



**Facultad de Ciencia de Tecnología  
Ingeniería Ambiental**

**Degradación de colorantes presentes en aguas residuales provenientes del  
proceso de teñido del sombrero de paja toquilla**

Trabajo previo a la obtención del título de:  
**INGENIERO AMBIENTAL**

**Autores**

Santiago Eduardo Quezada Ortuño  
Santiagoquezda@es.uazuay.edu.ec

Jonnathan Armando Urvina Jetón  
jonas-17@es.uazuay.edu.ec

**Director**

Ing. Bolívar Andrés Pérez González

**Cuenca - Ecuador**

**2024**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar mi proyecto de tesis principalmente a mi madre, María Elena Ortuño, que, durante todo este trayecto de vida universitaria me ha apoyado incondicionalmente y gracias a su amor, paciencia y comprensión me ha permitido alcanzar esta meta en mi vida.

A mis abuelitos Carlos Ortuño y María Medina, por siempre confiar en mí, gracias a sus consejos y valores que me han inculcado durante mi vida personal.

A mis hermanos, Carlos y Daniela, por ser ese pilar importante en mi vida, la distancia no ha sido impedimento para demostrarme siempre su apoyo, agradezco tenerlos en mi vida, me sirven como motivación día a día para lograr mis metas.

A mi novia Anagelly Quichimbo Méndez, por apoyarme y demostrarme desde el comienzo que con esfuerzo y disciplina se puede lograr cualquier meta que me proponga en mi vida.

*Santiago Eduardo Quezada Ortuño*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradezco a Dios por guiarme y protegerme en todo mi proyecto de vida, por la fuerza, voluntad y sabiduría para desarrollar el presente proyecto.

A nuestro director Ingeniero Andrés Pérez, quien con sus conocimientos nos orientó y apoyo para la realización del proyecto de tesis.

Finalmente, agradezco la confianza y apoyo de mi madre y de mis abuelitos, que me han enseñado durante mi vida personal a forjar mi carácter y disciplina para lograr todas mis metas propuestas en la vida.

*Santiago Eduardo Quezada Ortuño*

## **Resumen**

El sombrero de paja toquilla ha sido reconocido como patrimonio cultural de la humanidad en 2012. La industria textil es una de las industrias con mayor consumo de agua, en sus aguas residuales, los colorantes textiles presentan un alto riesgo ambiental debido a su toxicidad y persistencia en el ambiente. En el teñido de la paja toquilla, se emplea una cantidad significativa de agua, lo que genera aguas residuales cargadas de colorantes. El presente trabajo de investigación que tiene como objetivo principal degradar 3 colorantes sintéticos presentes en las aguas residuales debido al proceso de teñido de sombreros de paja toquilla, para la degradación se utilizó un proceso fotocatalítico sobre una superficie de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y luz ultravioleta (UV) para generar una reacción química que degrada el colorante. Se evaluó las siguientes concentraciones de 1, 5, 10, 20 y 25 ppm. Los resultados fueron efectivos para los colorantes azul y verde en concentraciones de 25 ppm, obteniendo una degradación del 54,56% para el colorante azul y 10,64% para el colorante verde en un tiempo de exposición de 180 minutos, mientras que color rojo mostró resistencia al método. El nivel de contaminación se evaluó mediante la demanda química de oxígeno (DQO) en las soluciones utilizadas teniendo valores menores al máximo establecido en la legislación ecuatoriana. La técnica de fotocatalisis demostró ser una alternativa ideal para complementar otros tratamientos de aguas residuales contribuyendo a una solución efectiva para el manejo de aguas contaminadas y ayudando al cuidado del ecosistema acuático.

## **Palabras clave**

Paja Toquilla, Aguas residuales, colorantes textiles, tratamiento, dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ).

## **Abstract**

The Toquilla straw hat was recognized as a UNESCO Intangible Cultural Heritage in 2012. The textile industry is one of the most water-intensive industries, and its wastewater contains textile dyes that pose a significant environmental risk due to their toxicity and persistence. The dyeing process of Toquilla straw hats uses a significant amount of water, generating wastewater loaded with dyes. This research aims to degrade three synthetic dyes present in the wastewater from the dyeing process of Toquilla straw hats using a photocatalytic process supported on titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) and ultraviolet (UV) light to generate a chemical reaction that degrades the dye. Concentrations of 1, 5, 10, 20, and 25 ppm were evaluated. The results were effective for blue and green dyes at a concentration of 25 ppm, achieving a degradation of 54.56% for the blue dye and 10.64% for the green dye in an exposure time of 180 minutes, while the red dye showed resistance to the method. The level of contamination was evaluated through the chemical oxygen demand (COD) in the solutions used, with values lower than the maximum established in Ecuadorian legislation. The photocatalysis technique proved to be an ideal alternative to complement other wastewater treatments, contributing to an effective solution for the management of contaminated water and helping to protect the aquatic ecosystem.

## **Key words**

Toquilla Straw, Wastewater, Textile Dyes, Treatment, Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>).

## Índice

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
1. Introducción .....	1
2. Metodología y materiales.....	2
2.1 Preparación del soporte de dióxido de titanio y condiciones de trabajo.....	2
2.2 Preparación de patrones para determinación de curvas de calibración.....	2
2.3 Curvas de calibración de colorantes .....	3
2.4 Reacción Fotocatalítica.....	3
2.5 Determinación UV - Vis .....	3
2.6 Cinética de reacción.....	4
2.7 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	4
3. Resultados .....	4
3.1 Degradación de colorantes .....	4
3.2 Cinética de reacción.....	8
3.3 Orden de reacción .....	12
4. Discusión.....	14
5. Conclusiones .....	15
6. Referencias bibliográficas.....	16
7. Anexos .....	17

## **Índice de tablas**

Tabla 1. Soluciones de concentraciones de colorantes .....	4
Tabla 2. Datos de concentración del colorante azul .....	5
Tabla 3. Datos de concentración del colorante rojo.....	6
Tabla 4. Datos de concentración del colorante verde .....	8
Tabla 5. Datos de cinética de colorante azul.....	9
Tabla 6. Datos de cinética de colorante rojo.....	9
Tabla 7. Datos de cinética de colorante verde .....	9
Tabla 8. Orden de reacción del colorante sintético azul .....	12
Tabla 9. Orden de reacción del colorante sintético rojo .....	12
Tabla 10. Orden de reacción del colorante sintético verde.....	12
Tabla 11. Valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	13

## **Índice de figuras**

Figura 1. Gráfica de decoloración del colorante azul. ....	6
Figura 2. Gráfica de decoloración del colorante rojo .....	7
Figura 3. Gráfica de decoloración del colorante verde .....	8
Figura 4. Gráfica de cinética del colorante azul .....	10
Figura 5. Gráfica de cinética del colorante rojo.....	11
Figura 6. Gráfica de cinética del colorante verde .....	11

## **Índice de anexos**

Anexo 1. Tablas de valores de mediciones y gráficas de degradación correspondiente a cada concentración de colorante .....	17
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## 1. Introducción

El Patrimonio Cultural es el conjunto de manifestaciones u objetos nacidos de la producción humana que una sociedad ha recibido como herencia histórica y que constituyen elementos significativos de su identidad como pueblo (Llull, 2005).

En Ecuador, el sombrero de paja toquilla ha sido reconocido como patrimonio cultural inmaterial, desde 2012 el sombrero de paja toquilla fue inscrito en la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad de la UNESCO, destacando la importancia cultural y artesanal de este histórico producto ecuatoriano generando positivos impactos socioculturales contribuyendo de manera positiva al desarrollo del turismo cultural (Llugin, 2019).

La industria textil es una de las industrias con mayor consumo de agua y las aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza. Entre los contaminantes se destacan los colorantes. Estos compuestos se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencional (Martínez et al., 2014).

En la elaboración del sombrero de paja toquilla, la etapa de teñido requiere un gran volumen de agua, lo que genera efluentes con colorantes. Estos efluentes representan una de las principales causas de impacto ambiental. Los colorantes además de afectar la transparencia del agua alteran la absorción y el reflejo de la luz solar interfiriendo con la vida acuática en lagos, ríos y otros cuerpos de agua. Además, esto genera una alta Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), aumento de Carbono Orgánico Total (COT), alta intensidad de calor y potencial de Hidrógeno (pH). Muchos de estos colorantes sintéticos son tóxicos, mutagénicos y cancerígenos.

En Ecuador la investigación sobre el tema es limitada, existen trabajos académicos, principalmente en forma de tesis de grado, que han explorado el tema, enfocándose en métodos de tratamiento de aguas residuales y el impacto de los colorantes sintéticos en el ecosistema acuático. Una alternativa para el tratamiento de estos efluentes son los procesos de Oxidación avanzada que se caracterizan por aprovechar la alta reactividad del radical hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) como agente oxidante para oxidar materia orgánica hasta su mineralización.

En la actualidad existen métodos alternativos más eficientes a los convencionales como la precipitación, floculación, cloración, absorción, etc. Estos mecanismos llegan a ser considerados inadecuados por sus altos costos, grandes cantidades de reactivos químicos y espacios para la utilización de equipos. En el presente estudio se utiliza el método fotocatalítico

que consiste en utilizar dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y luz ultravioleta (UV) para generar una reacción química que degrada contaminantes presentes en el agua permitiendo mejorar la absorción de la luz, para así provocar una degradación del colorante.

Este método ofrece una alternativa positiva para degradar colorantes en aguas residuales de la etapa de teñido de sombreros de paja toquilla. Busca complementar otros tratamientos de aguas residuales, contribuyendo a una solución más efectiva para el manejo de aguas contaminadas y ayudando al cuidado del ecosistema acuático. Es importante señalar que, aunque este método mejora la degradación a bajas concentraciones, no elimina todos los contaminantes presentes. En este estudio, se evaluará la viabilidad del tratamiento propuesto para la degradación de los colorantes sintéticos seleccionados presentes en las aguas residuales, además de analizar sus tiempos de degradación para finalmente comparar los resultados obtenidos en laboratorio con las regulaciones ambientales vigentes, con el fin de determinar la eficacia del método en su totalidad.

## **2. Metodología y materiales**

### **2.1 Preparación del soporte de dióxido de titanio y condiciones de trabajo**

La superficie de reacción denominada celda de reacción consiste en una cerámica vidriada (baldosa) que tiene una monocapa de dióxido de titanio fijada en la superficie mediante quema directa y se aseguró con paredes rectangulares de mecaquilato para contener las soluciones con colorantes. Estas baldosas fueron elaboradas industrialmente. Para este estudio se realizó el montaje del sistema de reacción que consistió en una lámpara de luz ultravioleta (UV) a una altura desde la base de la celda de reacción de dióxido de titanio de 26 cm, con el soporte nivelado se ubica tanto la celda de reacción como el soporte con la lámpara en una ubicación fija y se estableció mantenerla así durante la obtención de datos y/o mediciones de todas las muestras.

Las condiciones de trabajo para la obtención de datos fue trabajar con la luz del laboratorio encendida siempre que esté prendida la lámpara de luz ultravioleta (UV) para evitar la distorsión o afectación de las muestras procurando siempre tener las mismas condiciones en cada medición de las soluciones con colorantes.

### **2.2 Preparación de patrones para determinación de curvas de calibración**

Se prepararon 5 soluciones de los colorantes, con concentraciones diferentes para cada colorante denominados patrones y una concentración madre de colorante (azul, verde, rojo), la cual fue la concentración inicial para obtener las curvas de calibración de cada colorante.



