

Evaluación de un proceso combinado UV/H₂O₂ – adsorción para el tratamiento de aguas con colorantes textiles.

Cristian Felipe Alvarez Marroquin^a , Ana Carolina Ortega Tapia^a

Adriana Aristizábal Castrillón^b

Catalina Arroyave Quiceno^c

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

^b Profesora, Asesora del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

^c Profesora, Co-Asesora del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

Resumen

La industria textil juega un papel importante en la contaminación del agua debido al aporte de diferentes sustancias en grandes cantidades que están presentes en los colorantes tales como compuestos orgánicos y metales pesados. Estos terminan en cuerpos acuosos gracias a las actividades de la industria, puesto que la mayor parte del agua usada en sus procesos es desechada con residuos de colorantes. Aunque existen varias metodologías para el tratamiento de aguas residuales, la mayoría de estos procesos físicos y químicos, pueden generar subproductos de mayor toxicidad, razón por la cual se estudian procesos acoplados que permitan obtener mejores resultados. Se realizaron pruebas de remoción de tres colorantes donados por la industria textil mediante el método UV/H₂O₂, evaluando el efecto de la concentración de H₂O₂, tipo de colorante, la radiación UV, tiempo de degradación, también se evaluó la toxicidad generada con colorante antes y después del tratamiento UV/H₂O₂, antes y después de adsorción y después de la combinación de los tratamientos UV/H₂O₂ y adsorción usando sílice gel y aluminosilicato utilizando semillas de *Raphanus sativus* (RS) y *Lactuca sativa* (LS), Se realizaron análisis SEM para sílice gel y aluminosilicato obteniendo un tamaño de partícula de 45,129µm y 58,187µm respectivamente. Se evaluó la efectividad del proceso UV/H₂O₂ en combinación con adsorción para el tratamiento de aguas con colorantes textiles obteniendo como resultado que la efectividad de la combinación de estos procesos es baja, dado que se obtuvo un porcentaje de toxicidad de 59% y 80% para aluminosilicatos y sílice gel correspondientemente, en la etapa de germinación, adicional a ello se evidencio que a mayor tiempo de exposición a radiación UV y mayor volumen de H₂O₂ la toxicidad aumenta y esta se refleja en gran medida en la etapa de crecimiento de las semillas.

1. Introducción

La industria textil es una de las mayores consumidoras de agua, se estima que sus procesos utilizan alrededor de 60 a 400 L de agua por kg de producto terminado [1]. Actualmente, más de 100.000 tipos de colorantes sintéticos son usados comercialmente y en el mundo se producen alrededor de 700.000 toneladas de colorantes al año. De acuerdo con una revisión teórica previa, en la industria textil, cerca del 15 % del colorante se pierde durante el proceso y es liberado en el agua residual. Adicional a esto, el 93 % del agua usada es desechada con residuos de colorantes y, debido a la alta concentración de compuestos orgánicos y metales pesados en estos, sus vertimientos son difíciles de tratar con tratamientos convencionales [2], [3]. Los colorantes, si son vertidos, pueden causar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos debido a sus bajas condiciones biodegradables [4]. Altas concentraciones de colorantes en cuerpos acuosos detienen la capacidad de oxigenación del agua e

impiden el paso de luz solar complicando la actividad biológica de la vida acuática y los procesos de fotosíntesis de plantas y algas, lo cual causa impactos letales en los ecosistemas [5]. La toxicidad por colorantes ha sido investigada con el paso del tiempo para identificar colorantes peligrosos y proteger la salud humana y el medio ambiente, sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en el ser humano y no en velar por el resguardo de los ecosistemas, la identificación de toxicidad en diferentes niveles tróficos es relevante para juntar conocimiento ecotoxicológico y determinar límites que permitan proteger el medio ambiente [6]. En pro de ello, se evaluó la fitotoxicidad mediante semillas de *Raphanus Sativus* (RS) y *Lactuca Sativa* (LS).

