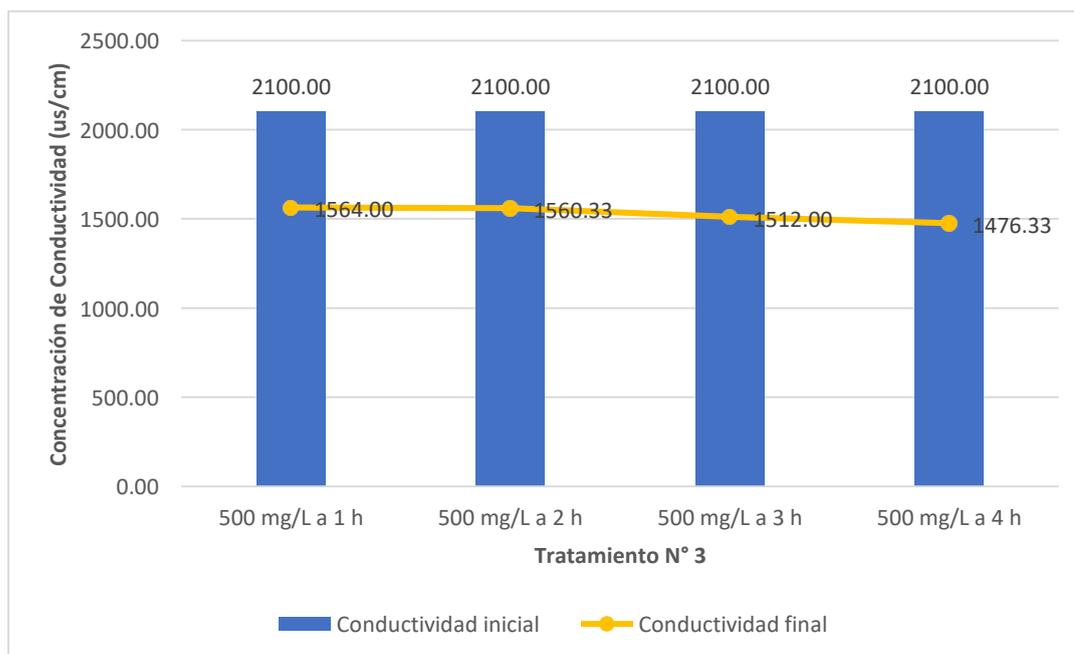


Figura 13. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 3, se evidencia que la conductividad inicial 2100 us/cm a medida que se aplicó la concentración de 500 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (1476.3 us/cm) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 12

Resultado de la conductividad en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
4 1000 mg/L	1 hora	1434	1434	1434	1434	us/cm
	2 hora	1397	1396	1396	1396	us/cm
	3 hora	1348	1348	1348	1348	us/cm
	4 hora	1281	1282	1281	1281	us/cm

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio de la conductividad posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 1000 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 1434 us/cm a 1 hora, 1396 us/cm a 2 horas, 1348 us/cm a 3 horas y 1281 us/cm a 4 horas.

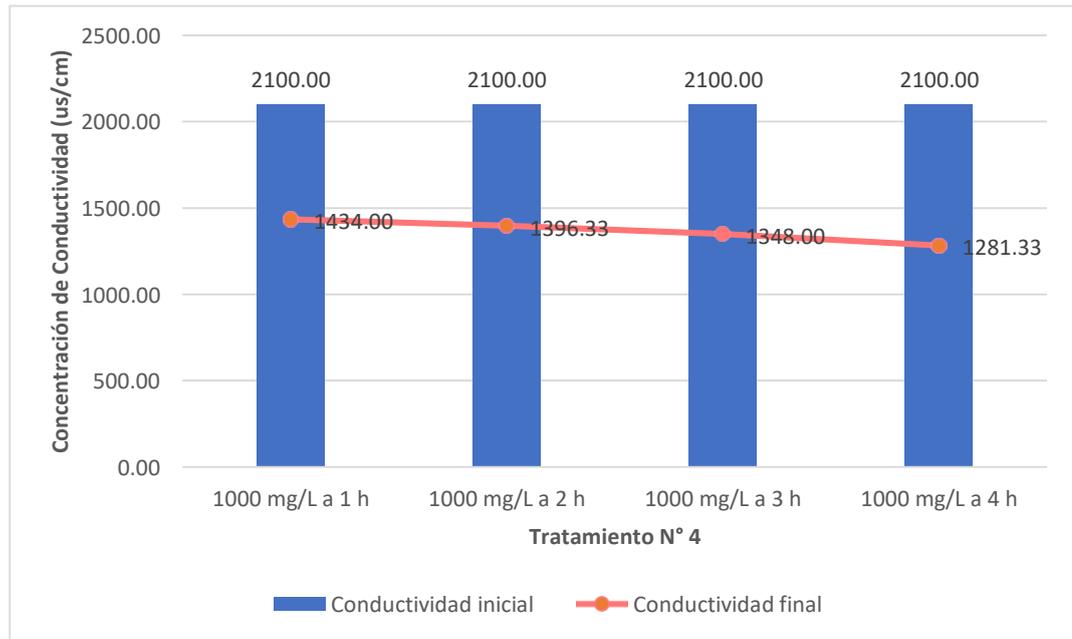


Figura 14. Comparación de la conductividad final e inicial al emplear tratamiento N° 4, se evidencia que la conductividad inicial 2100 us/cm a medida que se aplicó la concentración de 1000 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (1281.3 us/cm) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

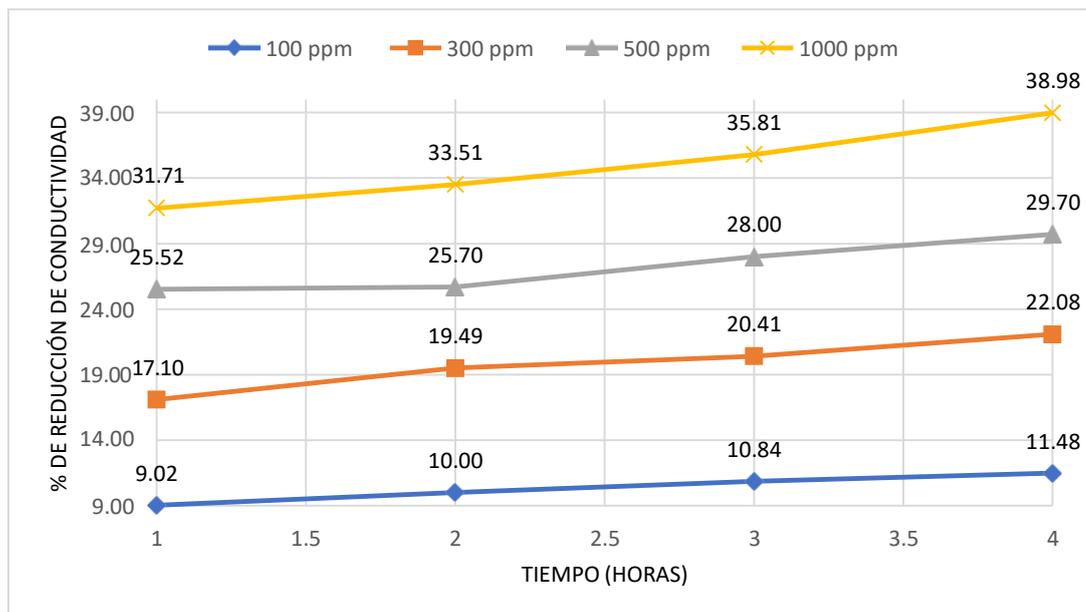


Figura 15. Variación de la conductividad (us/cm) en el proceso fotocatalítico, se observa que existe un aumento progresivo del % de reducción de la conductividad en cada tratamiento a diferentes concentraciones, y esta variación se evidencia desde la concentración a 100 ppm que la conductividad se reduce hasta 11.48% (1859 us/cm), en la concentración a 300 ppm que se reduce hasta 22.08% (1636 us/cm), en la concentración a 500 ppm que se reduce hasta 29.70% (1476 us/cm) y en la concentración a 1000 ppm que se reduce hasta 38.98% (1281 us/cm) todas en el lapso de tiempo 4 horas del tratamiento, ya que a las 3 primeras horas existe una menor reducción de dicho parámetro. Sin embargo, el ensayo que generó mejores resultados fue al emplear una concentración de 1000 mg/L de TiO₂ a 4 horas de exposición a la luz artificial, ya que la conductividad se redujo a 1281 us/cm es decir en un 38.98%.

Tabla 13

Resultado del DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 1 100 mg/L	1 hora	886	886	886	886	mg/L
	2 hora	868	866	866	867	mg/L
	3 hora	853	853	853	853	mg/L
	4 hora	827	829	827	828	mg/L

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del DQO posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 100 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 886 mg/L a 1 hora, 867 mg/L a 2 horas, 853 mg/L a 3 horas y 828 mg/L a 4 horas.

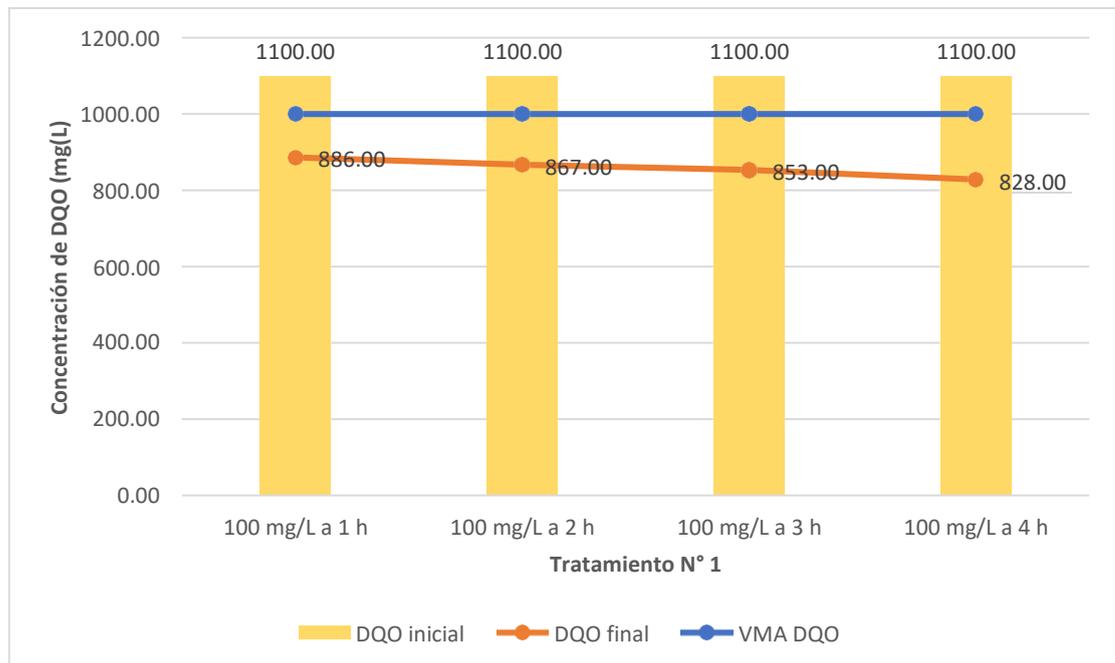


Figura 16. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA de la DQO al emplear tratamiento N° 1, se evidencia que la DQO de la muestra inicial del agua residual del proceso de teñido supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 100 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (828 mg/L) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 14

Resultado del DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO₂

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 2 300 mg/L	1 hora	659	659	659	659	mg/L
	2 hora	646	647	647	647	mg/L
	3 hora	629	628	629	629	mg/L
	4 hora	623	623	623	623	mg/L

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del DQO posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 300 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 659 mg/L a 1 hora, 647 mg/L a 2 horas, 629 mg/L a 3 horas y 623 mg/L a 4 horas.

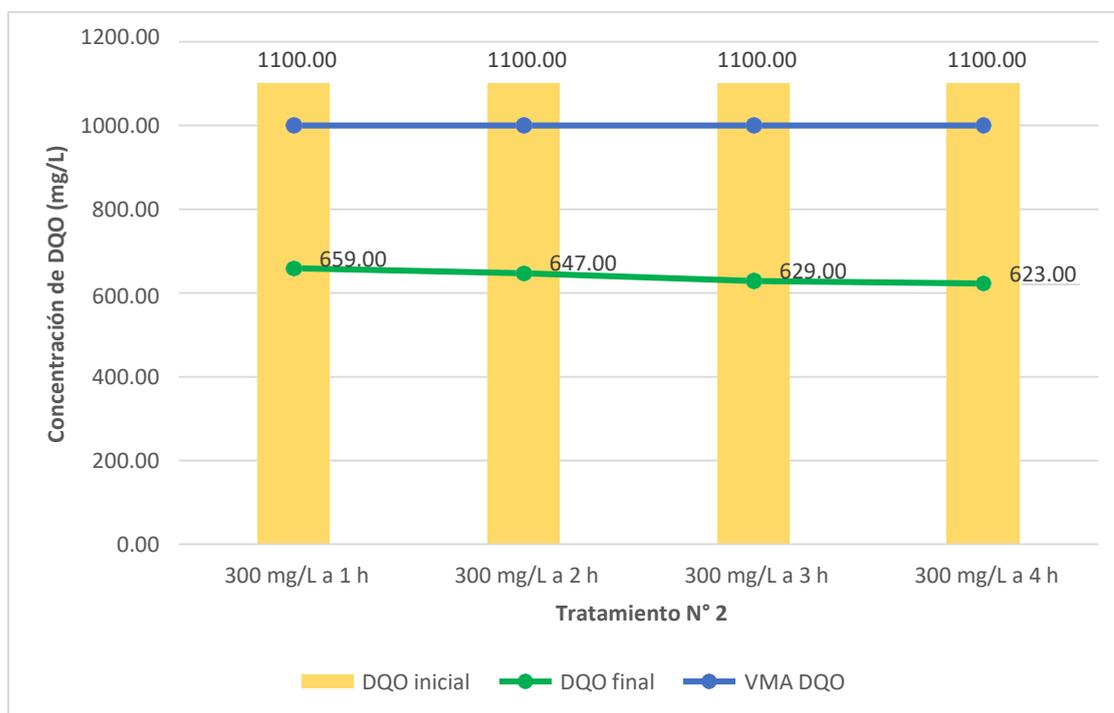


Figura 17. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA de la DQO al emplear tratamiento N° 2, se evidencia que la DQO de la muestra inicial del agua residual del proceso de teñido supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 300 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (623 mg/L) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 15

Resultado del DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 3 500 mg/L	1 hora	594	593	593	593	mg/L
	2 hora	554	554	554	554	mg/L
	3 hora	529	529	528	529	mg/L
	4 hora	501	501	501	501	mg/L

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del DQO posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 500 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 593 mg/L a 1 hora, 554 mg/L a 2 horas, 529 mg/L a 3 horas y 501 mg/L a 4 horas.