Se tomó en cuenta que al efectuar este procedimiento se realizó la adecuación y calibración del equipo espectrofotómetro, antes de realizar cualquier medición, primero colocando una celda de cuarzo con un patrón de solución y hacer un barrido espectral para determinar las longitudes de onda de la adsorción de cada colorante.

### **2.3 Curvas de calibración de colorantes**

Las curvas de calibración son una herramienta gráfica que muestran la relación entre absorbancia y concentración (Fajardo et al., 2018). Para el presente estudio, se obtuvo primero, una muestra madre diluyendo 0,1 gramos de colorante sintético en 1000 ml de agua destilada equivalente a 100 ppm, usando como punto de partida la muestra madre se obtuvieron patrones de 50,25,20,10 y 5 ppm. Al iniciar, se midió la absorbancia de la primera muestra antes de aplicar el método por 15 minutos, luego se repitió para las siguientes muestras y se midió la absorción cada 15 minutos hasta 180 minutos (3 horas) y se obtuvo un total de 13 muestras de datos que nos permitieron graficar y observar la degradación del colorante con el paso del tiempo.

### **2.4 Reacción Fotocatalítica**

La fotocatalisis con el dióxido de titanio, a través de la luz UV absorbe fotones con energía, lo que excita electrones desde la banda de valencia, la que crea electrones libres y huecos. Los electrones y huecos en la banda de valencia interactúan como moléculas en la fase líquida, lo que lleva a la formación de radicales, como radical hidroxilo y superóxido, que son los responsables de la oxidación y degradación de los contaminantes (Baycan Parilti & Akten, 2011; Broccoli et al., 2023).

### **2.5 Determinación UV - Vis**

Mediante la espectrofotometría UV/Visible, es posible detectar la absorbancia de determinados elementos cromóforos en el rango de longitudes de onda comprendido entre 190 y 700 nm, es decir, desde el cercano UV (190 a 400 nm) hasta todo el espectro visible (400 a 700 nm) inclusive. Esta técnica se basa en la capacidad de las moléculas en solución de absorber la radiación incidente, ya sea en forma total o parcial (Camelino et al., 2018).

Se utilizó el equipo Espectrofotómetro Thermo Scientific modelo EVO 60 para detectar la absorbancia de los colorantes y sus longitudes de onda. Una vez realizada la adecuación de condiciones del equipo se obtiene para cada colorante valores de longitudes de onda diferentes ya que cada color tiene diferencias en su estructura molecular.

## 2.6 Cinética de reacción

A partir de los datos obtenidos gracias al equipo espectrofotómetro se observó una degradación fotocatalítica del colorante en el agua residual en contacto con la placa de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), donde la concentración de los colorantes analizados disminuyó con el tiempo, se ha determinado tomar muestras del colorante en lapsos de tiempo de 15 minutos, al pasar el tiempo se puede observar un cambio leve de color en el agua coloreada hasta llegar a un momento donde los valores se estabilizan.

Para la realización del estudio experimental se utilizaron instrumentos y equipos de laboratorio y 3 colorantes sintéticos los cuales fueron azul, rojo y verde.

## 2.7 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La determinación del DQO se realizó siguiendo el método 5220 D. Reflujo Cerrado, método colorimétrico del Standard Methods. Se colocaron 5 ml de muestra en los tubos de digestión (Low Range Plus COD Reagent 3 -150 mg/L, Hach), los cuales fueron calentados durante 60 minutos a  $120^\circ \text{C}$ . La medición se realizó un fotómetro Lovibond MD 200 COD.

## 3. Resultados

### 3.1 Degradación de colorantes

Se presentan los resultados obtenidos de este estudio de degradación de colorantes presentes en las aguas residuales del proceso de teñido de sombreros de paja toquilla, utilizando dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) como catalizador en el proceso de degradación de los colorantes.

Los datos generados gracias al estudio experimental nos permitieron analizar la eficacia del método aplicado y su comportamiento en cada uno de los colorantes sintéticos.

Se realizó un barrido espectral entre 210 y 700 nm para seleccionar las longitudes de onda, donde cada una muestra la absorbancia para cada colorante. El proceso de degradación de los colorantes se realizó con todas las concentraciones de los colorantes preparadas.

A continuación, en la tabla 1 se muestran las longitudes de onda, que se encontraron para cada solución de colorante.

**Tabla 1. Soluciones de concentraciones de colorantes**

Colorante	Longitud de onda [nm]
Azul	252
	309

	352
	620
Rojo	256
	306
	366
	431
	520
	554
Verde	250
	316
	426
	617

Los resultados que se presentan en las tablas y graficas de este documento corresponden a las concentraciones 25 ppm, las demás tablas y graficas se encuentran en el Anexo 1.

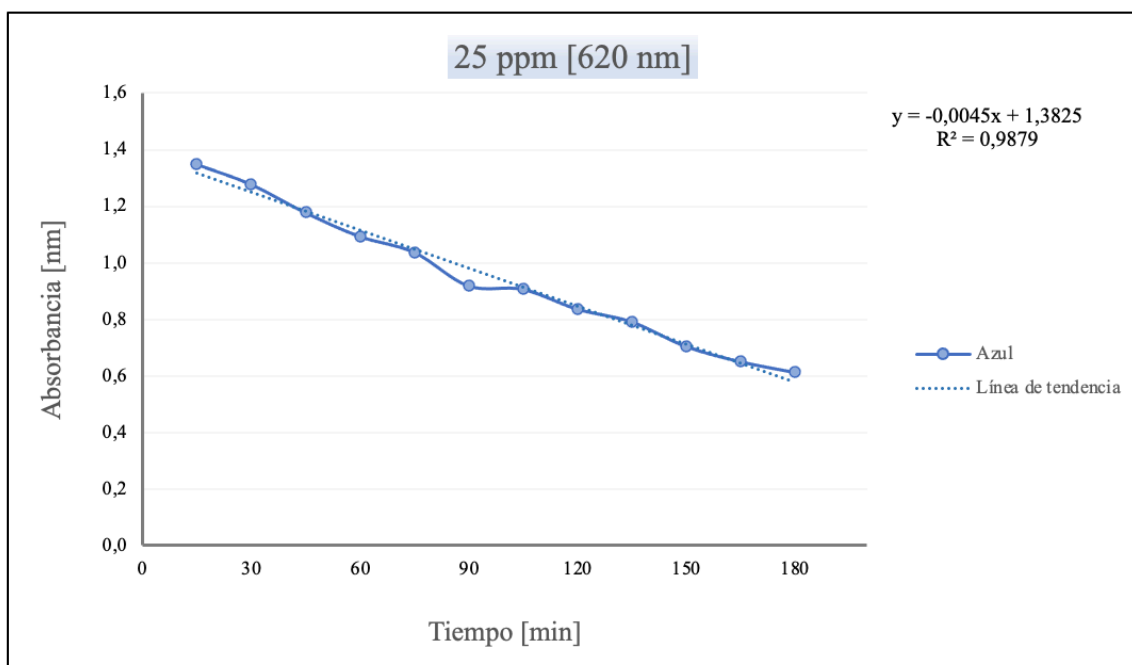
En la tabla 2, se presentan los datos recolectados en el proceso de degradacion del colorante azul para una concentración de 25 ppm, las mediciones se realizaron en intervalos de 15 minutos y mediante un espectrofotómetro se obtuvieron los valores de absorbancia con respecto al tiempo, luego se graficó los resultados para observar visualmente la degradación del colorante, la medición de la degradación de los colorantes fueron las siguientes longitudes de onda: 252 nm, 309 nm, 352 nm y 620 nm.

**Tabla 2. Datos de concentración del colorante azul**

Tiempo [min]	Absorbancia [nm]
15	1,349
30	1,278
45	1,178
60	1,094
75	1,038
90	0,919
105	0,907
120	0,837
135	0,792
150	0,705
165	0,651
180	0,613

A continuación, en la figura 1 se presenta los datos graficados de la tabla 2, la gráfica nos permite observar una evidencia visual de la degradación, lo que demuestra una efectividad del proceso de tratamiento aplicado para el colorante azul.

**Figura 1. Gráfica de decoloración del colorante azul.**



En la tabla 3, se presentan los datos recolectados en el proceso de degradación del colorante rojo para una concentración de 25 ppm, las mediciones se realizaron en intervalos de 15 minutos y mediante un espectrotómetro se obtuvieron los valores de absorción con respecto al tiempo, luego se graficó los resultados para observar visualmente la degradación del colorante y se observó que los valores de absorción para este colorante no cambian significativamente, por lo tanto, no se evidencia una degradación, la medición de la degradación de los colorantes fueron en las siguientes longitudes de onda: 256 nm, 306 nm, 366 nm, 431 nm, 520 nm y 554 nm.

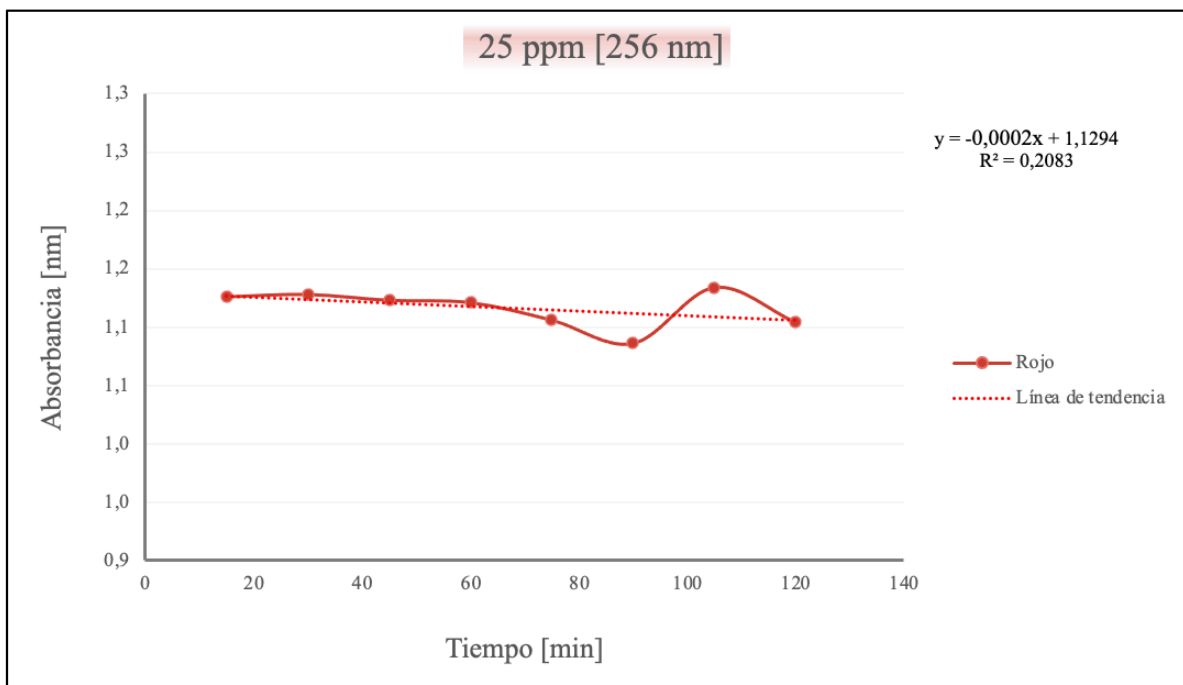
**Tabla 3. Datos de concentración del colorante rojo**

Tiempo [min]	Absorbancia [nm]
15	1,126

30	1,128
45	1,123
60	1,121
75	1,106
90	1,086
105	1,134
120	1,104

En la figura 2, se presentan los datos graficados de la tabla 3, se estableció una longitud de onda a 256 nm a una concentración de 25 ppm. La gráfica permite observar que no existe reacción o cambios en el comportamiento del colorante rojo, demostrando ineffectividad del método aplicado para el colorante rojo.