La mayoría de los tratamientos convencionales de aguas son poco efectivos para la degradación y decoloración de colorantes [5]. La mayoría de las fábricas textiles en Colombia cuentan con restricciones en espacio, dinero y tiempo que limitan aún más el uso de los tratamientos [7], [8]. Dentro de los procesos de oxidación avanzada (AOPs) se encuentra el uso de radiación ultravioleta (UV) en presencia de peróxido de hidrogeno (H_2O_2), tratamiento que ha sido aplicado exitosamente en la remoción de diversos contaminantes del agua, ya que la radiación permite que el H_2O_2 se disocie en radicales altamente oxidantes. Estos radicales hidroxilos pueden descomponer e incluso mineralizar contaminantes orgánicos eficientemente al transformarlos en CO_2 , H_2O e iones inorgánicos [9]. Este proceso presenta algunas ventajas frente a los demás AOPs, tales como la miscibilidad del H_2O_2 en agua, estabilidad y accesibilidad comercial del H_2O_2 , bajos costos de inversión, condiciones de operación a temperatura ambiente y que no se forma ninguna clase de lodos durante las etapas del tratamiento, por tanto, no es necesario realizar procesos adicionales de separación. No obstante, durante el proceso de oxidación se generan compuestos que pueden ser más tóxicos que el colorante en sí, mientras no se haya presentado una mineralización completa de los contaminantes presentes, la cual es lograda con un mayor tiempo de reacción aumentando los costos del proceso [2], [9]. Pocos reportes en la literatura acerca de la técnica UV/ H_2O_2 determinan el efecto en la toxicidad de los efluentes después del tratamiento [10], [11] y pocos determinan la toxicidad de aguas residuales reales [12], [13]. Adicionalmente, los efluentes de la industria textil, al ser procesos en batch, son mezclados y, por lo general, el proceso UV/ H_2O_2 debe tratar varios colorantes en simultaneo [14], circunstancia que dificulta su tratamiento y aumenta la complejidad en su optimización. Por lo anterior, es necesario combinar este tratamiento con otros, como la adsorción, para reducir la toxicidad de los efluentes tratados y reducir costos de UV/ H_2O_2 [12], [14], [15].

Investigaciones realizadas en torno a los colorantes, han permitido estudiar la aplicación del proceso UV/ H_2O_2 , evaluando parámetros como el pH, $[H_2O_2]$, concentraciones de los colorantes, el tiempo de reacción y el posible comportamiento del catalizador respecto al colorante, y mezcla de colorantes [2], [11], [16], por ejemplo en los estudios realizados para la eliminación de un colorante comercial (Procion yellow H-EXL) tanto en agua residual sintética como real de la industria textil sobre la suspensión de TiO_2 , se concluye que para este catalizador el porcentaje de eliminación de colorante es inversamente proporcional a su concentración, cuanto menor es la concentración de colorantes, mayor es la eficacia de eliminación del colorante [16], adicional a ello también se ha evidenciado que la degradación incompleta de colorantes textiles pueden generar intermediarios con mayor toxicidad [17]–[19], se han tratado casos como el de las aminas aromáticas, las cuales como intermediarias en la degradación de colorantes tipo azo, pueden lograr una degradación total de estos compuestos, lo cual permite mineralizar un compuesto xenobiótico en un único paso [20], sin embargo también se han encontrado investigaciones donde comprueban que la combinación de procesos o modificaciones de estos para el tratamiento de aguas con colorantes textiles puede ser eficiente [10], [14], [21], entre ellos está el proceso mejorado de UV/ H_2O_2 por grafito expandido, aplicado a la decoloración del colorante rodamina B [14].

Debido a lo anteriormente expuesto surge la pregunta de investigación ¿La combinación de tratamiento UV/ H_2O_2 y adsorción es una alternativa técnicamente viable para decolorar aguas con colorantes textiles y disminuir la toxicidad de aguas tratadas? Adicionalmente y teniendo en cuenta las investigaciones encontradas, si bien se ha encontrado que se han estudiado diferentes métodos y técnicas de remoción, aun no se ha evaluado la combinación del proceso UV/ H_2O_2 y adsorción usando sílice gel y aluminosilicato y muy pocos estudios hablan sobre tratamiento de mezclas de colorantes debido a su especificidad.

El presente proyecto de grado de pregrado se realizará en el marco del proyecto de investigación “Combinación de procesos biológicos y UV/ H_2O_2 para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea y textil”, con el fin de aportar al cumplimiento del objetivo de este macroproyecto, el cual está liderado por las

profesoras Adriana Aristizábal de la Universidad EAFIT y la profesora Catalina Arroyave de la Universidad de Medellín.

2. Materiales y métodos

2.1 Reactivos y materiales adsorbentes

En la tabla 1 se pueden observar los colorantes empleados en este estudio, estos fueron donados por una industria textil y fueron usados como modelo de contaminante. Se estudiaron soluciones a concentraciones conocidas (Ver anexo P01). Peróxido de hidrogeno (Merk, 30% p/p, $\rho=1.05$ g/ml) fue utilizado para los experimentos realizados.