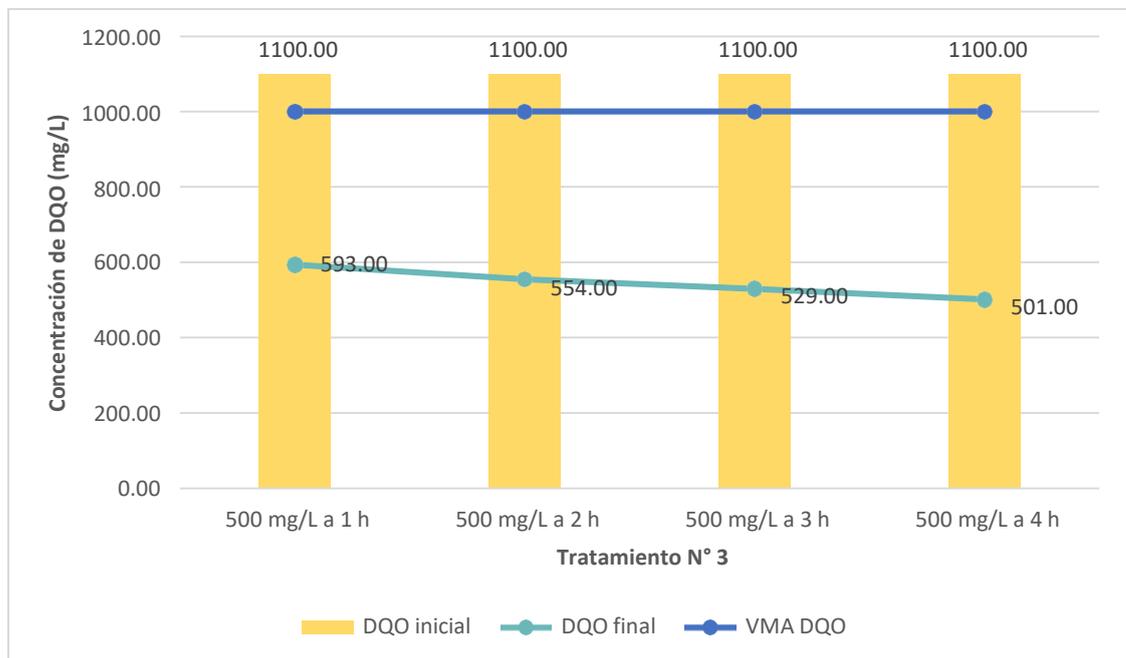


Figura 18. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA de la DQO al emplear tratamiento N° 3, se evidencia que la DQO de la muestra inicial del agua residual del proceso de teñido supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 500 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (501 mg/L) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 16

Resultado del DQO en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO₂

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 4 1000 mg/L	1 hora	490	490	490	490	mg/L
	2 hora	482	482	481	482	mg/L
	3 hora	480	480	480	480	mg/L
	4 hora	477	478	478	478	mg/L

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del DQO posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 1000 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 490 mg/L a 1 hora, 482 mg/L a 2 horas, 480 mg/L a 3 horas y 478 mg/L a 4 horas.

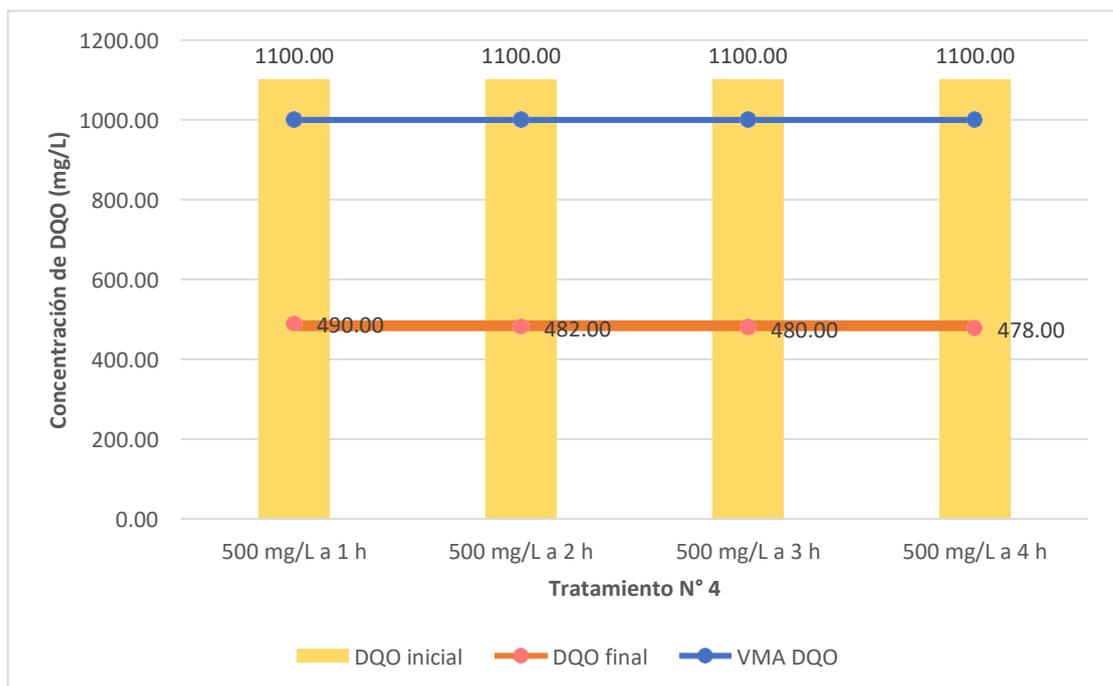


Figura 19. Comparación de la DQO final e inicial con el VMA de la DQO al emplear tratamiento N° 4, se evidencia que la DQO de la muestra inicial del agua residual del proceso de teñido supera el VMA, sin embargo, a medida que se aplicó la concentración de 1000 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición el pH fue disminuyendo siendo el menor resultado (478 mg/L) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

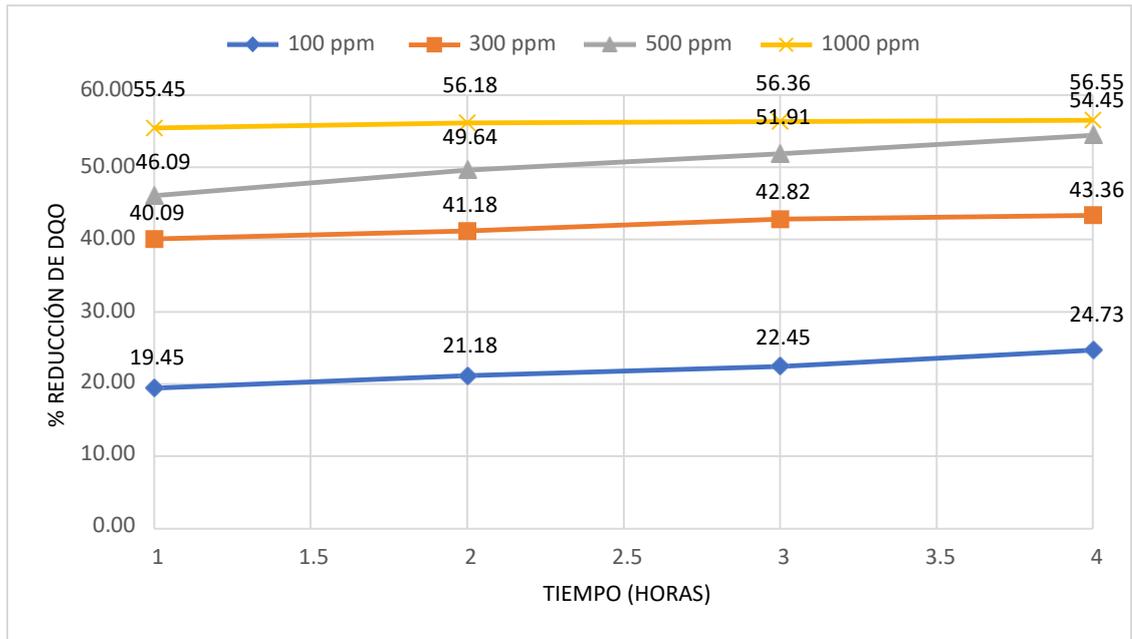


Figura 20. Variación del % de degradación del DQO en el proceso fotocatalítico, se observan los resultados experimentales obtenidos de la degradación del DQO mediante el empleo de la fotocatalisis empleando diferentes concentraciones de TiO_2 y tiempos, siendo el más óptimo utilizando 1000 mg/L del catalizador en un tiempo de exposición de 4 horas, ya que existió un % más óptimo de reducción del DQO que fue 56.55%. logrando una disminución de 1100 mg/L a 478 mg/L a diferencia de los otros ensayos.

Tabla 17

Resultado del color en el proceso fotocatalítico a concentración de 100 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 100 mg/L	1 hora	444	444	444	444	UC
	2 hora	440	440	440	440	UC
	3 hora	438	438	438	438	UC
	4 hora	430	430	430	430	UC

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del color posterior a realizarse el tratamiento por fotocatalisis con una concentración de 100 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 444 UC a 1 hora, 440 UC a 2 horas, 438 UC a 3 horas y 430 UC a 4 horas.

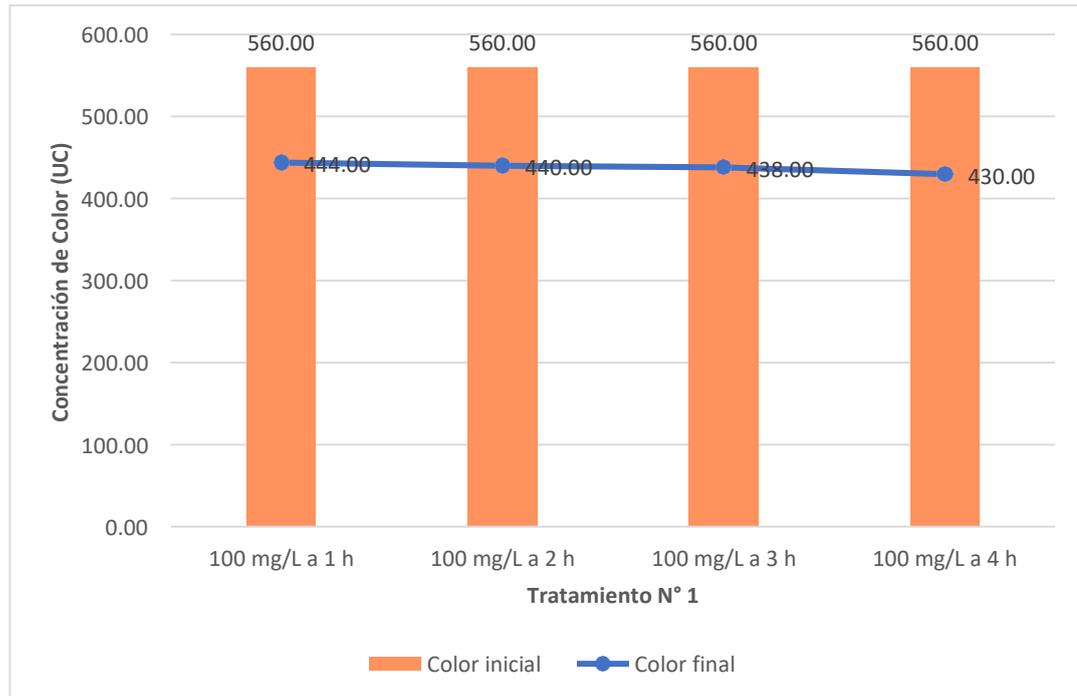


Figura 21. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 1, se evidencia que la concentración del color inicial del agua residual del proceso de teñido fue 560 UC y a medida que se aplicó la concentración de 100 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (430 UC) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 18

Resultado del color en el proceso fotocatalítico a concentración de 300 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
300 mg/L	1 hora	232	234	234	233	UC
	2 hora	216	216	216	216	UC
	3 hora	214	214	212	213	UC
	4 hora	210	210	210	210	UC

Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del color posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 300 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 233 UC a 1 hora, 216 UC a 2 horas, 213 UC a 3 horas y 210 UC a 4 horas.