**Figura 2. Gráfica de decoloración del colorante rojo**



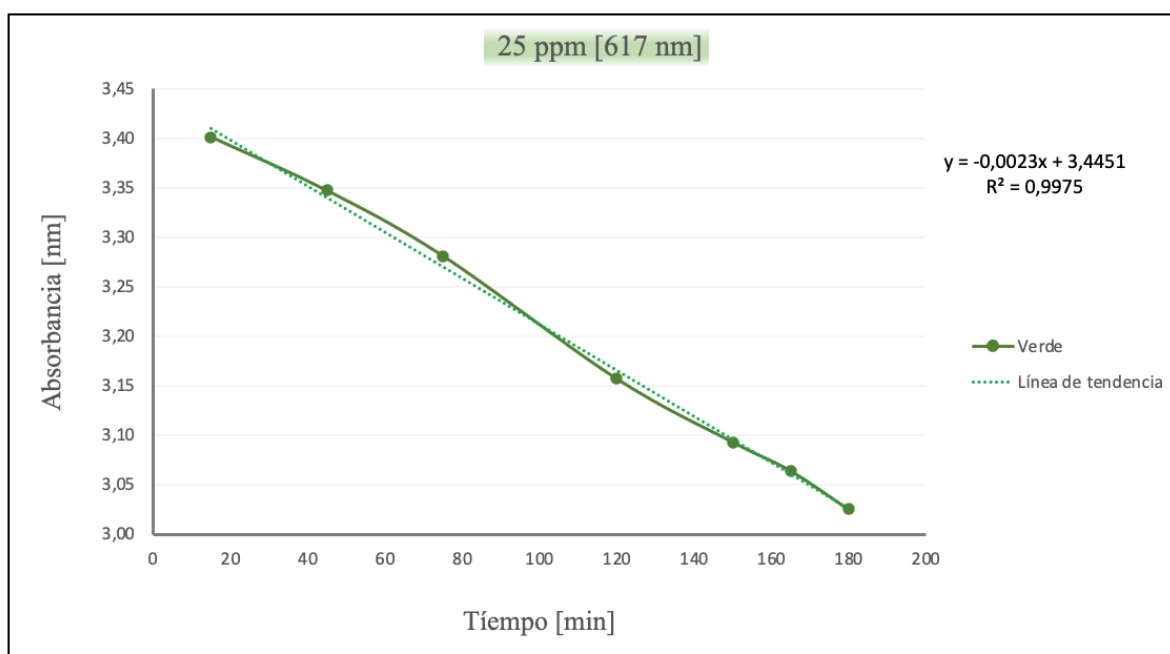
En la tabla 4, se presentan los datos recolectados en el proceso de degradación del colorante verde para una concentración de 25 ppm, las mediciones se realizaron en intervalos de 15 minutos, mediante un espectrofotómetro se obtuvieron los valores de absorbancia con respecto al tiempo, luego se graficó los resultados para observar visualmente la degradación del colorante, la medición de la degradación de los colorantes fueron en las siguientes longitudes de onda: 250 nm, 316 nm, 426 nm, y 617 nm.

**Tabla 4. Datos de concentración del colorante verde**

Tiempo [min]	Absorbancia [nm]
15	3,401
45	3,347
75	3,281
120	3,157
150	3,093
165	3,064
180	3,025

En la figura 3, se presentan los datos graficados de la tabla 4, se estableció una longitud de onda a 617 nm a una concentración de 25 ppm. Se observó que existe una degradación de este colorante al transcurrir el tiempo, demostrando efectividad del método aplicado para este colorante.

**Figura 3. Gráfica de decoloración del colorante verde**



### 3.2 Cinética de reacción

A continuación, se muestran las tablas y gráficas generadas para calcular la cinética de reacción de los colorantes sintéticos, se aplicó el logaritmo a la relación entre la concentración inicial y

la concentración en cada punto para poder linealizar los datos y obtener los valores de la velocidad de degradación y el orden de la cinética de degradación. La tabla 5, muestra los datos linealizados para la cinética de primer orden del colorante azul de 25 ppm, la tabla 6 muestra las características de la cinética de la degradación del colorante rojo de 25 ppm y por último, la tabla 7 muestra los datos linealizados para la cinética de primer orden del colorante verde de 25 ppm.

**Tabla 5. Datos de cinética de colorante azul**

Tiempo [min]	Absorbancia [nm]	ABS/ABS <sub>0</sub>	Ln(ABS/ABS <sub>0</sub> )
15	1,349	1,000	0,000
30	1,278	0,947	-0,054
45	1,178	0,873	-0,136
60	1,094	0,811	-0,210
75	1,038	0,769	-0,262
90	0,919	0,681	-0,384
105	0,907	0,672	-0,397
120	0,837	0,620	-0,477
135	0,792	0,587	-0,533
150	0,705	0,523	-0,649
165	0,651	0,483	-0,729
180	0,613	0,454	-0,789

**Tabla 6. Datos de cinética de colorante rojo**

Tiempo [min]	Absorbancia [nm]	ABS/ABS <sub>0</sub>	Ln(ABS/ABS <sub>0</sub> )	1/ABS
15	1,126	1,000	0,0000	0,8881
30	1,128	1,002	0,0018	0,8865
45	1,123	0,997	-0,0027	0,8905
60	1,121	0,996	-0,0045	0,8921
75	1,106	0,982	-0,0179	0,9042
90	1,086	0,964	-0,0362	0,9208
105	1,134	1,007	0,0071	0,8818
120	1,104	0,980	-0,0197	0,9058

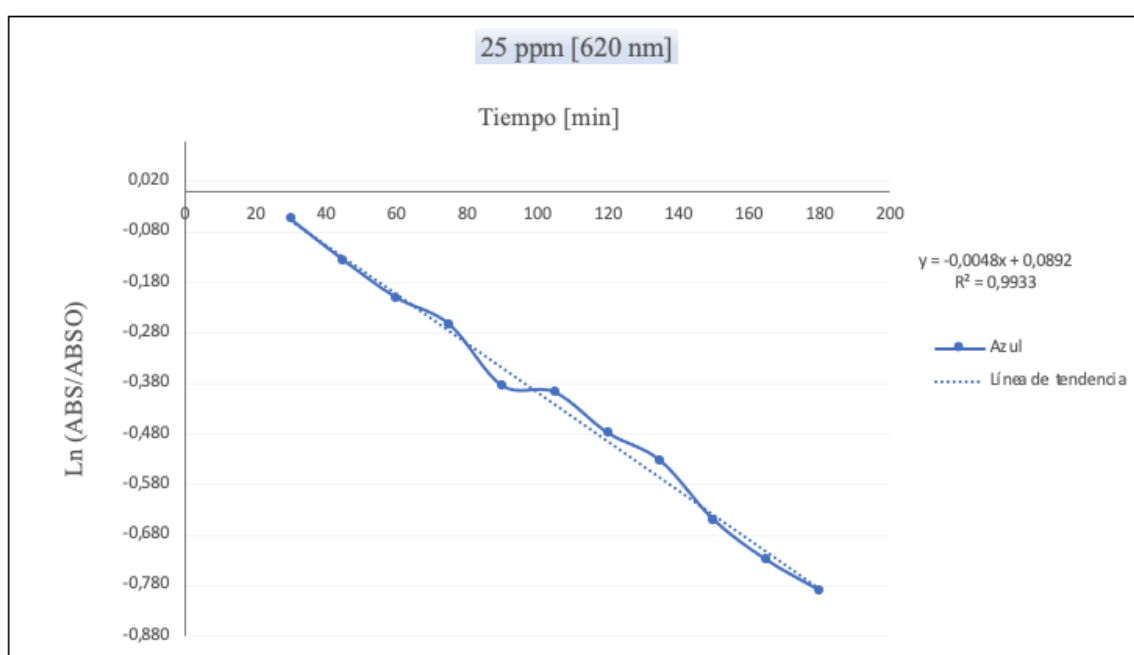
**Tabla 7. Datos de cinética de colorante verde**

Tiempo [min]	Absorbancia [nm]	ABS/ABS <sub>0</sub>	Ln(ABS/ABS <sub>0</sub> )
15	3,401	1,000	0,000

45	3,347	0,984	-0,016
75	3,281	0,965	-0,036
120	3,157	0,928	-0,074
150	3,093	0,909	-0,095
165	3,064	0,901	-0,104
180	3,025	0,889	-0,117

Las figuras 4-6 muestran las relaciones existentes entre los valores obtenidos del logaritmo de cada colorante para una concentración de 25 ppm, donde se observará los valores de velocidad de degradación con respecto al tiempo.

**Figura 4. Gráfica de cinética del colorante azul**



En la figura 5, se evidencia que el colorante sintético rojo no presenta ningún tipo de reacción con el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y exposición bajo luz ultravioleta (UV).