Tabla 1. Colorantes y mezclas de colorantes utilizadas

Colorante	Abreviatura
Azul de Metileno	MB
Turquesa EFDCE	C6
Oliva novazul luz j	C2
Mezcla Turquesa EFDCE y Oliva novazul luz j	C2+C6
Mezcla Oliva novazul luz j y Azul de Metileno	C2+MB
Mezcla Turquesa EFDCE y Azul de Metileno	C6+MB
Mezcla triple	C2+C6+MB

Los materiales adsorbentes estudiados [Sílice gel (SG) y Aluminosilicato (AS)] son residuos industriales también donados por un tercero. Los materiales y los colorantes utilizados fueron caracterizados por FTIR para determinar qué tipo de grupos funcionales tienen (Ver anexo P06). Adicionalmente los materiales adsorbentes fueron caracterizados por SEM para determinar el tamaño de partícula (Ver anexo R07).

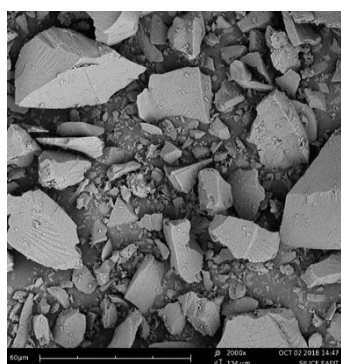


Fig.1 Imagen SEM sílice gel a 2000x

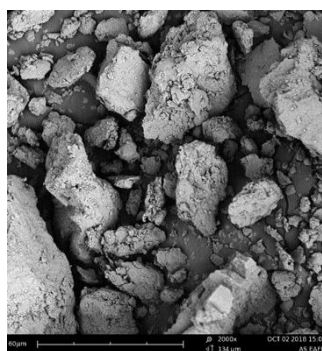


Fig.2 Imagen SEM aluminosilicato 2000x

2.2 Fotoreactor

Se trabajó con un equipo de fotodegradación con forma rectangular que tiene medidas: largo 0,36 m, alto 0,36 m y ancho 0,58 m, éste cuenta en su interior con una placa de agitación magnética que posee 15 puestos a la cual se le puede graduar la velocidad de agitación, sobre la placa de agitación están ubicadas de forma secuencial 5 lámparas UV PHILIPS TL-D K 30 W Actinic BL Hg que irradian las

muestra puestas sobre la placa de agitación con una intensidad promedio de 16,408 W/m². Este equipo cuenta con una tapa delantera que permite retirar y manipular los componentes puestos en su interior y otras tapas en los lados laterales y en el lado posterior, una en cada lado, lo que permite el acceso del cableado de diferentes sensores que se requieran en el mismo. En la parte superior cuenta con dos ventiladores que evitan que se sobrecaliente el interior del equipo. En su interior serán puestos reactores circulares de 54 mm de diámetro y 15 mm de alto, los cuales permiten tratar 15 ml de muestra. En la parte exterior al costado derecho se encuentran los interruptores que permite encender y apagar los ventiladores y las lámparas.

2.3 Experimentos de degradación con UV/H₂O₂

Se utilizaron soluciones de los colorantes y mezclas de colorantes para evaluar diferentes efectos en el proceso UV/H₂O₂, para esto se tomaron las soluciones madre de cada uno de los colorantes y mezclas de colorantes (Ver anexo P01) y se diluyeron dependiendo de la concentración a la que se quería llegar para evaluar cada efecto. Los efectos evaluados fueron los siguientes:

2.3.1.1 Blancos:

Se evaluaron dos blancos, estos buscaban determinar el efecto de la luz UV sin peróxido y el efecto del peróxido sin luz UV para cada uno de los colorantes y mezclas de colorantes. Para el efecto de la luz sin peróxido se preparan soluciones de colorantes individuales y mezclas de colorantes en valores cercanos a 17,5 mg/l a las cuales se les midió la concentración inicial real mediante espectrofotometría UV-VIS (Ver anexo P02), se tomaron 15 ml de cada uno de los colorantes y mezclas de colorantes con el fin de iniciar el proceso de fotodegradación, durante 120 minutos a 230 RPM. Luego del tratamiento se midió la absorbancia para calcular la concentración final de cada muestra de colorante y mezcla de colorante.