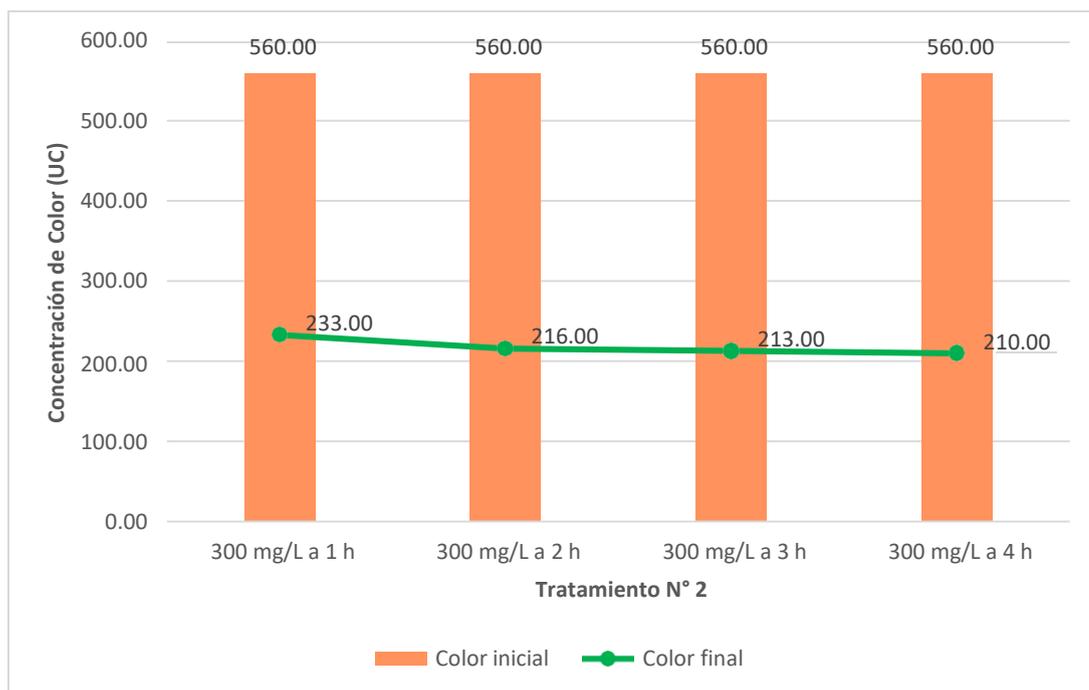


Figura 22. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 2, se evidencia que la concentración del color inicial del agua residual del proceso de teñido fue 560 UC y a medida que se aplicó la concentración de 300 mg/L de TiO_2 a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (210 UC) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 19

Resultado del color en el proceso fotocatalítico a concentración de 500 mg/l de TiO_2

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
3 500 mg/L	1 hora	68	68	68	68	UC
	2 hora	62	62	64	63	UC
	3 hora	58	58	58	58	UC
	4 hora	46	46	46	46	UC

Nota: Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del color posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 500 mg/L de TiO_2 en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 68 UC a 1 hora, 63 UC a 2 horas, 58 UC a 3 horas y 46 UC a 4 horas.

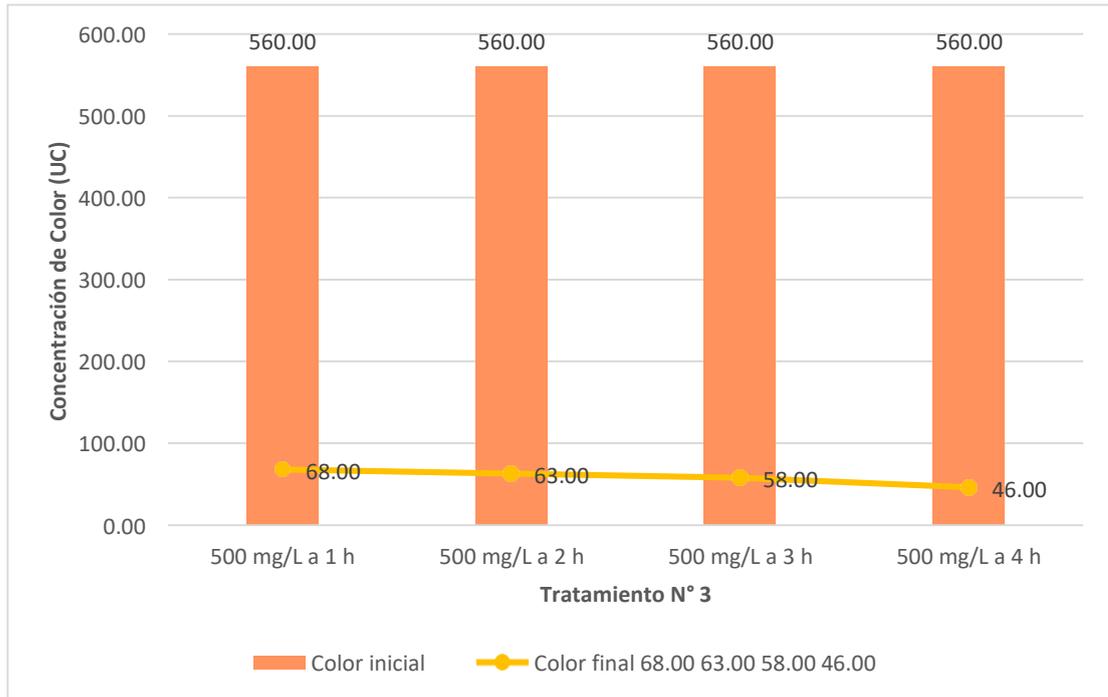


Figura 23. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 3, se evidencia que la concentración del color inicial del agua residual del proceso de teñido fue 560 UC y a medida que se aplicó la concentración de 500 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (46 UC) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

Tabla 20

Resultado del color en el proceso fotocatalítico a concentración de 1000 mg/l de TiO₂

Muestra	Tiempo	Resultados				Unidad
		R*1	R*2	R*3	Promedio	
Concentración 4 1000 mg/L	1 hora	30	28	30	28	UC
	2 hora	26	26	24	25	UC
	3 hora	20	20	20	20	UC
	4 hora	20	20	20	20	UC

Nota: Donde, R*es Repetición

Se observa que el valor promedio del color posterior a realizarse el tratamiento por fotocátalisis con una concentración de 1000 mg/L de TiO₂ en diferentes tiempos, ha disminuido proporcionalmente de 28 UC a 1 hora, 25 UC a 2 horas, 20 UC a 3 horas y 20 UC a 4 horas.

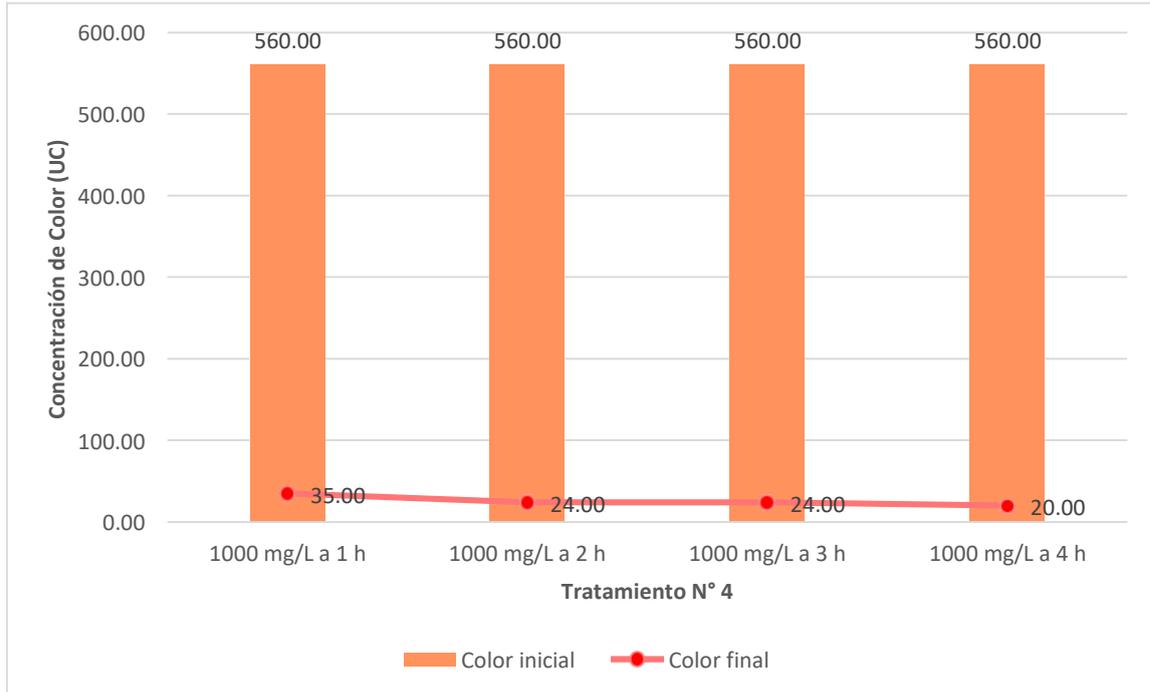


Figura 24. Comparación del color final e inicial al emplear tratamiento N° 4, se evidencia que la concentración del color inicial del agua residual del proceso de teñido fue 560 UC y a medida que se aplicó la concentración de 1000 mg/L de TiO₂ a diferentes tiempos de exposición, fue disminuyendo siendo el menor resultado (20 UC) al exponer la muestra a 4 horas de luz UV.

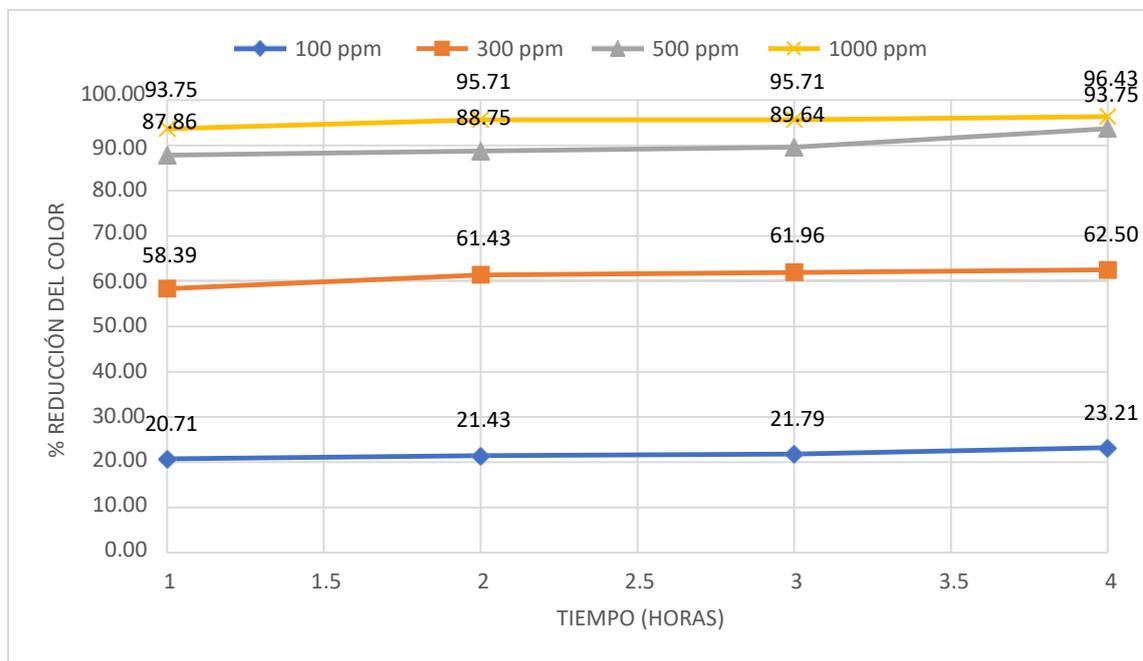


Figura 25. Variación del % de degradación del color en el proceso fotocatalítico, se detalla los resultados experimentales del % de degradación del color ocurrido producto a la aplicación de los 16 ensayos a diferentes concentraciones y tiempos, de los cuales se obtuvieron los resultados más significativos cuando se empleó 1000 ppm del catalizador en los diferentes tiempos (1 a 4 horas), ya que ocurrió una degradación de 93.75%, 95.71%, 95.71% y de 96.43%, siendo este último valor el % de reducción más óptimo.

Adicionalmente se realizó el análisis estadístico de los datos experimentales, empleando el análisis de varianza (ANOVA) de 2 factores, interacción de valores y optimización de respuesta, los cuales se detallan a continuación:

a) ANOVA para pH

- ✓ Ho: Al aplicar la fotocátalisis con TiO_2 no se reducirá significativamente la concentración del pH en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- ✓ Ha: Al aplicar la fotocátalisis con TiO_2 se reducirá significativamente la concentración del pH en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.

Tabla 21

Análisis de varianza de 2 factores (Concentración de TiO_2 & Tiempo) -pH

Análisis de Varianza						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Concentración de TiO_2 (mg/L)	3	1.55886	0.519621	192.14	0.000	
Tiempo (h)	3	0.04692	0.015641	5.78	0.017	
Error	9	0.02434	0.002704			
Total	15	1.63013				

Se observa que el valor arrojado por el P-value es menos a 0,05 es decir ($P < 0,05$), por ende, se niega la H_0 nula, que indica que todas las medias de pH en los grupos son iguales y se acepta la hipótesis alterna que establece que las medias de pH son distintas, ya que estas varían de acuerdo a la concentración del TiO_2 y tiempo del proceso fotocatalítico.