Figura 5. Gráfica de cinética del colorante rojo

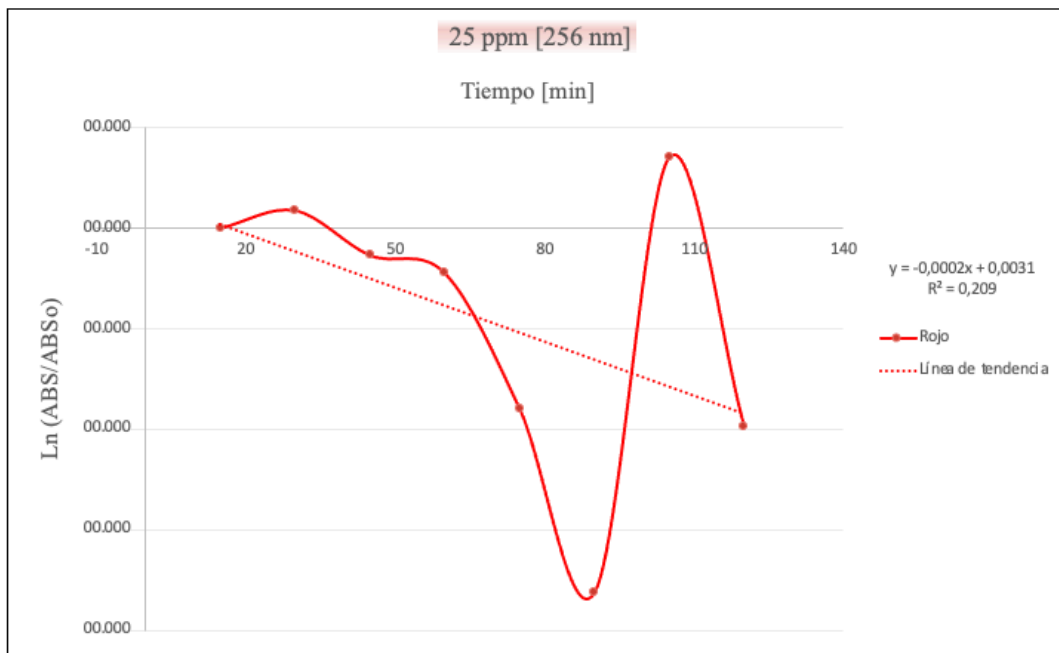
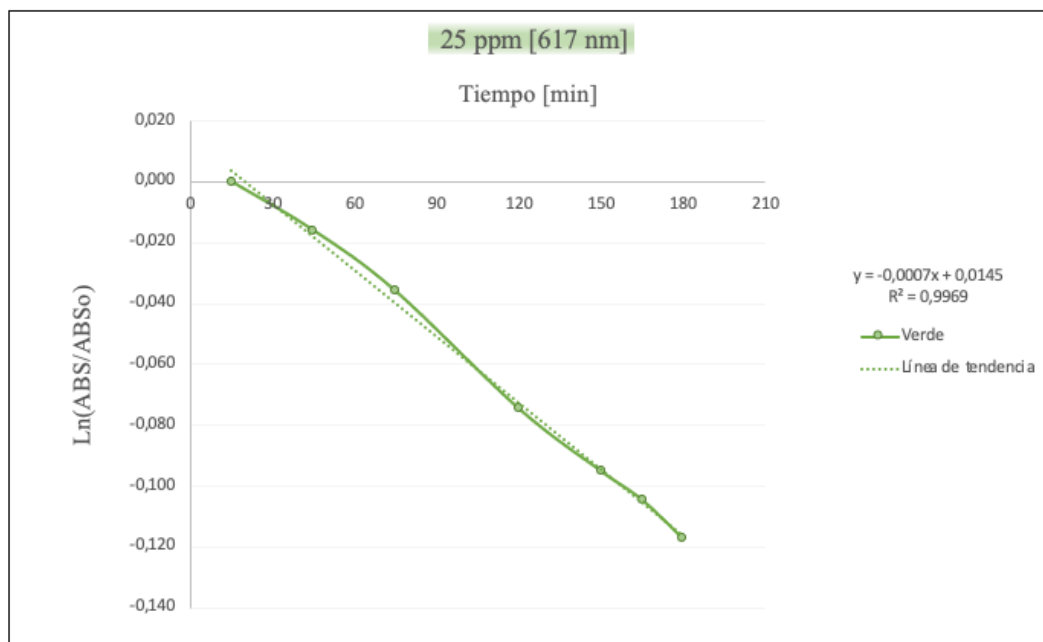


Figura 6. Gráfica de cinética del colorante verde



Sin embargo, el colorante azul y verde presentan variaciones con respecto al tiempo de exposición al método, estos cambios pueden ocurrir a factores como la concentración del colorante y son reflejados en la figura 4 y 6. Una pendiente más pronunciada refleja una velocidad de reacción más rápida.

### 3.3 Orden de reacción

En las siguientes tablas, se puede observar el orden de reacción de cada colorante a diferente concentración, esto nos permite conocer como la concentración del colorante afecta la velocidad de su degradación.

**Tabla 8. Orden de reacción del colorante sintético azul**

Concentración [ppm]	Orden	Velocidad de degradación [ppm/min]	Longitud de Onda [nm]
5	1	-0,0158	620
10	1	-0,0126	620
20	0	-0,0057	620
25	0	-0,0048	620

**Tabla 9. Orden de reacción del colorante sintético rojo**

Concentración [ppm]	Orden	Velocidad de degradación [ppm/min]	Longitud de Onda [nm]
5	N/A	N/A	N/A
10	N/A	N/A	N/A
20	N/A	N/A	N/A
25	N/A	N/A	N/A

**Tabla 10. Orden de reacción del colorante sintético verde**

Concentración [ppm]	Orden	Velocidad de degradación [ppm/min]	Longitud de Onda [nm]
1	0	-0,0005	617
5	0	-0,0027	617
10	0	-0,0032	617
20	0	-0,0056	617

25	0	-0,0023	617
----	---	---------	-----

Cada colorante puede tener un orden de reacción diferente para su degradación, el orden es influenciada por las características químicas que tiene cada colorante y las condiciones experimentales que se utilicen.

En la tabla 9, ya que el colorante rojo al no tener ninguna reacción con el método no existen datos debido a que no existe degradación visible, por lo tanto, el colorante sintético rojo no se degrada bajo las condiciones experimentales propuestas.

### 3.4 Valores de DQO

El límite de detección del método fue 2 mg/L, las muestras medidas dieron valores menores al límite de detección del método.

**Tabla 11. Valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Muestra	Concentración [ppm]	DQO LD: 2 mg/L
Colorante Azul	5	< LD
	10	< LD
	20	< LD
	25	< LD
Colorante Rojo	5	< LD
	10	< LD
	20	< LD
	25	< LD
Colorante Verde	1	< LD
	5	< LD
	10	< LD
	20	< LD
	25	< LD

En la tabla 11, se observó que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las muestras analizadas no supera el límite de detección del método. Esto indica que todas las

concentraciones evaluadas no representan un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud humana.

#### **4. Discusión**

Los resultados de este estudio al aplicar el método propuesto también se ven reflejados en la investigación de (Pérez Cevallos, 2018) donde señala la efectividad del dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) para degradar los colorantes textiles, refiriéndose como un método viable para el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de tinturación de industrias textiles y con el cual se alcanzaron altos porcentajes en la disminución del color.

La degradación de los colorantes azul y verde, durante las pruebas experimentales fue efectiva en las condiciones propuestas, se observó una disminución del color de la solución en la celda de reacción durante los intervalos de tiempo propuestos, además esto se ve reflejado en los valores iniciales y finales de su absorbancia medidas reflejadas en la tabla 2 y 4.

Se observó que el colorante rojo no mostró cambios relevantes durante el proceso de fotocatalisis, por lo tanto, no hay una degradación visible, a diferencia de los otros colorantes analizados sin embargo la utilización de catalizadores puede incrementar la posibilidad de degradación del colorante. En la investigación de (Garcés et al., 2004) se utilizó la fotodegradación con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) del colorante rojo amaranto y como catalizador peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y se demostró que la fotodegradación sensibilizada con dióxido de titanio y peróxido de hidrógeno como agente oxidante utilizando un colector solar para el tratamiento de aguas coloreadas con Rojo Amaranto, es un proceso altamente atractivo y efectivo, siempre y cuando se trabaje preferiblemente el peróxido de hidrógeno en su máximo nivel (2 ml/L) en combinación con dosis entre 50 y 150 mg/L de dióxido de titanio, donde siempre las degradaciones van a ser superiores al 85%. Sin embargo, factores como el tiempo de exposición del colorante a la luz ultravioleta (UV) pueden mostrar variaciones significativas en los resultados cuando se emplean períodos de exposición más prolongados. En general, las moléculas de los colorantes utilizados en la actualidad son de estructuras muy variadas y complejas. La mayoría de ellos son de origen sintético, muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables (Peñuela et al., 2005).

## 5. Conclusiones

Se determinó la degradación de los colorantes presentes en las aguas residuales del proceso de teñido de sombreros de paja toquilla mediante una celda de reacción de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y luz ultravioleta (UV) es una metodología efectiva para reducir significativamente la concentración de los colorantes como el azul y el verde; sin embargo, el colorante rojo mostró resistencia a la degradación en estas condiciones experimentales.

Los valores de degradación al final del método aplicado, se evidenció el porcentaje de degradación en el colorante azul a una longitud de onda de 620 nm, 5 ppm de 72,13 %, 10 ppm de 78,75%, 20 ppm de 51,51% y 25 ppm de 54,56 %. En color verde el porcentaje de degradación en la longitud de onda de 617 nm, 1 ppm de 76,87%, 5 ppm de 69,44 %, 10 ppm de 35,22 %, 20 ppm de 28,12 % y 25 ppm de 11,06 %. Los valores de absorbancia para el colorante rojo presentan variaciones a lo largo del tiempo sin evidenciar una degradación.

La velocidad de degradación de las soluciones con colorante al aplicar el método mostraron como resultado una velocidad de -0,0045 ppm/min para el colorante azul, -0,0023 ppm/min para el colorante verde y en el caso del colorante rojo, no se observó una degradación. Por lo tanto, el colorante azul presentó una velocidad de degradación alta en comparación con los demás colorantes.

Las diferentes concentraciones de las soluciones con colorantes presentan reacciones de orden cero, de primer orden o sin un orden definido. El colorante azul a concentraciones de 5 y 10 ppm presentan una reacción de primer orden mientras que a concentraciones de 20 y 25 ppm presentan una reacción de orden cero. El colorante verde en concentraciones de 1,5,10,20 y 25 ppm presentan reacciones de orden cero, y por último, las concentraciones del colorante rojo no presentan un orden definido.

En Ecuador, aunque no existe una normativa específica para la regulación de colorantes en efluentes, se cuenta con una regulación para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) establecida en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), los valores de DQO de los tres colorantes analizados se muestran en la tabla 11 y no superan los límites permitidos, debido a la baja cantidad de moléculas de colorantes en el agua residual. Por lo tanto, no presenta un riesgo descargar bajas concentraciones al sistema de alcantarillado público a pesar de la intensidad de color que estas presenten.

## 6. Referencias bibliográficas

1. Baycan Parilti, N., & Akten, D. (2011). Optimization of TiO<sub>2</sub>/Fe(III)/solar UV conditions for the removal of organic contaminants in pulp mill effluents. *Desalination*, 265(1–3), 37–42. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2010.07.027>
2. Broccoli, F., Paparo, R., Iesce, M. R., Di Serio, M., & Russo, V. (2023). Heterogeneous Photodegradation Reaction of Phenol Promoted by TiO<sub>2</sub>: A Kinetic Study. *ChemEngineering* 2023, Vol. 7, Page 27, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/CHEMENGINEERING7020027>
3. Camelino, S. O., Minchiotti, M., Bariles, R., Padilla, R. L., & Colazo, J. (2018). Optimización de un procedimiento para la determinación de oro mediante espectrofotometría UV/Vis. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(2), e12005. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0342>
4. Fajardo, J. J., Caicedo, R., Pablo, J., & Preparado, P. (2018). *CURVA DE CALIBRACIÓN*.
5. Lliguin, S. (2019). *La experiencia turístico-cultural de los visitantes en los museos del sombrero de paja toquilla de Cuenca-Ecuador*, <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/32914/1/Trabajo%20de%20titulaci%20n.pdf%20TUR%20275.pdf>
6. Llull, J. (2005, February). *Evolución del concepto y de la significación social del patrimonio cultural*. <https://revistas.ucm.es/index.php/ARIS/article/view/ARIS0505110177A/5813>.
7. Pérez Cevallos, N. R. (2018). *Tratamiento de aguas residuales de industria textil mediante fotocátalisis con dióxido de titanio (Tesis de pregrado)*. Universidad de las Américas, Quito. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9316>
8. Restrepo, Alejandra & Peñuela, Gustavo & Salazar, Julian & Garces Giraldo, Luis & Ángel, Marta. (2005). *Degradación de aguas residuales de la industria textil por medio de fotocátalisis*. *Revista Lasallista de Investigación*. [https://www.researchgate.net/publication/26612991\\_Degradacion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_de\\_la\\_industria\\_textil\\_por\\_medio\\_de\\_fotocatalisis](https://www.researchgate.net/publication/26612991_Degradacion_de_aguas_residuales_de_la_industria_textil_por_medio_de_fotocatalisis).
9. Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, A., & Peñuela Mesa, G. A. (2004). *Fotodegradación con TIO<sub>2</sub> del colorante rojo amaranto en aguas*. Red Revista Lasallista de Investigación. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69510202.pdf>