Para el efecto H₂O₂ sin luz UV, se prepararon soluciones de los colorantes y mezclas de colorantes en valores cercanos a los 16 mg/l, a estas soluciones se les midió la concentración inicial mediante espectrofotometría UV-VIS (Ver anexo P02), se tomaron 14 ml de cada uno de los colorantes y mezclas de colorantes, a cada uno se le adicionó 1 ml de H₂O₂, las muestras se sometieron a agitación en la placa de agitación del equipo de fotodegradación a 230 RPM durante 180 minutos, sin luz UV, luego del tiempo estimado se midió la absorbancia para calcular la concentración final de cada muestra de colorantes y mezclas de colorantes y así obtener el porcentaje de remoción (Ver anexo P02).

2.3.1.2 Efecto del tipo de colorante

Se prepararon soluciones de los colorantes y mezclas de colorantes binarias y ternarias en valores cercanos a los 16 mg/l de analito totales, es decir para las mezclas binarias la concentración de cada uno de los componentes en la mezcla es de 8 mg/l y para la ternaria 5.33mg/l. A estas soluciones se les midió la concentración inicial real. Se tomaron muestras de cada colorante y mezcla de colorantes de 14ml, se agregaron 1 ml de H₂O₂ a cada una, y estas fueron sometidas a tratamiento de fotodegradación en el fotoreactor, con agitación continua a 230 RPM. Posteriormente, se tomaron datos de absorbancia para así obtener datos de la remoción del colorante en el tiempo (Ver anexo P02). Este proceso se llevó a cabo hasta un tiempo en el que no había color al final para cada uno de los colorantes y mezclas de colorantes empleados.

2.3.2 Efecto de la concentración inicial de H₂O₂

Se usaron soluciones de colorantes individuales y mezclas de colorantes con concentraciones cercanas a 16 mg/l, a estas soluciones se les midió la concentración inicial, luego de preparar las soluciones iniciales se midieron volúmenes de peróxido de 0 ml, 0.5ml, 0.75ml y 1 ml, posteriormente se completó el volumen faltante para 15 ml, este procedimiento se realizó para cada uno de los colorantes y mezclas de colorantes. Posteriormente las muestras se sometieron a tratamiento de fotodegradación en el fotoreactor con agitación constante a 230 RPM, durante 30 minutos, pasado este tiempo se retiraron las muestras del equipo y se hallaron los porcentajes de remoción (Ver anexo P02).

2.3.3 Efecto de la concentración inicial de colorante

Para evaluar el efecto de la concentración inicial de colorante se prepararon tres tipos de soluciones:

- a) C2, C6 y MB y C2+C6+MB en valores cercanos a los 8 mg/l totales.
- b) C2+C6, C2+MB, C6+MB y C2+C+MB en valores cercanos a los 16 mg/l por componente, es decir las mezclas binarias quedaron en valores cercanos a 32 mg/l totales y la mezcla ternaria en 45 mg/l totales

A estas soluciones se les midió la concentración inicial, y posteriormente se tomaron 14 ml de solución y se les adicionó 1 ml de H₂O₂ a cada muestra de colorante individual y mezcla de colorantes, estas fueron sometidas a tratamiento de fotodegradación en agitación a 230 RPM en el fotoreactor. Posteriormente cada cierto tiempo se tomaron datos de absorbancia para así obtener datos de la remoción del colorante en el tiempo (Ver anexo P02). Este proceso se llevó a cabo hasta un tiempo máximo requerido para alcanzar la decoloración de las soluciones.

Los resultados de las cinéticas de reacción obtenidos fueron ajustados mediante el modelo de mínimos cuadrado utilizando la ecuación:

$$Ca, \text{ calculada} = Ca, in^{(1-\alpha)} - (1 - \alpha) * k^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

2.4 Ensayos de Adsorción con Sílice Gel y Aluminosilicato

Para cada colorante y mezcla de colorante se realizó un proceso de fotodegradación UV/H₂O₂ que consistía en preparar seis muestras como se prepararon en el procedimiento P02 teniendo en cuenta la evaluación del efecto del tipo de colorante. Posteriormente, estas fueron puestas en el equipo de fotodegradación por el tiempo requerido para cada colorante hasta que no se obtuviera color (Ver anexo P02).