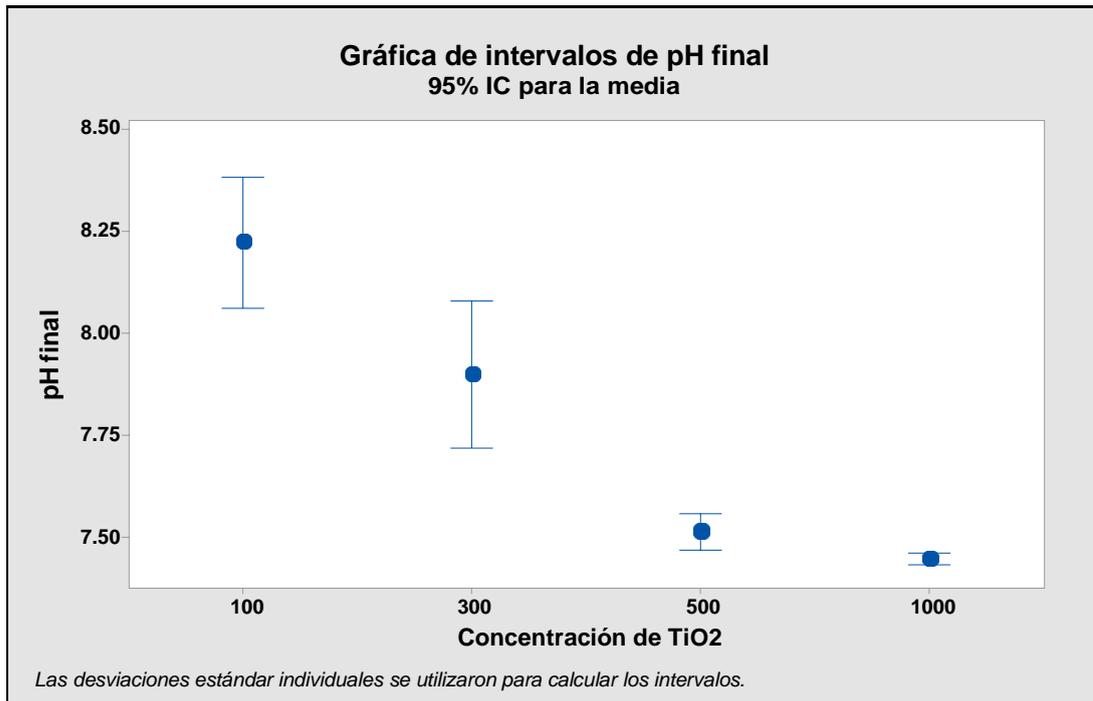


Figura 26. Gráfica de intervalos de pH vs la concentración de TiO₂, se evidencia que a medida que la concentración del catalizador aumenta, el pH se reduce.

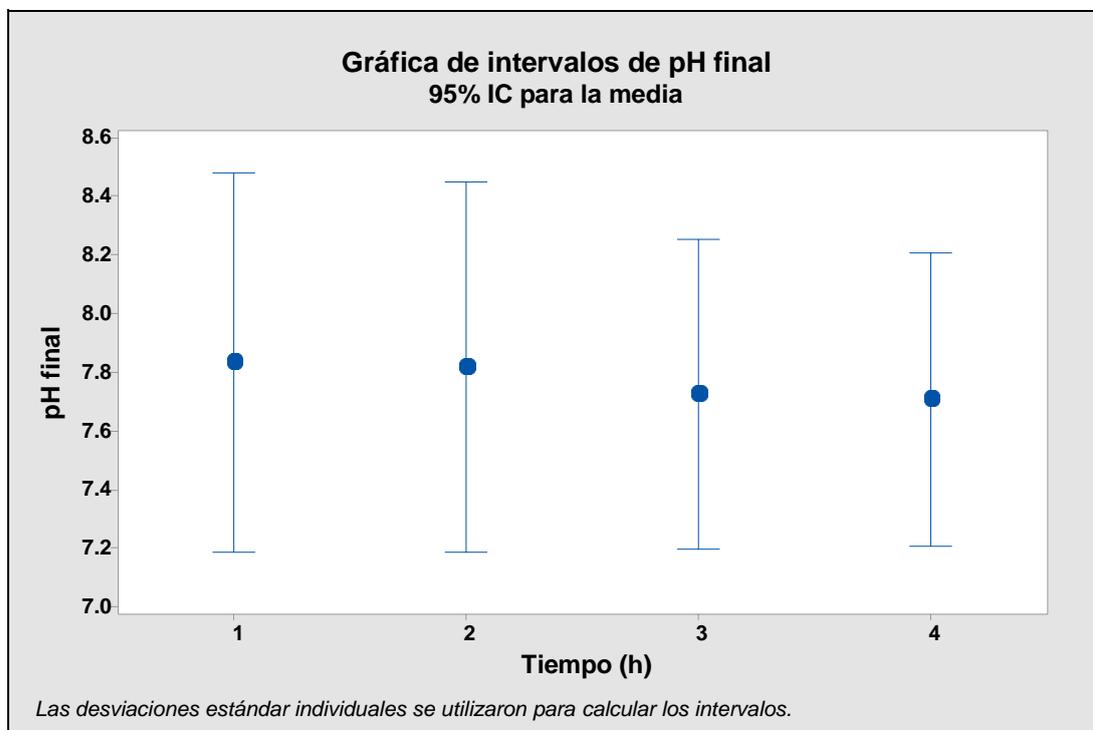


Figura 27. Gráfica de intervalos de pH vs el tiempo del proceso fotocatalítico, se evidencia que a medida que aumente el tiempo, el pH se reduce

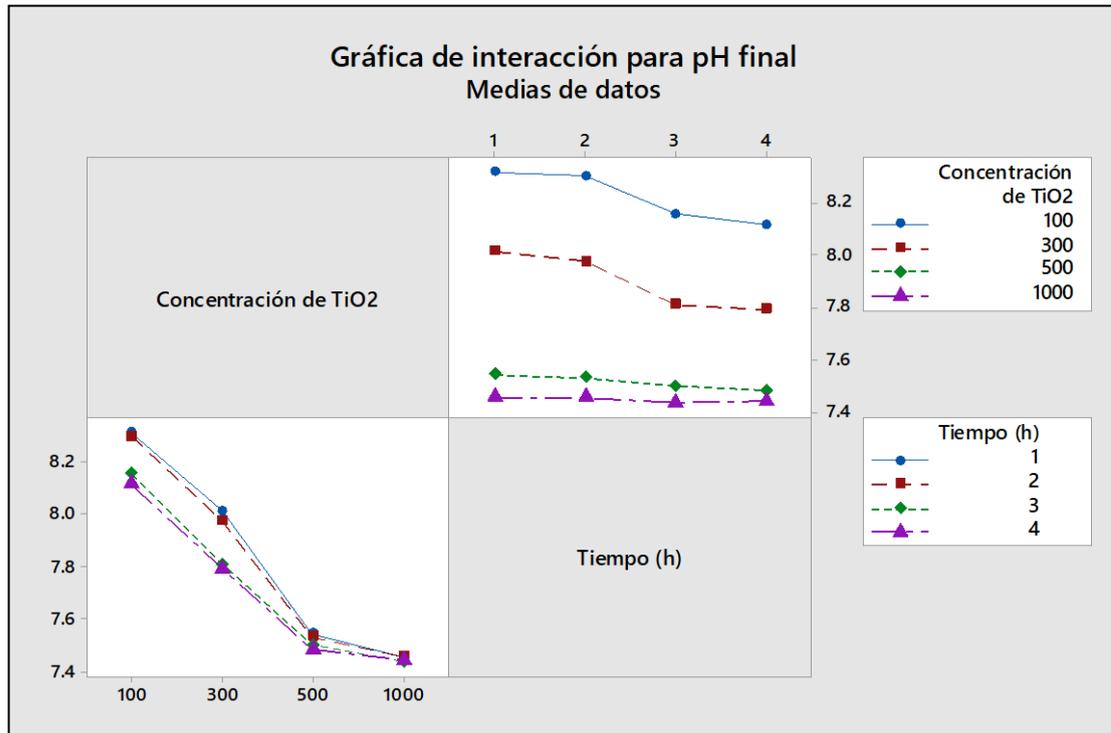


Figura 28. Gráfica de interacción para pH, se evidencia que la concentración del pH final se reduce a medida que la concentración de TiO₂ y tiempo del proceso fotocatalítico aumentan.

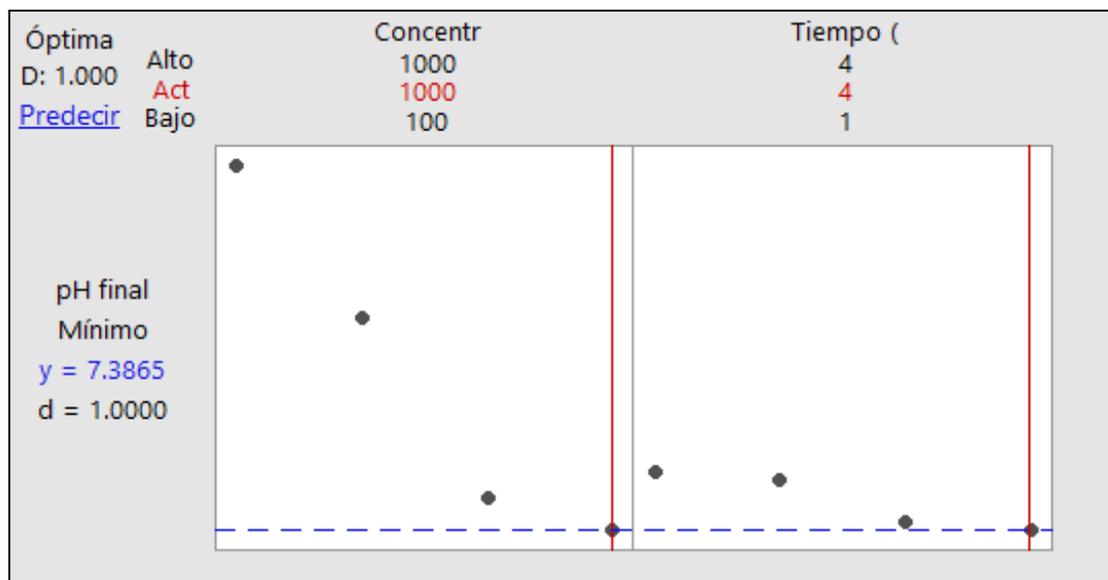


Figura 29. Gráfica de optimización de respuesta, se evidencia que al realizar el análisis de las diferentes concentraciones de TiO₂ y tiempos empleados en el proceso fotocatalítico, el ensayo que presenta mejores resultados en cuanto a la disminución del nivel de pH es a 1000 mg/L de TiO₂ y a 4 horas del proceso.

b) ANOVA para la conductividad

- ✓ Ho: Al aplicar la fotocátalisis con TiO₂ no se reducirá significativamente la concentración de la conductividad en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- ✓ Ha: Al aplicar la fotocátalisis con TiO₂ se reducirá significativamente la concentración de la conductividad en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.

Tabla 22
Análisis de varianza de 2 factores (Concentración de TiO₂ & Tiempo) – conductividad

Análisis de Varianza						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P	
Concentración de TiO₂	3	587129	195710	498.58	0.000	
Tiempo (h)	3	21993	7331	18.68	0.000	
Error	9	3533	393			
Total	15	612655				

Se observa que el valor del P es menor a 0,05 es decir ($P < 0,05$), por ende, se niega la Ho nula, que indica que todas las medias de la conductividad en los grupos son iguales y se acepta la hipótesis alterna que establece que las medias de la conductividad son distintas, ya que estas varían de acuerdo a la concentración del TiO₂ y tiempo del proceso fotocatalítico.

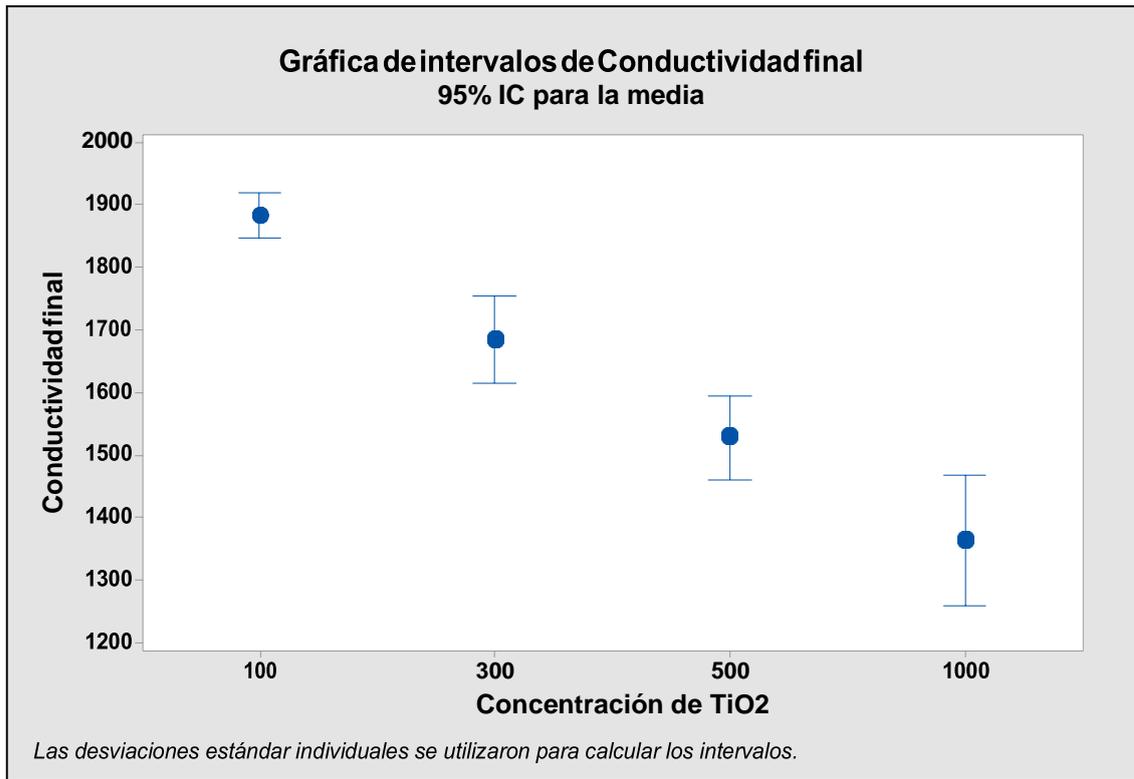


Figura 31. Gráfica de intervalos de la conductividad vs el tiempo del proceso fotocatalítico, se evidencia que a medida que aumenta el tiempo la conductividad se reduce.