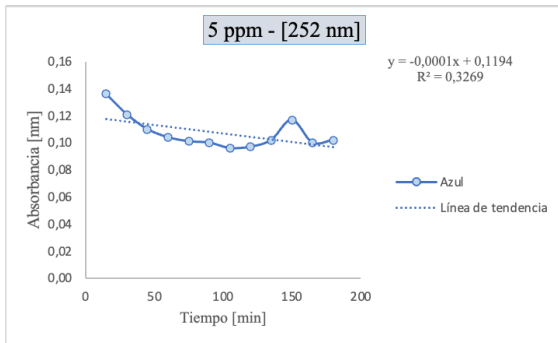






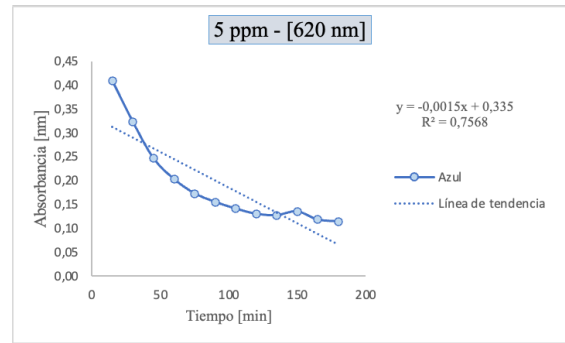
Tiempo (min)	250 nm	% Degradación	316 nm	% Degradación	426 nm	% Degradación	617 nm	% Degradación
15	0,415		0,797		0,83		3,401	
30	0,411	0,96	0,783	1,76	0,816	1,69	3,418	-0,50
45	0,421	-1,45	0,78	2,13	0,808	2,65	3,347	1,59
60	0,424	-2,17	0,768	3,64	0,792	4,58	3,381	0,59
75	0,44	-6,02	0,771	3,26	0,791	4,70	3,281	3,53
90	0,445	-7,23	0,763	4,27	0,779	6,14	3,319	2,41
105	0,448	-7,95	0,753	5,52	0,766	7,71	3,328	2,15
120	0,447	-7,71	0,74	7,15	0,751	9,52	3,157	7,17
135	0,444	-6,99	0,726	8,91	0,734	11,57	3,175	6,65
150	0,447	-7,71	0,718	9,91	0,723	12,89	3,093	9,06
165	0,458	-10,36	0,712	10,66	0,713	14,10	3,064	9,91
180	0,467	-12,53	0,711	10,79	0,705	15,06	3,025	11,06

**Figura 1. Grafica de decoloración de longitud de onda de 252 nm de 5 ppm color azul.**



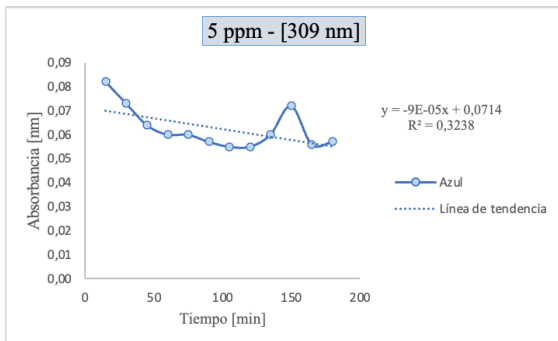
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 4. Grafica de decoloración de longitud de onda de 620 nm de 5 ppm color azul.**



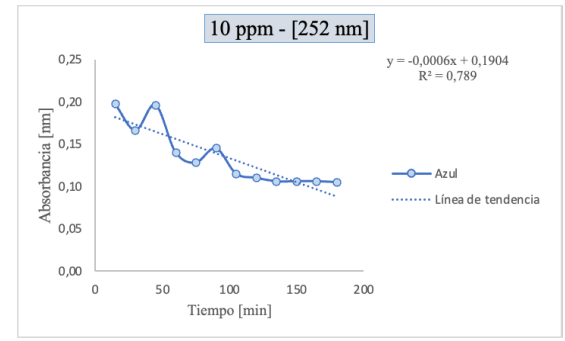
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 2. Grafica de decoloración de longitud de onda de 309 nm de 5 ppm color azul.**



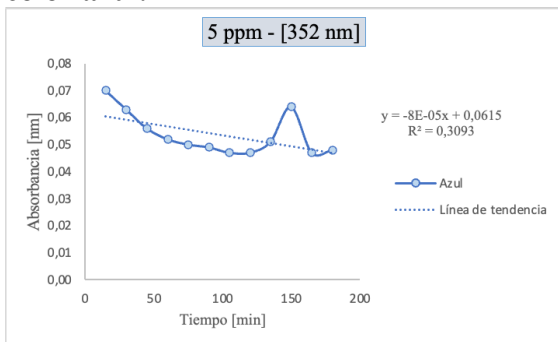
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 5. Grafica de decoloración de longitud de onda de 252 nm de 10 ppm color azul.**



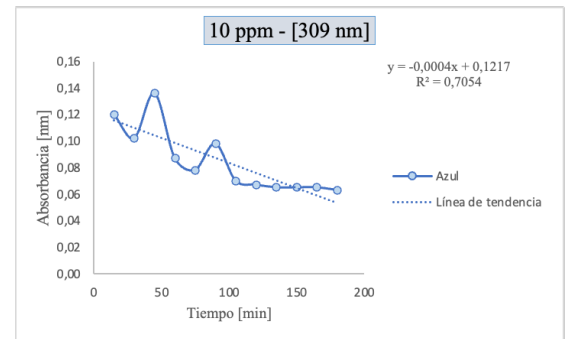
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 3. Grafica de decoloración de longitud de onda de 352 nm de 5 ppm color azul.**



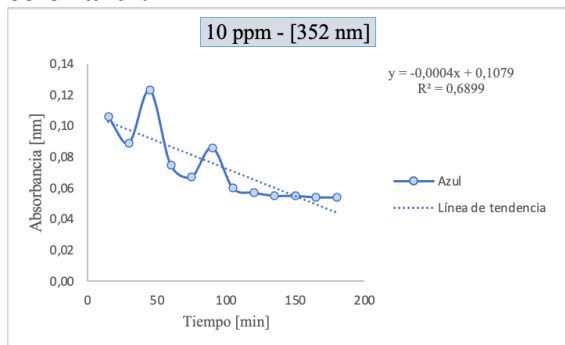
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 6. Grafica de decoloración de longitud de onda de 309 nm de 10 ppm color azul.**



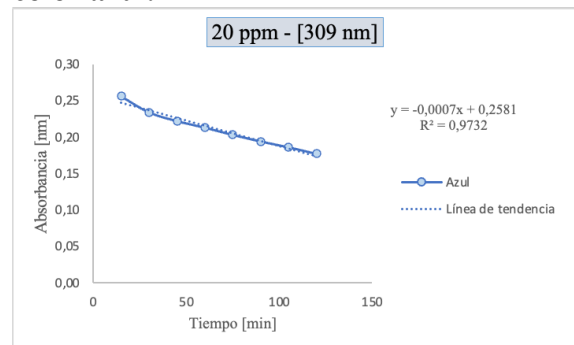
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 7. Grafica de decoloración de longitud de onda de 352 nm de 10 ppm color azul.**



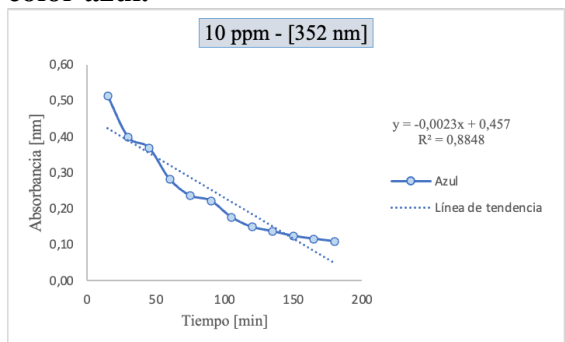
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 10. Grafica de decoloración de longitud de onda de 309 nm de 20 ppm color azul.**



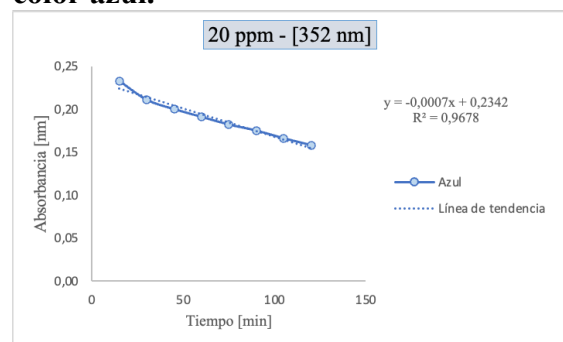
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 8. Grafica de decoloración de longitud de onda de 620 nm de 10 ppm color azul.**



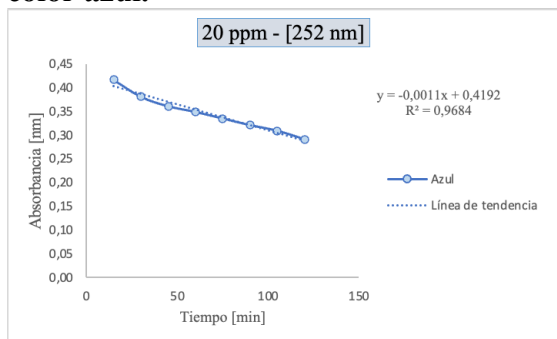
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 11. Grafica de decoloración de longitud de onda de 352 nm de 20 ppm color azul.**



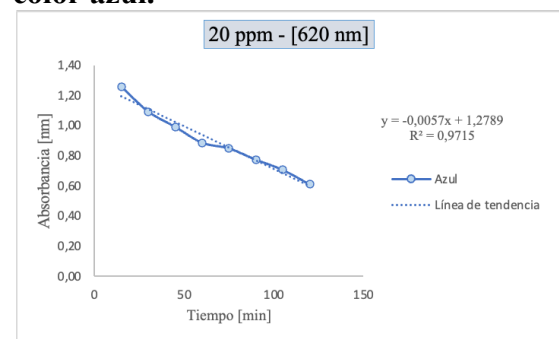
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 9. Grafica de decoloración de longitud de onda de 252 nm de 20 ppm color azul.**



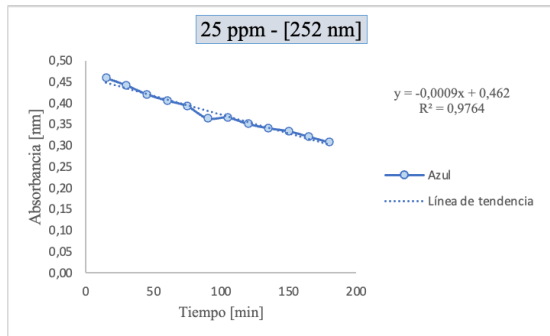
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 12. Grafica de decoloración de longitud de onda de 620 nm de 20 ppm color azul.**



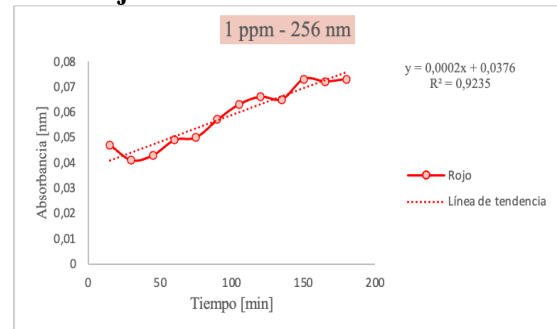
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 13. Grafica de decoloración de longitud de onda de 252 nm de 25 ppm color azul.**



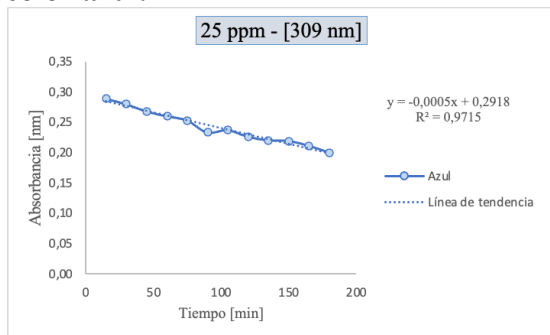
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 16. Grafica de decoloración de longitud de onda de 256 nm de 1 ppm color rojo.**



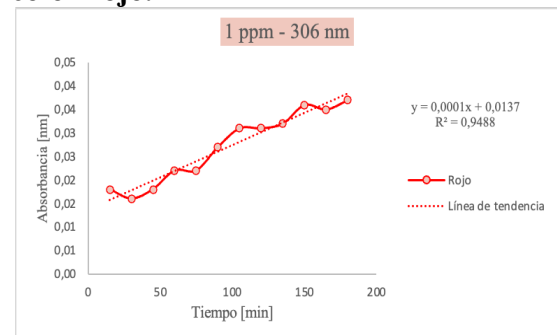
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 14. Grafica de decoloración de longitud de onda de 309 nm de 25 ppm color azul.**



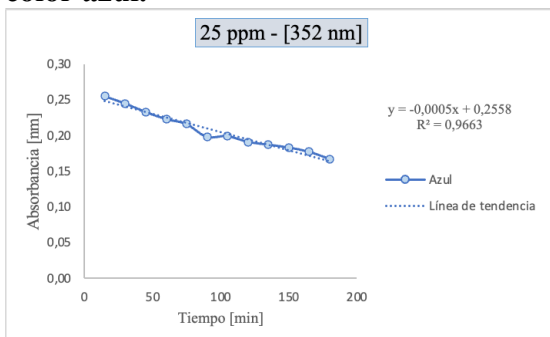
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 17. Grafica de decoloración de longitud de onda de 306 nm de 1 ppm color rojo.**



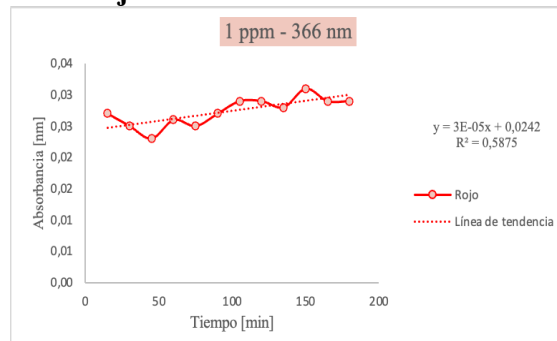
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 15. Grafica de decoloración de longitud de onda de 352 nm de 25 ppm color azul.**



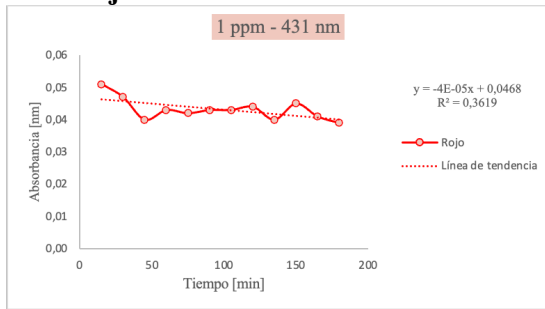
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 18. Grafica de decoloración de longitud de onda de 366 nm de 1 ppm color rojo.**



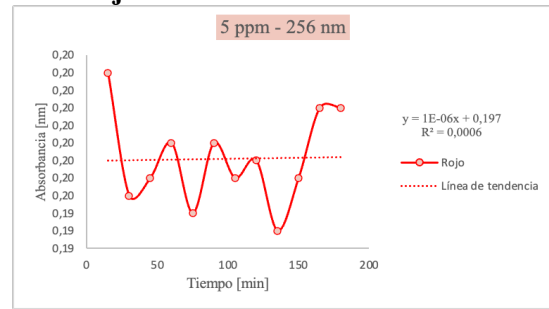
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 19. Grafica de decoloración de longitud de onda de 431 nm de 1 ppm color rojo.**



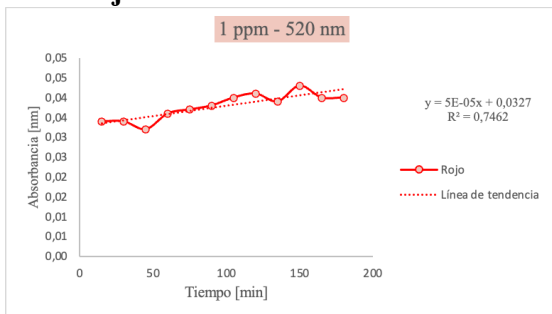
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 22. Grafica de decoloración de longitud de onda de 256 nm de 5 ppm color rojo.**



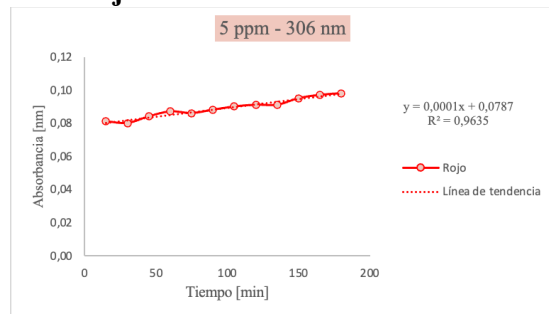
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 20. Grafica de decoloración de longitud de onda de 520 nm de 1 ppm color rojo.**



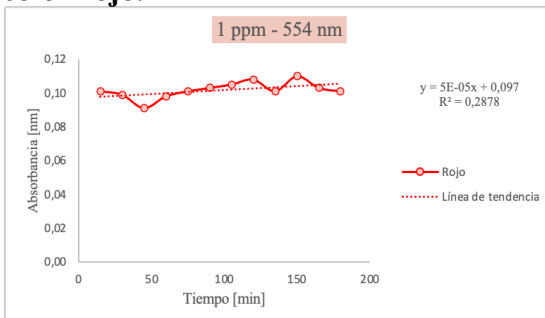
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 23. Grafica de decoloración de longitud de onda de 306 nm de 5 ppm color rojo.**



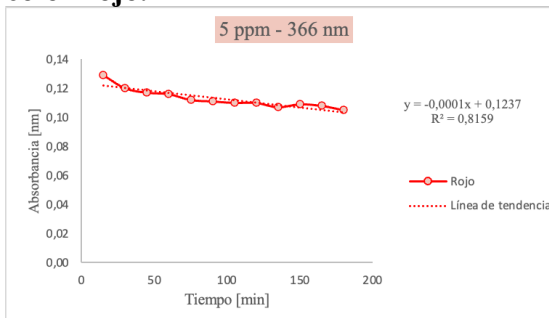
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 21. Grafica de decoloración de longitud de onda de 554 nm de 1 ppm color rojo.**



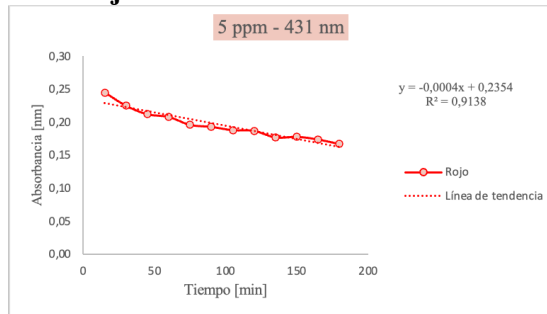
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 24. Grafica de decoloración de longitud de onda de 366 nm de 5 ppm color rojo.**



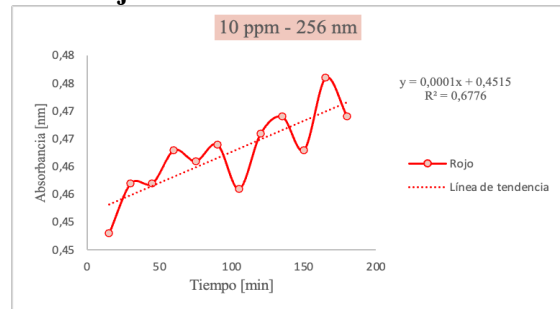
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 25. Grafica de decoloración de longitud de onda de 431 nm de 5 ppm color rojo.**



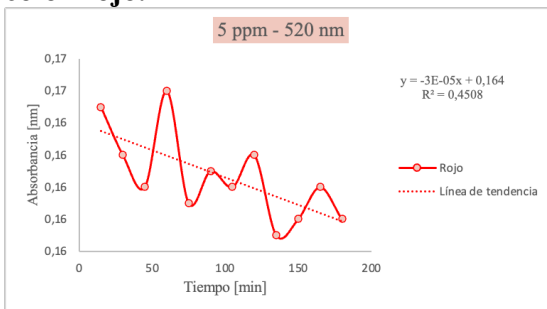
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 28. Grafica de decoloración de longitud de onda de 256 nm de 10 ppm color rojo.**



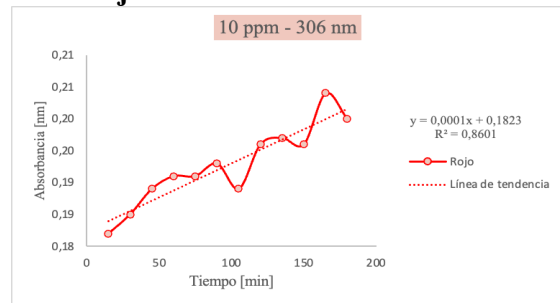
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 26. Grafica de decoloración de longitud de onda de 520 nm de 5 ppm color rojo.**



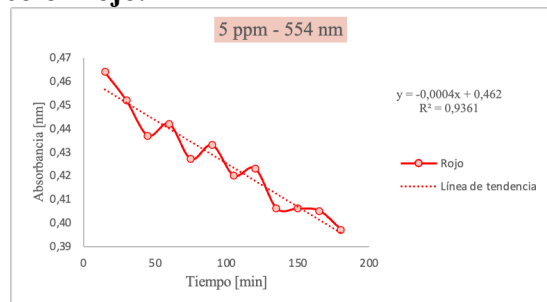
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 29. Grafica de decoloración de longitud de onda de 306 nm de 10 ppm color rojo.**



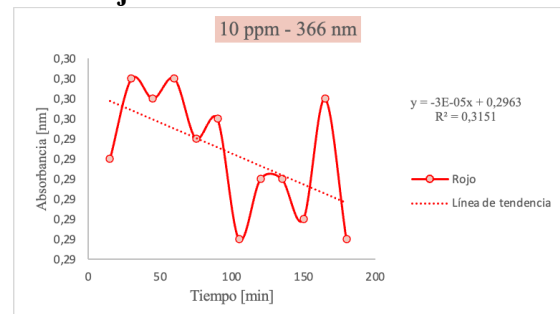
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 27. Grafica de decoloración de longitud de onda de 554 nm de 5 ppm color rojo.**