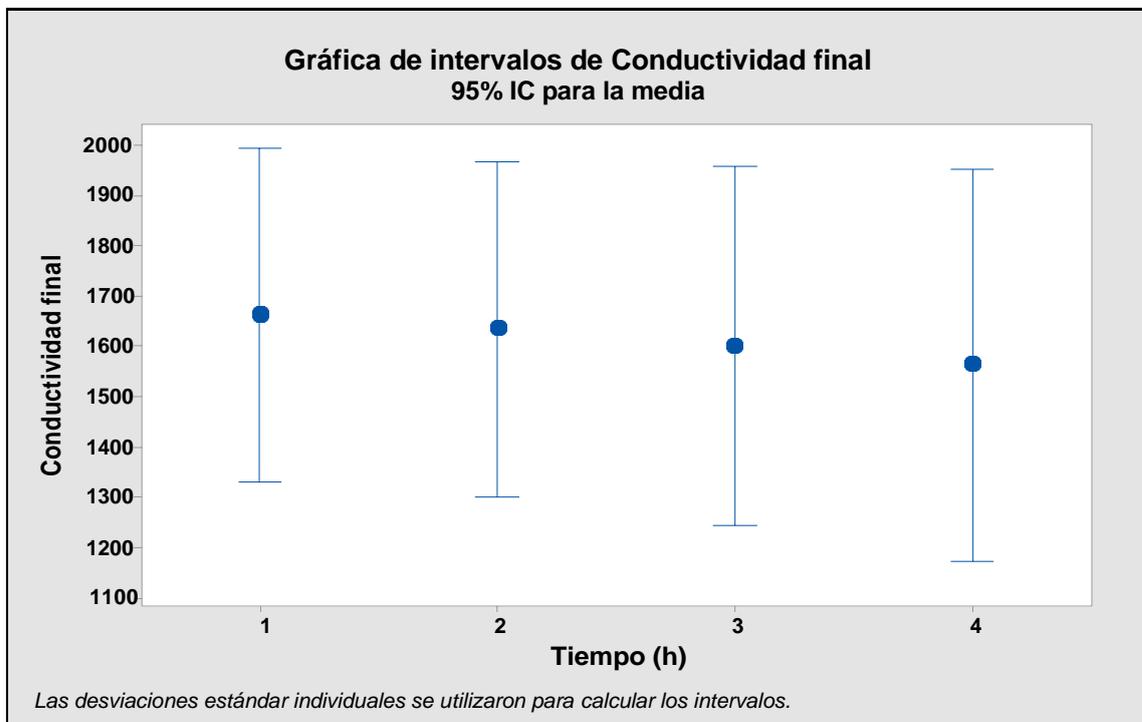


Figura 30. Gráfica de intervalos de la conductividad vs la concentración de TiO₂, se evidencia que a medida que la concentración del catalizador aumenta, la conductividad se reduce.

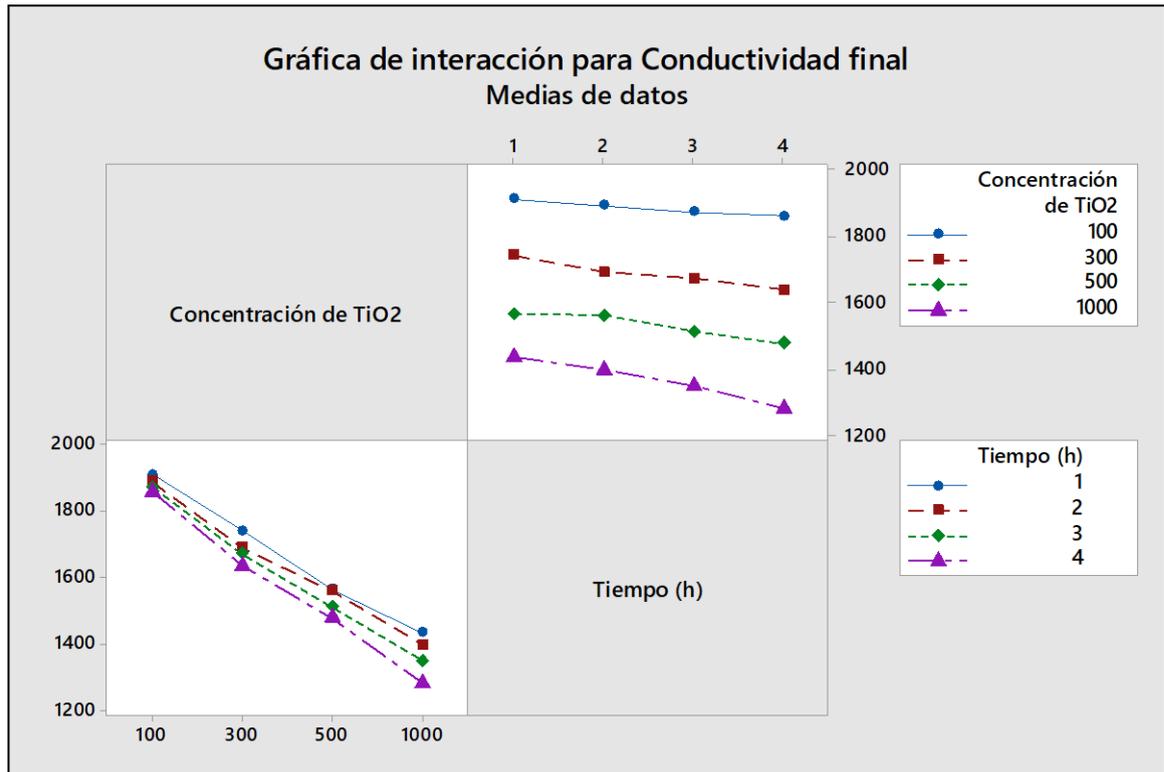


Figura 33. Gráfica de interacción para la conductividad, se evidencia que la concentración de la conductividad final se reduce a medida que la concentración de TiO₂ y tiempo del proceso fotocatalítico aumentan.

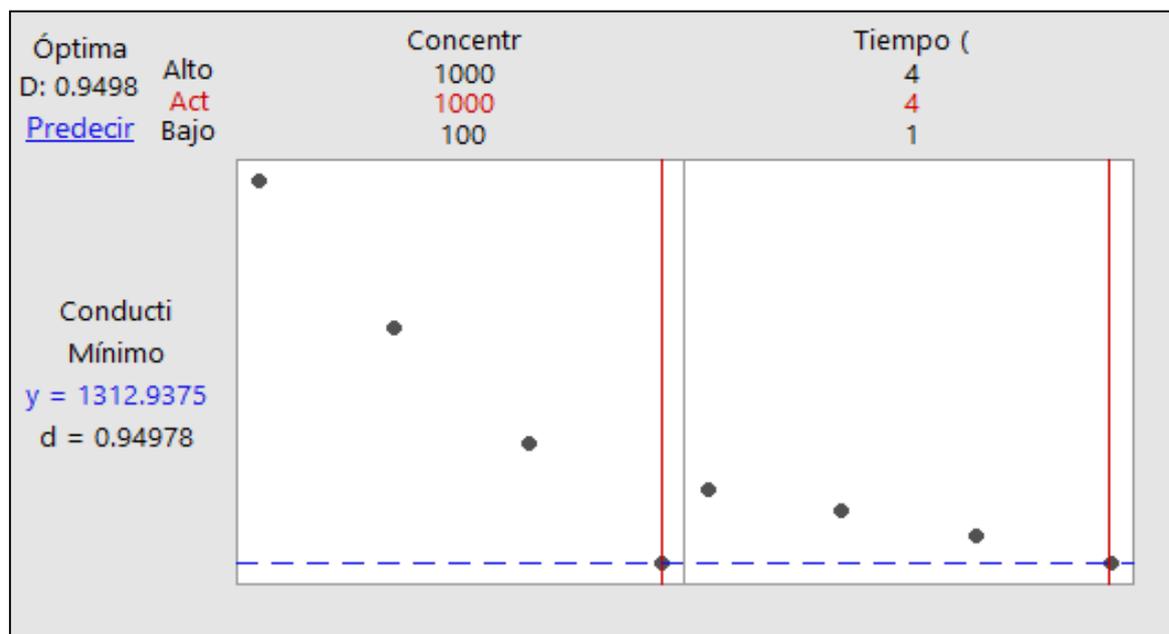


Figura 32. Gráfica de optimización de respuesta, se evidencia que al realizar el análisis de las diferentes concentraciones de TiO₂ y tiempos empleados en el proceso fotocatalítico, el ensayo que presenta mejores resultados en cuanto a la disminución de la concentración de la conductividad es a 1000 mg/L de TiO₂ y a 4 horas del proceso.

c) ANOVA para la DQO

- ✓ Ho: Al aplicar la fotocátalisis con TiO_2 no se reducirá significativamente la concentración de la DQO en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- ✓ Ha: Al aplicar la fotocátalisis con TiO_2 se reducirá significativamente la concentración de la DQO en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.

Tabla 23

Análisis de varianza de 2 factores (Concentración de TiO_2 & Tiempo) -DQO

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración de TiO_2	3	325625	108542	510.90	0.000
Tiempo (h)	3	5354	1785	8.40	0.006
Error	9	1912	212		
Total	15	332890			

Se observa que el P es menor a 0,05 es decir ($P < 0,05$), por ende, se niega la H_0 nula, que indica que todas las medias de la DQO en los grupos son iguales y se acepta la hipótesis alterna que establece que las medias de la DQO son distintas, ya que estas varían de acuerdo a la concentración del TiO_2 y tiempo del proceso fotocatalítico.

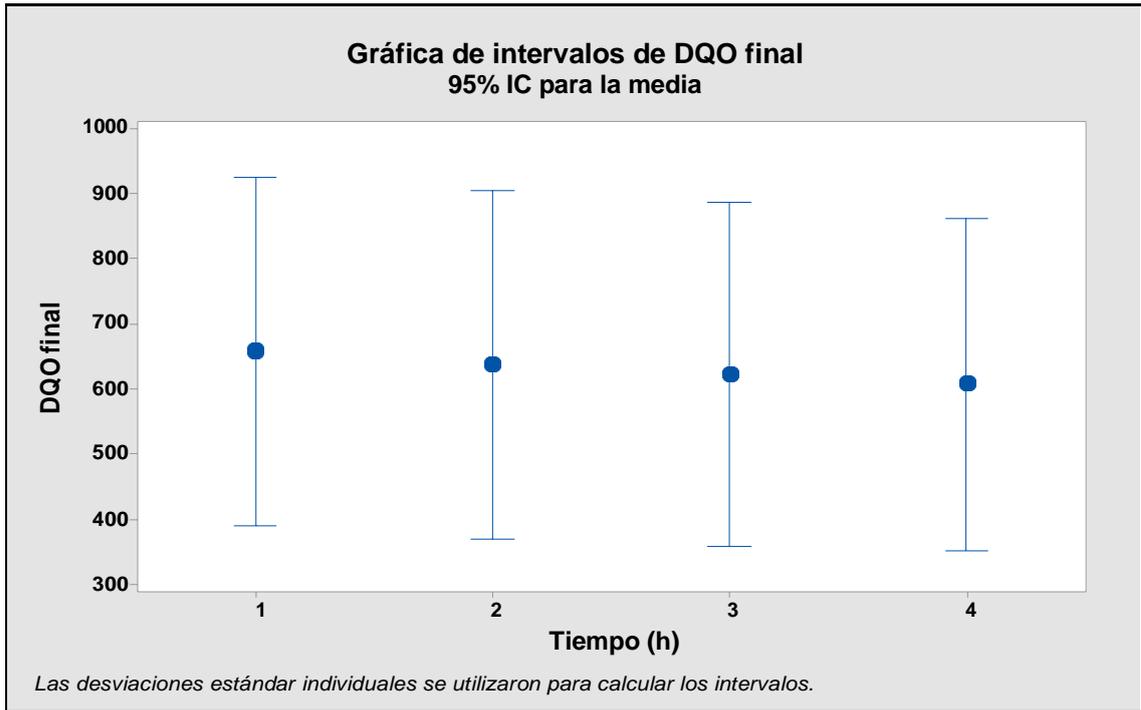


Figura 35. Gráfica de intervalos de la DQO vs el tiempo del proceso fotocatalítico, se evidencia que a medida que aumenta el tiempo la DQO se reduce.