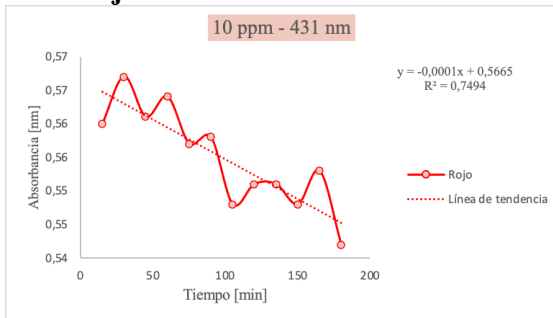
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 30. Grafica de decoloración de longitud de onda de 366 nm de 10 ppm color rojo.**



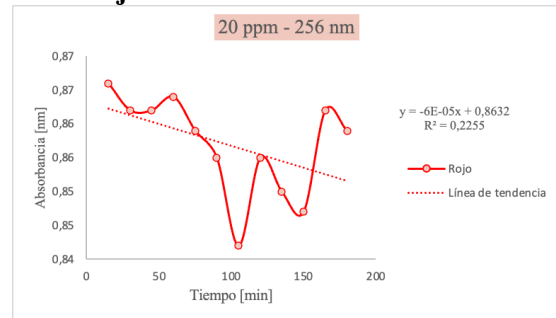
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 31. Grafica de decoloración de longitud de onda de 431 nm de 10 ppm color rojo.**



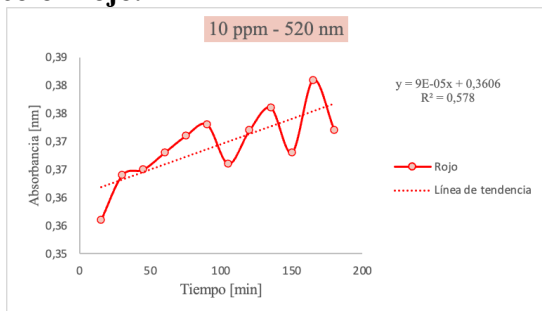
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 34. Grafica de decoloración de longitud de onda de 256 nm de 20 ppm color rojo.**



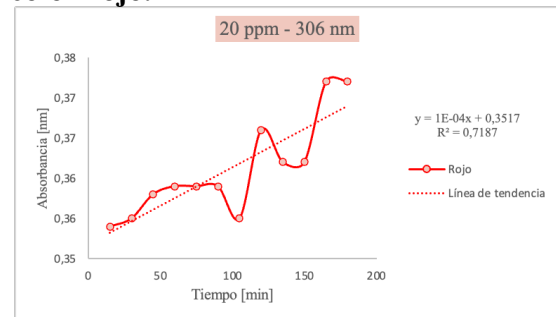
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 32. Grafica de decoloración de longitud de onda de 520 nm de 10 ppm color rojo.**



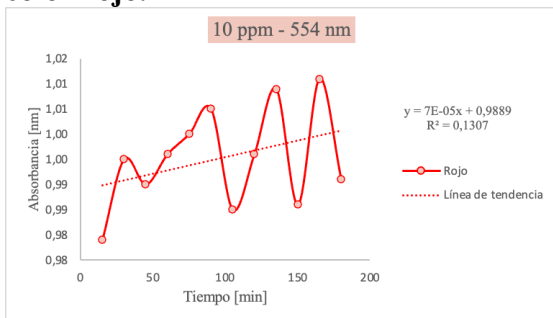
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 35. Grafica de decoloración de longitud de onda de 306 nm de 20 ppm color rojo.**



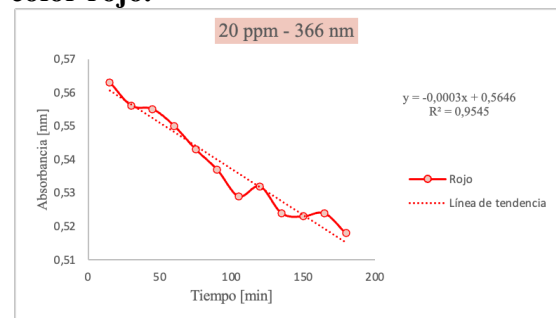
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 33. Grafica de decoloración de longitud de onda de 554 nm de 10 ppm color rojo.**



Fuente: Elaboración propia (2024)

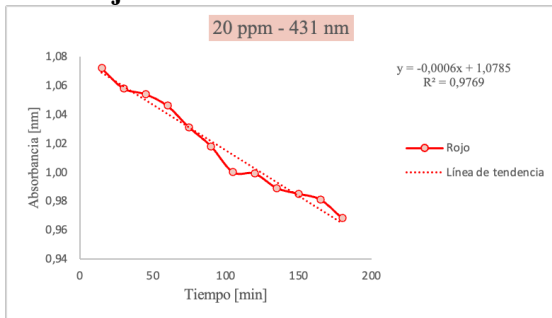
**Figura 36. Grafica de decoloración de longitud de onda de 366 nm de 20 ppm color rojo.**



Fuente: Elaboración propia (2024)

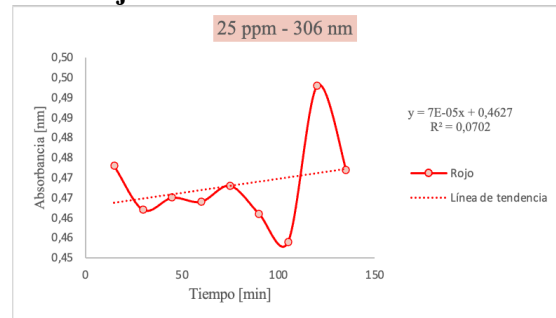


**Figura 37. Grafica de decoloración de longitud de onda de 431 nm de 20 ppm color rojo.**



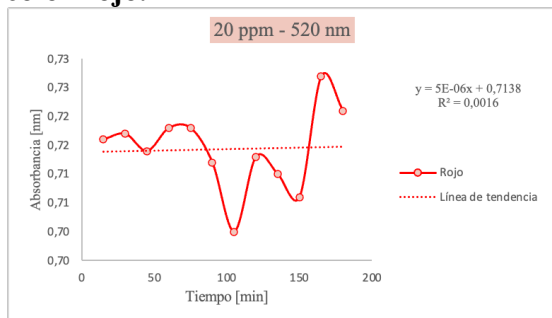
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 40. Grafica de decoloración de longitud de onda de 306 nm de 25 ppm color rojo.**



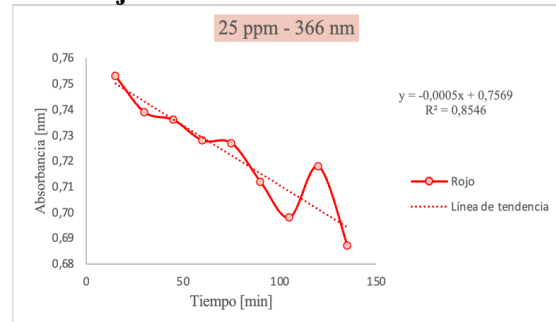
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 38. Grafica de decoloración de longitud de onda de 520 nm de 20 ppm color rojo.**



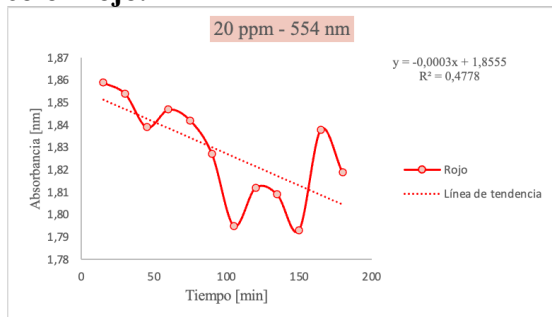
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 41. Grafica de decoloración de longitud de onda de 366 nm de 25 ppm color rojo.**



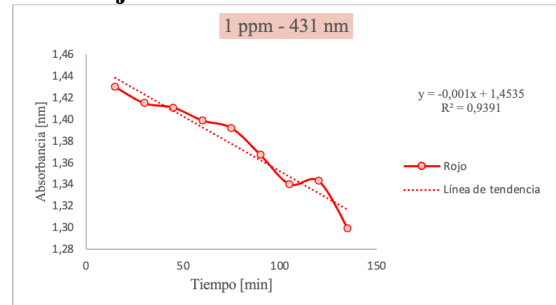
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 39. Grafica de decoloración de longitud de onda de 554 nm de 20 ppm color rojo.**



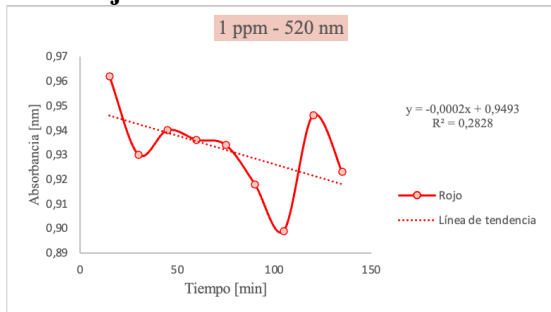
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 42. Grafica de decoloración de longitud de onda de 431 nm de 25 ppm color rojo.**



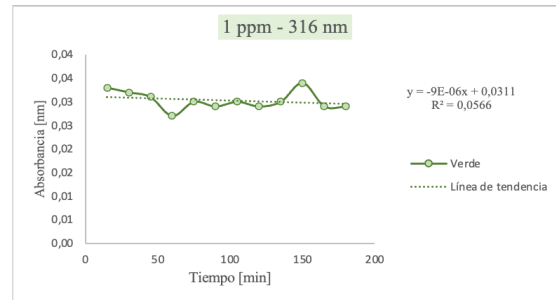
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 43. Grafica de decoloración de longitud de onda de 520 nm de 25 ppm color rojo.**



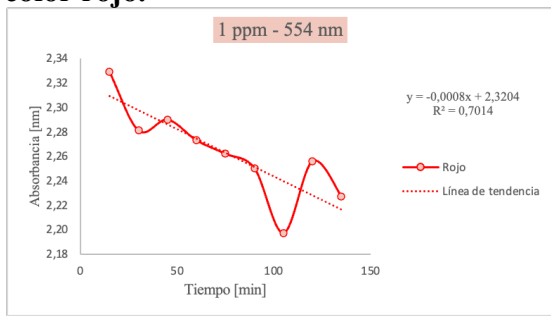
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 46. Grafica de decoloración de longitud de onda de 316 nm de 1 ppm color verde.**



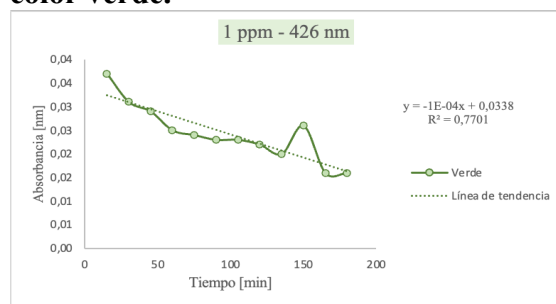
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 44. Grafica de decoloración de longitud de onda de 554 nm de 25 ppm color rojo.**



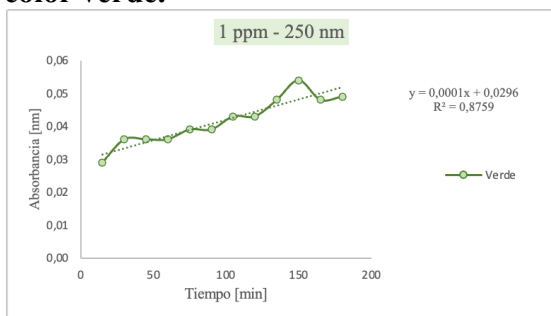
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 47. Grafica de decoloración de longitud de onda de 426 nm de 1 ppm color verde.**