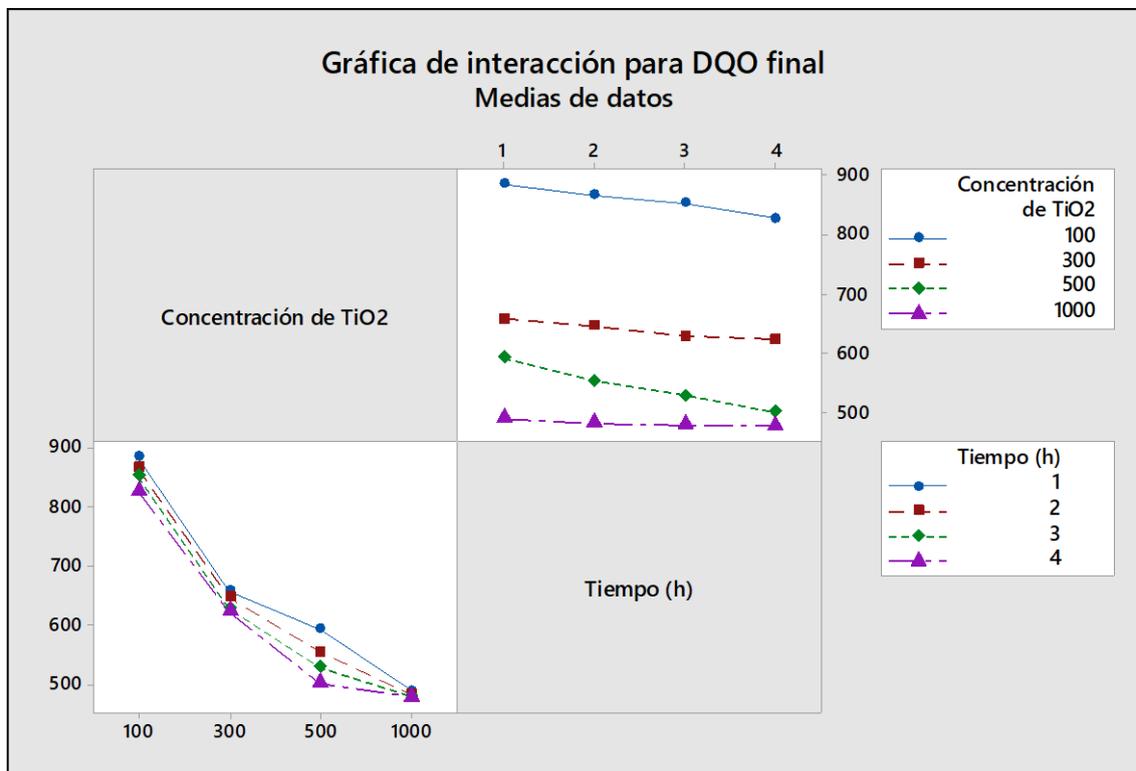


Figura 34. Gráfica de interacción para la DQO, se evidencia que la concentración de la DQO final se reduce a medida que la concentración de TiO₂ y tiempo del proceso fotocatalítico aumentan.

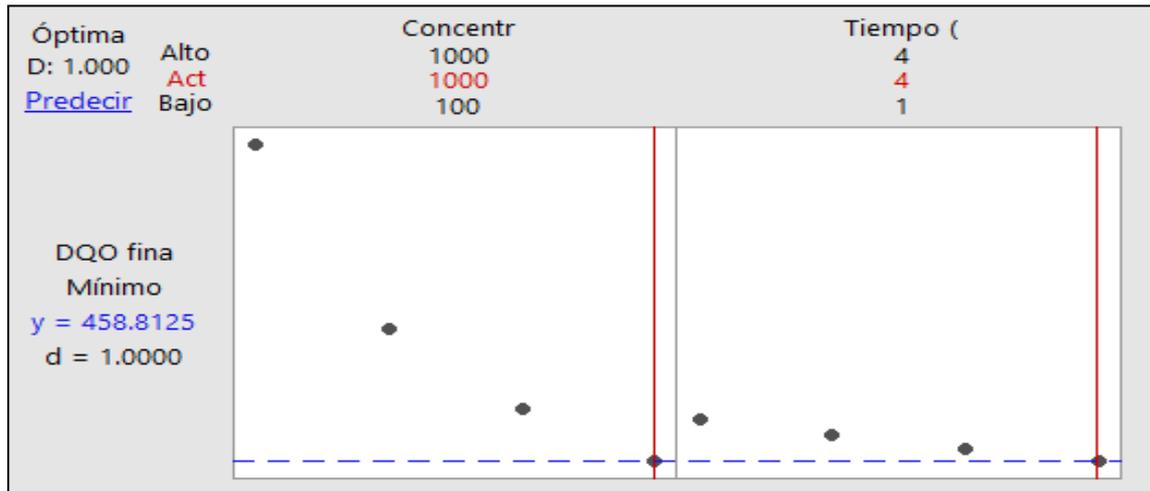


Figura 36. Gráfica de optimización de respuesta, se evidencia que al realizar el análisis de las diferentes concentraciones de TiO₂ y tiempos empleados en el proceso fotocatalítico, el ensayo que presenta mejores resultados en cuanto a la disminución de la concentración de la DQO es a 1000 mg/L de TiO₂ y a 4 horas del proceso.

d) ANOVA para el color

- ✓ Ho: Al aplicar la fotocátalisis con TiO₂ no se reducirá significativamente la concentración del color en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.
- ✓ Ha: Al aplicar la fotocátalisis con TiO₂ se reducirá significativamente la concentración del color en las aguas residuales provenientes del proceso de teñido en una empresa textil en el año 2018.

Tabla 24

Análisis de varianza de 2 factores (Concentración de TiO₂ &Tiempo) -Color

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración de TiO₂	3	428393	142798	4776.51	0.000
Tiempo (h)	3	916	305	10.21	0.003
Error	9	269	30		

Total 15 429578

Se observa que el P es menor a 0,05 es decir ($P < 0,05$), por ende, se niega la H_0 nula, que indica que todas las medias del color en los grupos son iguales y se acepta la hipótesis alterna que establece que las medias del color son distintas, ya que estas varían de acuerdo a la concentración del TiO_2 y tiempo del proceso fotocatalítico.

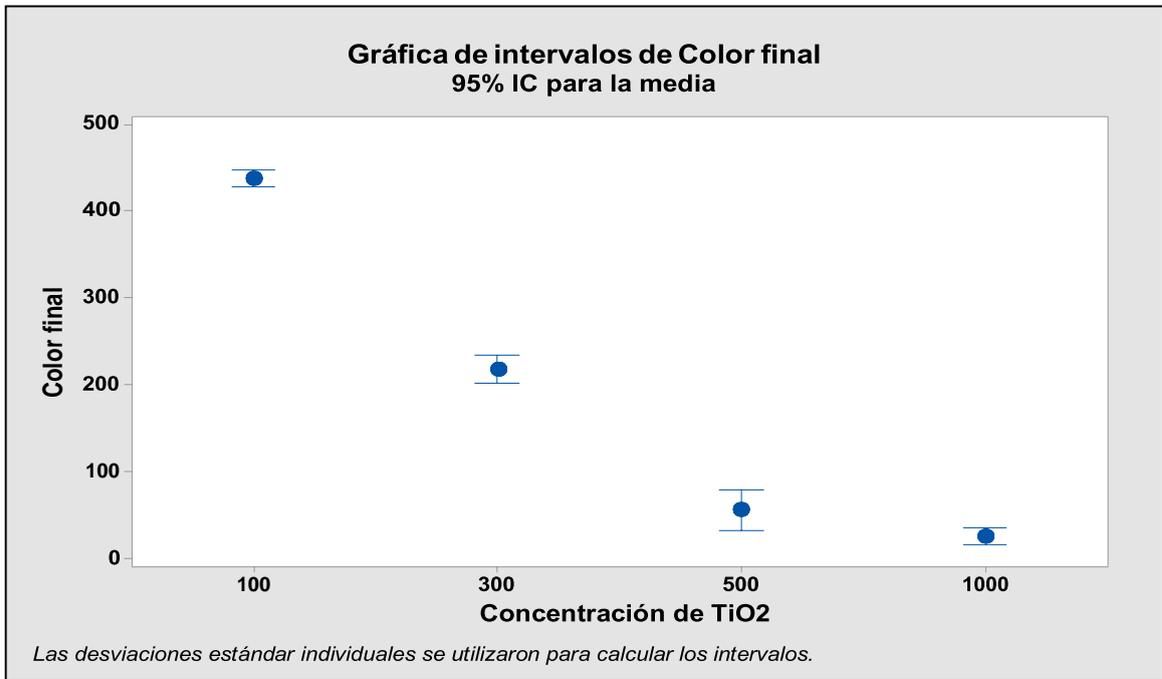


Figura 38. Gráfica de intervalos de color vs la concentración de TiO_2 , se evidencia que a medida que la concentración del catalizador aumenta, la concentración del color se reduce.

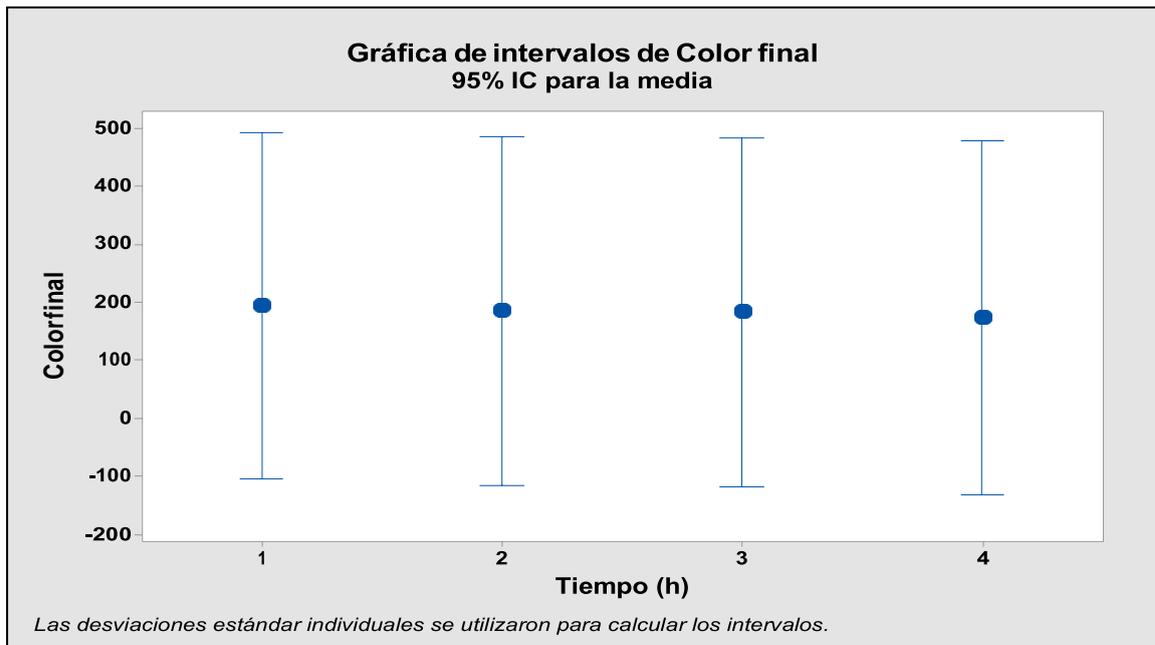


Figura 37. Gráfica de intervalos de color vs el tiempo, se evidencia que a medida que el tiempo aumenta, la concentración del color se reduce.

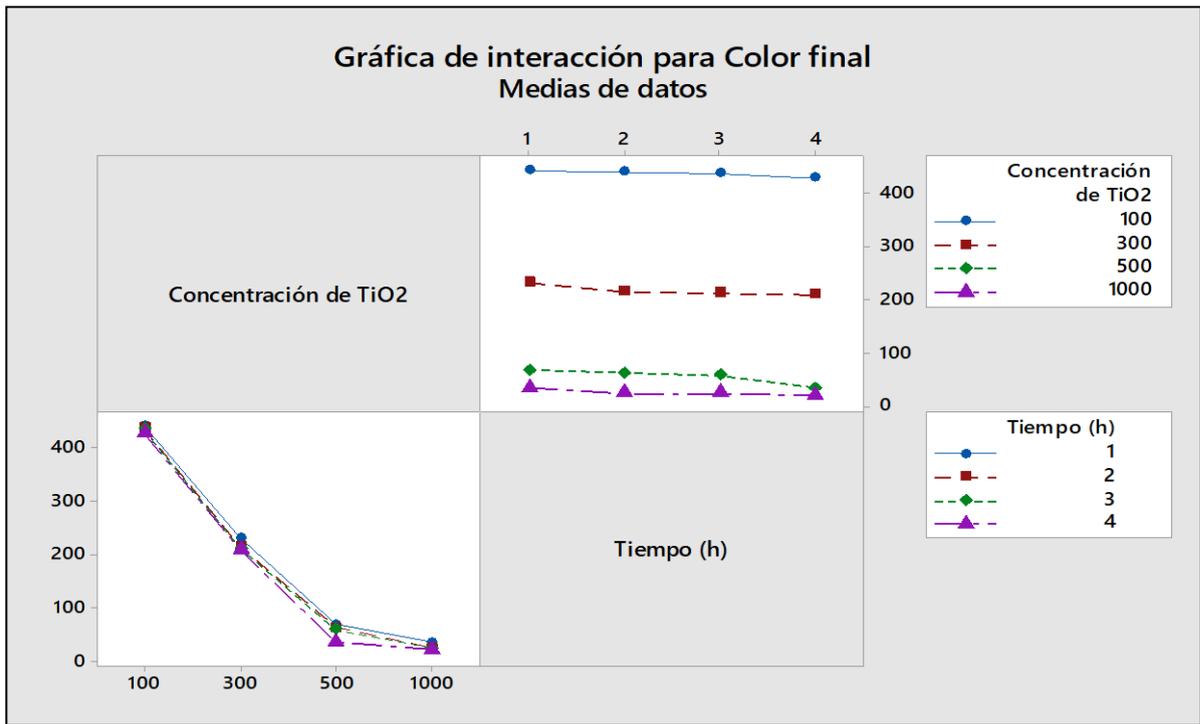


Figura 40. Gráfica de interacción para el color, se evidencia que la concentración del color final se reduce a medida que la concentración de TiO₂ y tiempo del proceso fotocatalítico aumentan.