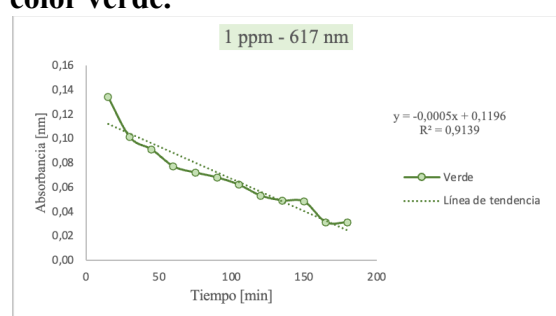
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 45. Grafica de decoloración de longitud de onda de 250 nm de 1 ppm color verde.**



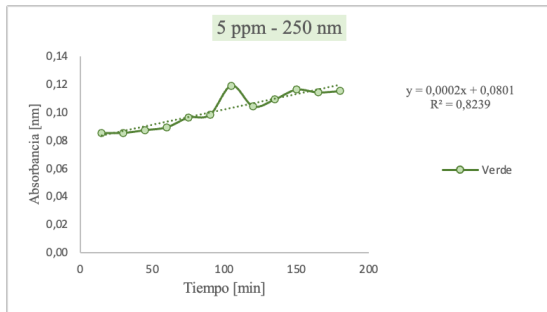
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 48. Grafica de decoloración de longitud de onda de 617 nm de 1 ppm color verde.**



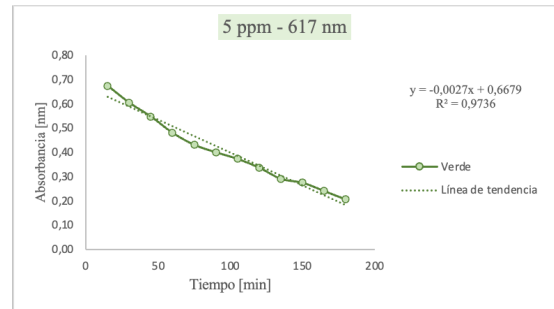
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 49. Grafica de decoloración de longitud de onda de 250 nm de 5 ppm color verde.**



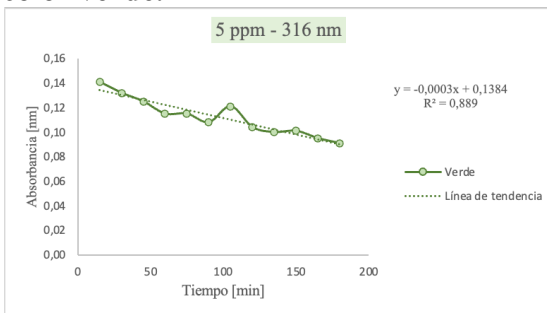
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 52. Grafica de decoloración de longitud de onda de 617 nm de 5 ppm color verde.**



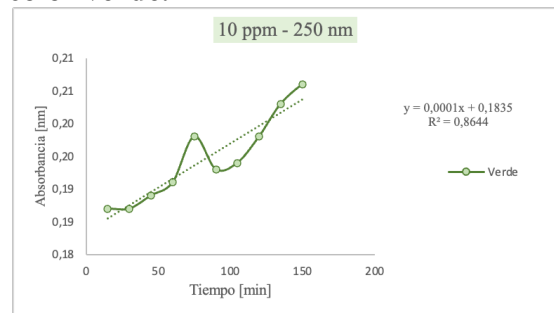
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 50. Grafica de decoloración de longitud de onda de 316 nm de 5 ppm color verde.**



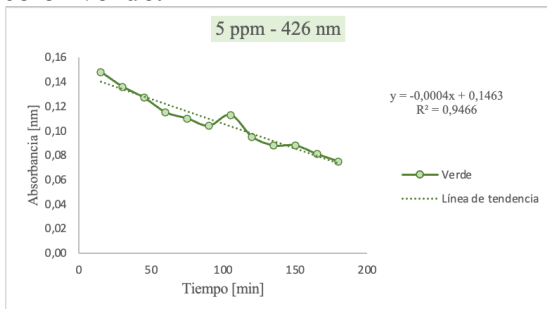
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 53. Grafica de decoloración de longitud de onda de 250 nm de 10 ppm color verde.**



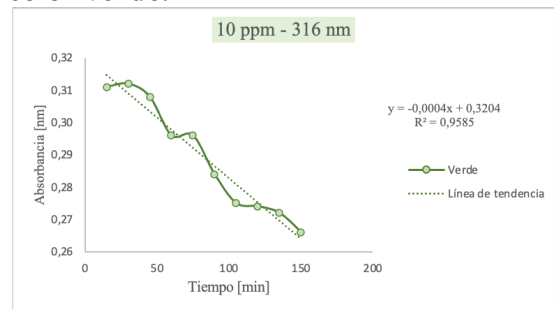
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 51. Grafica de decoloración de longitud de onda de 426 nm de 5 ppm color verde.**



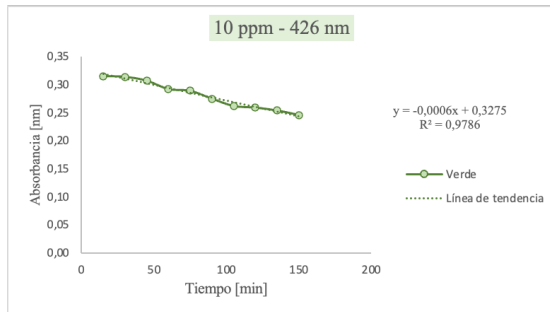
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 54. Grafica de decoloración de longitud de onda de 316 nm de 10 ppm color verde.**



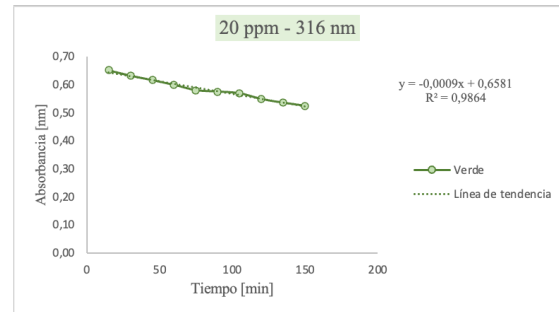
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 55. Grafica de decoloración de longitud de onda de 426 nm de 10 ppm color verde.**



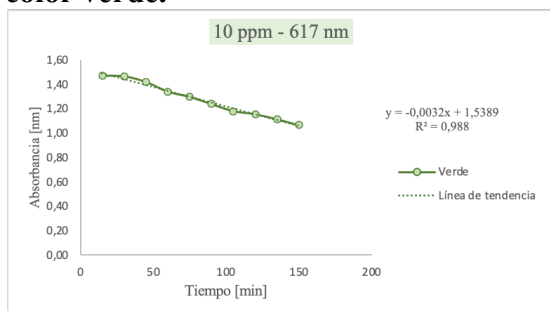
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 58. Grafica de decoloración de longitud de onda de 316 nm de 20 ppm color verde.**



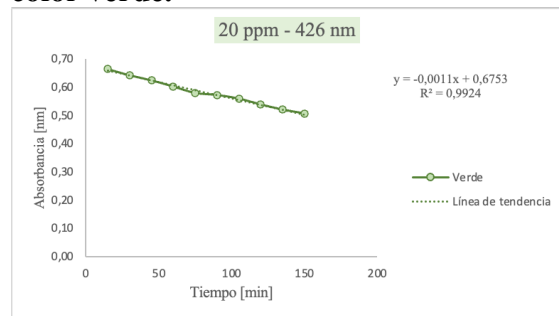
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 56. Grafica de decoloración de longitud de onda de 617 nm de 10 ppm color verde.**



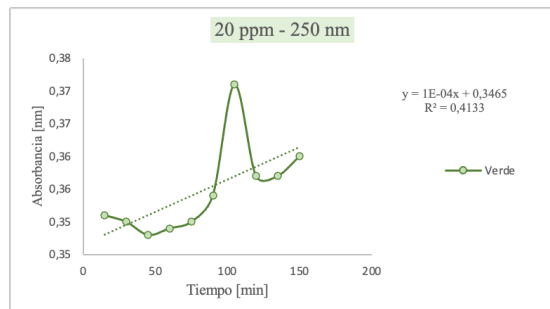
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 59. Grafica de decoloración de longitud de onda de 426 nm de 20 ppm color verde.**



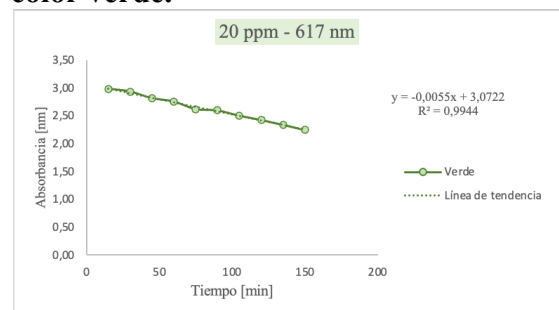
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 57. Grafica de decoloración de longitud de onda de 250 nm de 20 ppm color verde.**



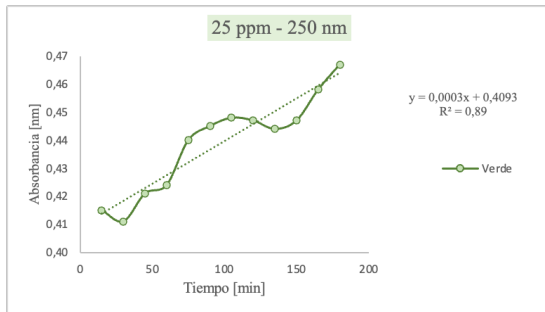
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 60. Grafica de decoloración de longitud de onda de 617 nm de 20 ppm color verde.**



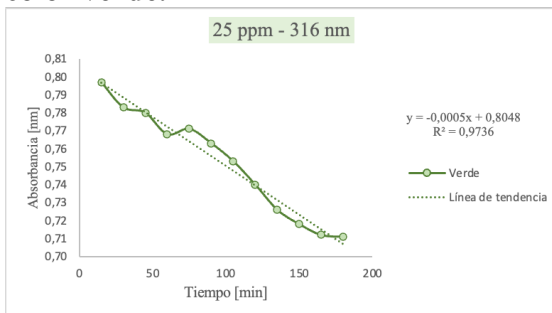
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 61. Grafica de decoloración de longitud de onda de 250 nm de 25 ppm color verde.**



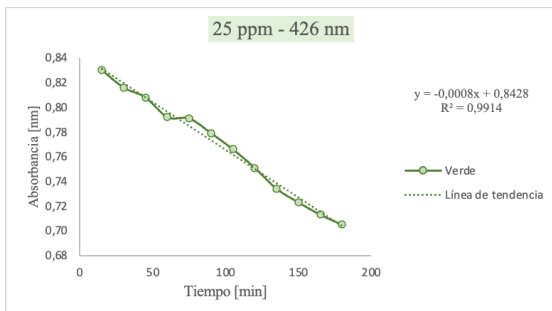
Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 62. Grafica de decoloración de longitud de onda de 316 nm de 25 ppm color verde.**



Fuente: Elaboración propia (2024)

**Figura 63. Grafica de decoloración de longitud de onda de 426 nm de 25 ppm color verde.**



Fuente: Elaboración propia (2024)