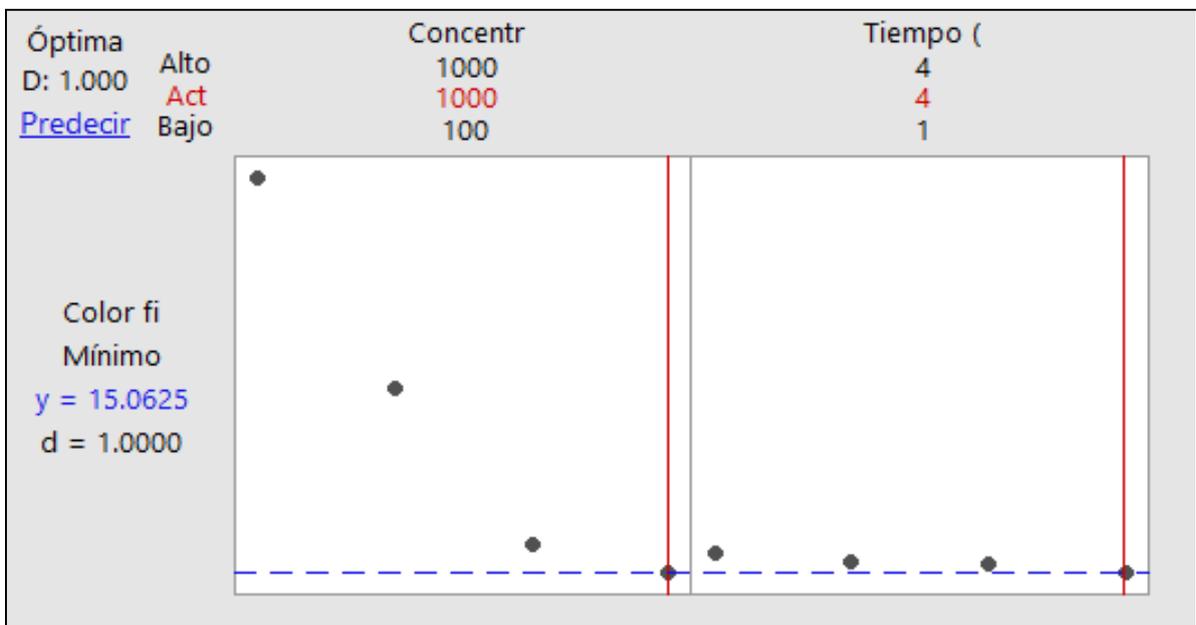


Figura 39. Gráfica de optimización de respuesta, se evidencia que al realizar el análisis de las diferentes concentraciones de TiO₂ y tiempos empleados en el proceso fotocatalítico, el ensayo que presenta mejores resultados en cuanto a la disminución de la concentración del color es a 1000 mg/L de TiO₂ y a 4 horas del proceso.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

El ensayo con mejores resultados fue al emplear una concentración de 1000 mg/L de dióxido de titanio (TiO_2) a un tiempo de exposición de 4 horas a la lámpara de luz ultravioleta, ya que se obtuvo un porcentaje de reducción del pH de 11.49%, un porcentaje de reducción de la conductividad de 38.98%, un porcentaje de degradación de la DQO de 56.55% y un % de degradación del color de 96.43%.

Con respecto al % de reducción de la DQO que fue de un 56.55 %, este resultado obtenido se compara con los valores más óptimo de las variable operacionales (concentración del catalizador y tiempo) obtenidos por Manrique, Laguna, Osorio, Serna & Torres (2017) en su investigación, ya que ellos al emplear en un rango entre 1g/L a 1.5g/L de TiO_2 , obtuvieron un 50% de degradación de la DQO cuando emplearon 1000 mg/L de TiO_2 a un tiempo de exposición de 2 horas. Esto se debe a que una cantidad mayor de TiO_2 puede dar lugar a una mayor generación de especies oxidantes (radicales hidroxilo y huecos) capaces de degradar los contaminantes (Hassan *et al.*, 2016), traduciéndose esto en mayores porcentajes de reducción del parámetros físico-químicos (DQO, pH, conductividad y color) del agua tratada.

Correspondiente al color el % de reducción obtenido que fue de 96.43 %, se compara con la investigación ya mencionada desarrollada por Manrique, Laguna, Osorio, Serna & Torres (2017), en la cual obtuvieron una degradación del color del 90 %, bajo las mismas variables de operación. Si comparamos el proceso de degradación de color con respecto a la DQO, para cualquiera de los ensayos realizados, observamos que el proceso de degradación es mucho más rápido, esto debido a que el color (UC) es más sensible al ataque

oxidativo de los radiales OH^- a diferencia de la DQO, ya que se obtuvo un % de degradación menor. Cabe mencionar que la degradación de los contaminantes existentes en el agua residual del proceso de teñido se ven fuertemente influenciados por la adsorción, que depende de las interacciones entre los grupos funcionales de los colorantes y la superficie del catalizador (Suárez, Penagos, Manrique, & Gallego, 2006).

Para la fotocátalisis con TiO_2 se ha encontrado que cuando los colorantes son fácilmente adsorbidos sobre la superficie del catalizador estos tienen mayor probabilidad de ser degradados tanto por la vía directa, es decir, por acción de los huecos, como por los radicales hidroxilos adsorbidos (Teh & Mohamed, 2011).

Es importante mencionar que el incremento de la cantidad del catalizador (mg/L), permite la obtención de mejores resultados, sin embargo un exceso de TiO_2 en la solución, origina efectos adversos para la reacción, lo cual se evidencia con los resultados obtenidos por Sakkas, Islam, Stalikas, & Albanis, (2010), los cuales emplearon concentraciones de 700mg/L, 1000 mg/L y 1300 mg/L, obteniendo mejores resultados al emplear 1000 mg/L a diferencia de emplear 1300 mg/L, debido a que al utilizar elevadas concentraciones de este catalizador, se limita el paso de la luz al sistema por disminución de la potencia de irradiación efectiva que ingresa y genera un efecto adverso para la reacción de la fotocátalisis.

4.2 Conclusiones

- Se determinó que los parámetros físico-químicos evaluados poseían los siguientes valores: un pH de 8.40, una conductividad de 2100 us/cm, una concentración de DQO de 1100 mg/L y una concentración de color de 560 UC. De acuerdo a los VMA el parámetro que se encuentra superando el nivel establecido (1000 mg/L) es el DQO, a diferencia del pH que se encuentra dentro del rango de (6 – 9) no obstante, los otros parámetros evaluados no se contemplan en la legislación peruana.
- Se determinaron que las condiciones óptimas para las variables de operación son: a una concentración de 1000 mg/L de TiO_2 y a un tiempo de exposición de 4 horas de luz UV, debido a que en estas condiciones ocurrió una disminución del nivel del pH, de la concentración de la conductividad, DQO y color.
- Se redujo la concentración de pH de 8.40 que fue el valor inicial a 7.44 empleando las mejores condiciones del proceso, es decir a una concentración de 1000 mg/L de TiO_2 y a un tiempo de exposición de 4 horas.
- Se redujo la concentración de la conductividad de 2100 us/cm que fue el valor inicial a 1281 us/cm empleando las mejores condiciones del proceso, es decir a una concentración de 1000 mg/L de TiO_2 y a un tiempo de exposición de 4 horas.
- Se redujo la concentración de la DQO de 1100 mg/L que fue el valor inicial a 478 mg/L empleando las mejores condiciones del proceso, es decir a una concentración de 1000 mg/L de TiO_2 y a un tiempo de exposición de 4 horas.

- Se redujo la concentración del color de 560 UC que fue el valor inicial a 20 UC empleando las mejores condiciones del proceso, es decir a una concentración de 1000 mg/L de TiO₂ y a un tiempo de exposición de 4 horas.
- Se determinó el porcentaje óptimo de reducción de los parámetros físico-químicos evaluados, el cual fue para el pH de 11.49%, en la conductividad de 38.98%, en la DQO de 56.55% y en el color de 96.43%, los cuales fueron alcanzados al emplear 1000 mg/L de TiO₂ a un tiempo de 4h, cumpliendo de esta manera como los VMA.

4.3 Recomendaciones

- Se recomienda evaluar otras variables de operación como caudal, longitud de onda de la lámpara de UV, tiempo de exposición, entre otros con la finalidad de obtener mejores resultados.
- Se recomienda emplear lámparas de clasificación RGO “excenta de riesgo” para garantizar la seguridad de los ojos y la piel, las lámparas se prueban basándose en el peor de los casos, que sería el empleo de lámpara a una distancia de solo 20 cm.
- Se recomienda realizar el proceso de fotocátalisis heterogénea cambiando el modo de empleo del catalizador (TiO_2) en suspensión a uno inmovilizado en sustrato de vidrio, con la finalidad de evitar un proceso adicional para separar el precipitado generado.

REFERENCIAS

- ✓ Bandala, R. (2014). Tratamiento de Agua Residual Proveniente de la Industria Textil mediante fotocátalisis solar. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-009>.
- ✓ Barka, N., Qourzal, S., Assabbane, A., Nounah, A., y Ait Ichou, Y. (2010). Photocatalytic degradation of an azo reactive dye, Reactive Yellow 84, in water using an industrial titanium dioxide coated media. *Arabian Journal of Chemistry*, 3(4), 279-283. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.06.016>
- ✓ Bouarioua, A., y Zerdaoui, M. (2017). Photocatalytic activities of TiO₂ layers immobilized on glass substrates by dip-coating technique toward the decolorization of methyl orange as a model organic pollutant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1565-1574. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.02.025>
- ✓ Cardona M. (2002). Introducción a los métodos de investigación en educación. Recuperado de <http://www.smo.edu.mx/colegiados/apoyos/proyecto-investigacion.pdf>
- ✓ Garcés, G., Mejía, F., y Santamaría, A. (2015). La fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 84-90. Recuperado de <http://lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/08392%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>
- ✓ Gómez, O., Escudero, A., y Gamarra, H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Industrial data*, 14(2), 9-15. <https://doi.org/10.15381/idata.v14i2.6217>
- ✓ Grzechulska-Damszel, J., Tomaszewska, M., y Morawski, A. (2009). Integration of photocatalysis with membrane processes for purification of water contaminated

with organic dyes. *Desalination*, 241(1-3), 118-126.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.11.084>

- ✓ Hassan, M., Zhao, Y., y Xie, B. (2016). Employing TiO₂ photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development., 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.093>
- ✓ Instituto de Tecnología Industrial. (2015). Gestión de los efluentes de la industria textil. Recuperado de <https://n9.cl/lkg90>.
- ✓ Instituto de Toxicología de la Defensa. (2016). Protocolo de toma de muestras de agua residual. Recuperado de https://www.google.com.pe/search?q=PROTOCOLO+DE+TOMA+DE+MUESTRAS+DE++AGUA+RESIDUAL&rlz=1C1CHBF_esPE797PE798&source=lnms&sa=X&ved=0ahUKEwjfqtuZm9LdAhXttlkKHR8ACoQQ_AUICSgA&biw=678&bih=616&dpr=1#
- ✓ Kaushik, P., y Vogelpohl, A. (2009). Fungal dye decolorization: Recent advances and future potential. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.05.010>
- ✓ Manrique, L., Laguna, E., Osorio, E., Serna, E., y Torres, R. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocatalisis con TiO₂ usando luz artificial y solar. volumen N° 12, 50-60. Recuperado de <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a4>
- ✓ Ministerio de Vivienda (2019). Decreto Supremo N° 010-2019- VIVIENDA. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019-vivienda>
- ✓ Organización de las Naciones Unidas. (2003). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Recuperado de <https://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s>.
- ✓ Pey C. (2008). Aplicación de procesos de oxidación avanzada (fotocatalisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles (Tesis doctoral). Recuperado de <https://cutt.ly/br6GSGC>

- ✓ Sánchez, M., y Uribe, C. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Revista Campus*, 23(26)
- ✓ Suárez, W., Penagos, P., Manrique, L., y Gallego, D. (2006). Efecto de la estructura química de los colorantes en su fotoxidación catalítica Estudio con dos colorantes tipo reactivo utilizando TiO₂ y luz UV, 150– 158.
- ✓ Teh, C., y Mohamed, A. (2011). Roles of titanium dioxide and ion-doped titanium dioxide on photocatalytic degradation of organic pollutants (phenolic compounds and dyes) in aqueous solutions: A review, 1648–1660. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.181>

ANEXOS

Anexo N° 1.- Análisis del parámetro conductividad



Descripción: Análisis de la conductividad (us/cm) del agua residual de teñido en el laboratorio de biología de la Universidad Privada del Norte.

Anexo N° 2.- Pesado de las cantidades de dióxido de titanio



Descripción: Pesado de las concentraciones de 100 mg, 300 mg, 500 mg y 1000 mg del catalizador (dióxido de titanio) mediante el empleo de una balanza electrónica.

Anexo N° 3.- Pesado de la cantidad de 100 mg de dióxido de titanio



Descripción: Pesado de la concentración de 100 mg del catalizador (dióxido de titanio) mediante el empleo de una balanza electrónica.

Anexo N° 4.-Cantidades de 100 mg de dióxido de titanio



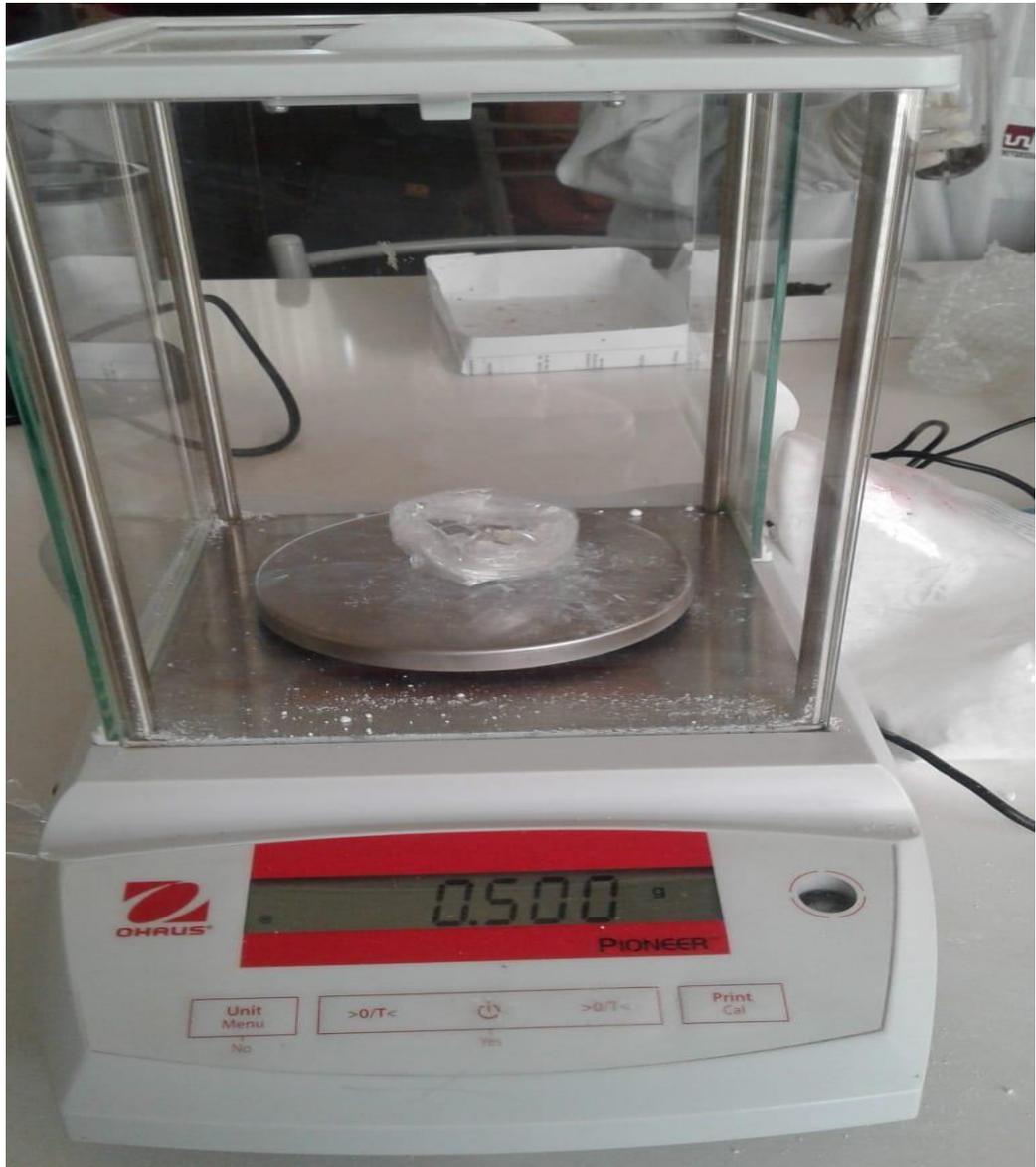
Descripción: Etiquetado de las muestras de 100 mg pesadas en el laboratorio de biología de la Universidad Privada del Norte.

Anexo N° 5.- Pesado de la cantidad de 300 mg de dióxido de titanio



Descripción: Pesado de la concentración de 300 mg del catalizador (dióxido de titanio) mediante el empleo de una balanza electrónica.

Anexo N° 6.- Pesado de la cantidad de 500 mg de dióxido de titanio



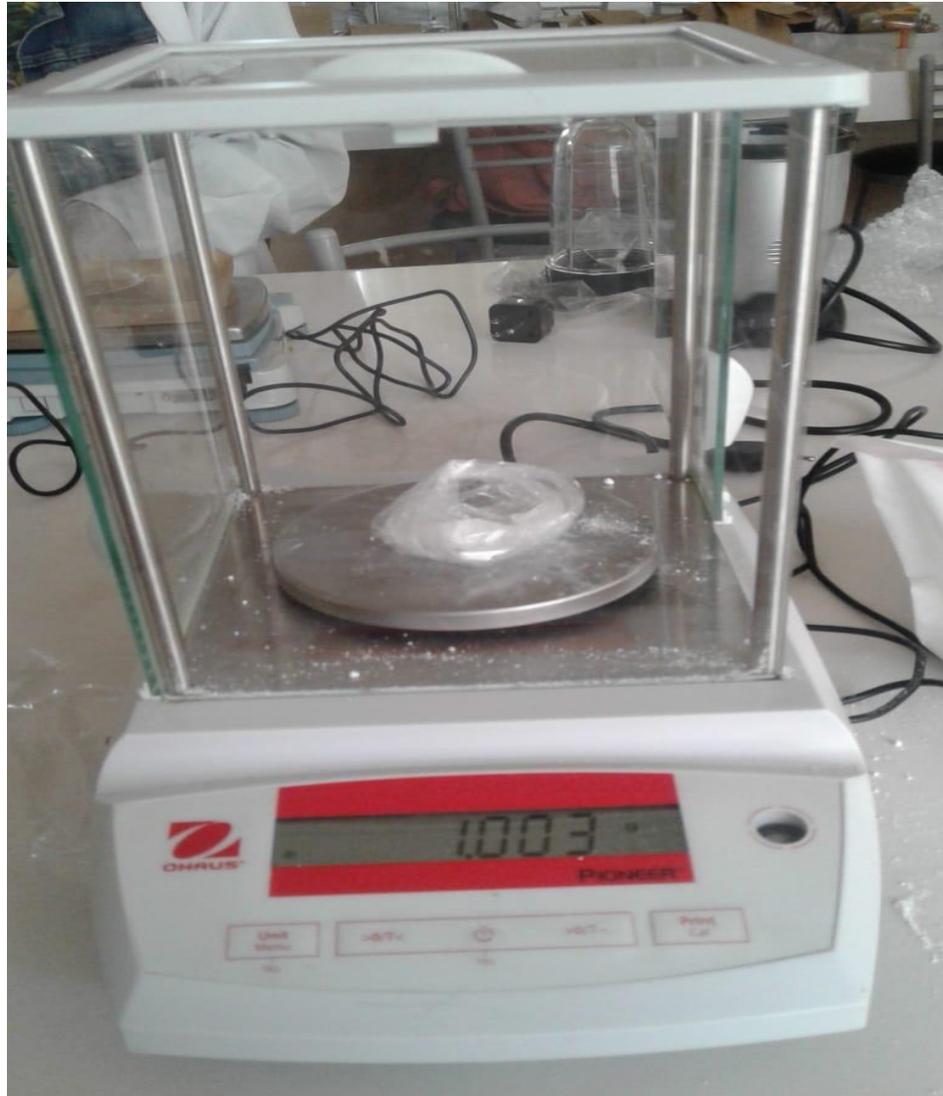
Descripción: Pesado de la concentración de 500 mg del catalizador (dióxido de titanio) mediante el empleo de una balanza electrónica.

Anexo N° 7.- Cantidades de 500 mg de dióxido de titanio



Descripción: Etiquetado de las muestras de 500 mg pesadas en el laboratorio de biología de la Universidad Privada del Norte.

Anexo N° 8.- Pesado de la cantidad de 1000 mg de dióxido de titanio



Descripción: Pesado de la concentración de 1000 mg del catalizador (dióxido de titanio) mediante el empleo de una balanza electrónica.

Anexo N° 9.- Cantidades de 1000 mg de dióxido de titanio



Descripción: Etiquetado de las muestras de 1000 mg pesadas en el laboratorio de biología de la Universidad Privada del Norte.

Anexo N° 10.- Ensamblaje del reactor



Descripción: Ensamblaje de las piezas del reactor de fotocátalisis.

Anexo N°11. - Reactor fotocatalítico ensamblado



Descripción: El sistema fotocatalítico contiene un tanque de almacenamiento, un transformador y al reactor tubular.

Anexo N° 12.- Muestras post-tratamiento por fotocátalisis



Descripción: 48 muestras de las aguas residuales tratadas a diferentes concentraciones de dióxido de titanio y tiempos.

Anexo N° 13. – Muestras del tratamiento tratamiento 1 (concentración de TiO_2 de 100 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 1 empleando 100 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 1 hora.

Anexo N° 14.- Muestras del tratamiento tratamiento 1 (concentración de TiO_2 de 100 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 1 empleando 100 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 2 hora.

Anexo N°15. - Muestras del tratamiento tratamiento 1 (concentración de TiO_2 de 100 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 1 empleando 100 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 3 hora.

Anexo N° 16.- Muestras del tratamiento tratamiento 1 (concentración de TiO_2 de 100 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 1 empleando 100 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 4 hora.

Anexo N° 17. - Muestras del tratamiento tratamiento 3 (concentración de TiO_2 de 500 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 1 empleando 500 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 1 hora.

Anexo N° 18.- Muestras del tratamiento tratamiento 3 (concentración de TiO_2 de 500 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 3 empleando 500 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 2 hora.

Anexo N° 19. - Muestras del tratamiento tratamiento 3 (concentración de TiO_2 de 500 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 1 empleando 500 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 3 hora.

Anexo N° 20. - Muestras del tratamiento tratamiento 3 (concentración de TiO_2 de 500 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 3 empleando 500 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 4 hora.

Anexo N° 21. - Muestras del tratamiento tratamiento 4 (concentración de TiO_2 de 1000 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 4 empleando 1000 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 1 hora.

Anexo N° 22.- Muestras del tratamiento tratamiento 4 (concentración de TiO_2 de 1000 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 4 empleando 1000 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 2 hora.

Anexo N° 23.- Muestras del tratamiento tratamiento 4 (concentración de TiO_2 de 1000 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 4 empleando 1000 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 3 hora.

Anexo N° 24.- Muestras del tratamiento tratamiento 4 (concentración de TiO_2 de 1000 mg/l)



Descripción: Muestras post tratamiento N° 4 empleando 1000 mg/L de TiO_2 y en un lapso de tiempo de 4 hora.

Anexo N° 25. – Sistema fotocatalítico en funcionamiento



Descripción: Funcionamiento del sistema fotocatalítico, comprendido por el tanque del almacenamiento donde se produce la homogenización y el reactor tubular donde se produce la reacción con la luz UV.

Anexo N° 27. – Ficha de Registro de toma de muestra de la empresa textil.

FORMATO N°1 - FICHA DE REGISTRO DE LA EMPRESA TEXTIL	
ZONA DE ESTUDIO	Empresa textil (proceso de teñido)
LUGAR	San Juan de Luñiganchó
DESCRIPCIÓN	Se realizó el muestreo puntual en horario diurno del agua residual del proceso de teñido la cual presentaba coloración rojiza.
FECHA	26/11/18
HORA	9:30 AM
TIPO DE MUESTREO	Puntual

Descripción: Ficha de registro de la toma de muestra en la empresa textil.

Anexo N° 28. – Ficha de resultados de los ensayos experimentales

FORMATO N° 2- FICHA DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES				
N° de ensayo	Concentración de TiO ₂ (mg/l)	Tiempo (hora)	pH final	Conductividad final (us/cm)
T ₁₁₁	100	1	8.32	1910
T ₁₁₂	100	1	8.32	1911
T ₁₁₃	100	1	8.31	1911
T ₁₂₁	100	2	8.30	1890
T ₁₂₂	100	2	8.30	1890
T ₁₂₃	100	2	8.30	1890
T ₁₃₁	100	3	8.17	1873
T ₁₃₂	100	3	8.15	1873
T ₁₃₃	100	3	8.15	1871
T ₁₄₁	100	4	8.11	1859
T ₁₄₂	100	4	8.13	1859
T ₁₄₃	100	4	8.11	1859
T ₂₁₁	300	1	8.02	1741
T ₂₁₂	300	1	8.01	1741
T ₂₁₃	300	1	8.01	1741
T ₂₂₁	300	2	7.97	1690

Descripción: Ficha de los ensayos experimentales realizados con los resultados del pH final y conductividad final.

Anexo N° 29. – Ficha de resultados de los ensayos experimentales

T _{2.2.2}	300	2	7.99	1691
T _{2.2.3}	300	2	7.97	1691
T _{2.3.1}	300	3	7.81	1612
T _{2.3.2}	300	3	7.81	1611
T _{2.3.3}	300	3	7.81	1611
T _{2.4.1}	300	4	7.80	1635
T _{2.4.2}	300	4	7.80	1631
T _{2.4.3}	300	4	7.78	1637
T _{3.1.1}	500	1	7.54	1564
T _{3.1.2}	500	1	7.54	1564
T _{3.1.3}	500	1	7.55	1564
T _{3.2.1}	500	2	7.54	1560
T _{3.2.2}	500	2	7.53	1561
T _{3.2.3}	500	2	7.53	1560
T _{3.3.1}	500	3	7.50	1511
T _{3.3.2}	500	3	7.50	1512
T _{3.3.3}	500	3	7.50	1513
T _{3.4.1}	500	4	7.50	1477
T _{3.4.2}	500	4	7.48	1476

Descripción: Ficha de los ensayos experimentales realizados con los resultados del pH final y conductividad final.

Anexo N° 30. – Ficha de resultados de los ensayos experimentales

T4.1.3	500	4	7.47	1416
T4.1.1	1000	4	7.47	1434
T4.1.2	1000	1	7.45	1434
T4.1.3	1000	1	7.45	1434
T4.2.1	1000	2	7.47	1397
T4.2.2	1000	2	7.44	1396
T4.2.3	1000	2	7.46	1396
T4.3.1	1000	3	7.43	1348
T4.3.2	1000	3	7.44	1348
T4.3.3	1000	3	7.44	1348
T4.4.1	1000	4	7.45	1281
T4.4.2	1000	4	7.44	1282
T4.4.3	1000	4	7.44	1281

Descripción: Ficha de los ensayos experimentales realizados con los resultados del pH final y conductividad final.