Pasado este tiempo se tomaron 35 ml del agua tratada y se agregaron a un Erlenmeyer, al cual se le adicionaban 0.5 g de Sílice Gel, se cubrió con papel aluminio en una placa de agitación a 150 RPM durante 18 horas. Este mismo proceso se repetía para el Aluminosilicato. Posterior al tiempo de adsorción se tomaron las muestras para aplicar centrifugación durante 15 minutos a 4500 RPM, luego de este proceso se tomó el sobrenadante y se evaluó la efectividad del proceso de adsorción de toxicidad mediante ensayos de fitotoxicidad (Ver anexo P03).

2.5 Bioensayo de Fitotoxicidad en *Raphanus sativus* y *Lactuca Sativa*

Para realizar la evaluación de toxicidad se optó por realizar ensayos de fitotoxicidad con semillas, debido a que son versátiles, simples y útiles para evaluar toxicidad en aguas, muestras de suelo y sedimentos [22], [23]. Para este ensayo se usaron semillas *Raphanus sativus* variedad Crimson (RS), con un 90% de germinación, de la marca Fercon y *Lactuca Sativa* (LS) variedad Simpson Crespa con un 88% de germinación, de la marca Impulsemillas. Se montaron 3 réplicas por cada 20 semillas, en 15 ml antes y después de cada tratamiento, adicional cada una contó con un control con 10 ml de agua destilada, se registro el porcentaje de germinación a las 24 horas y de crecimiento a las 48 horas. (Ver anexo P03). Estos bioensayos se hicieron antes y después de tratamiento de fotodegradación con UV/H₂O₂, de adsorción combinado con UV/ H₂O₂ y con H₂O₂.

3 Análisis y discusión de resultados

3.1 Caracterización de los colorantes y materiales adsorbentes

3.1.1 Materiales de adsorción sólido FTIR

En el análisis FTIR realizado a los materiales adsorbentes se encontró que la Sílice Gel presenta enlaces asociados al enlace Si-O-Si relacionado con picos entre 1070 – 1089 cm⁻¹ y 790 – 806 cm⁻¹

presente en ambas muestras, el pico a 1080 cm^{-1} de Si-O-C y Si-OH. Por otro lado, el Aluminosilicato presenta grupos OH en el pico 1620 , y C-OH en el pico 3430 , los picos entre los $3700\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ se asocian con grupos OH en filosilicatos. Estos análisis se obtuvieron mediante una comparación entre los picos obtenidos y lo reportado en la literatura en [24]–[27] como se observa en la figura 3.

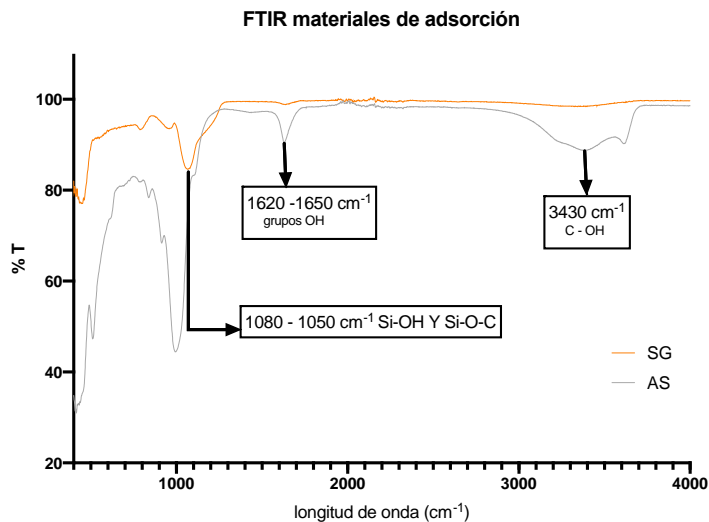


Fig 3. FTIR de materiales de adsorción Sílice Gel y Aluminosilicato

3.1.2 Colorantes solidos FTIR

El análisis FTIR permitió encontrar enlaces y grupos funcionales entre las siguientes longitudes de onda para los colorantes empleados, $3000\text{ -}3650\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a C-OH, $1725\text{ -}1645\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a C=O del ácido carboxílico y carbonil, entre 1385 y 1053 cm^{-1} el grupo carboxy, epoxy o alkoxy, en 1300 cm^{-1} C-N, el pico de absorción del benceno a 1514 cm^{-1} , a 775 cm^{-1} N-H, entre 1578 y 1491 cm^{-1} el enlace doble C=C quinoide y benzoide, aminas aromáticas C-N a 1927 cm^{-1} , C-H fuera del plano de los bencenos sustituidos a los 797 cm^{-1} , OH alifático a los 3379 cm^{-1} , C-H asimétrico a los 2914 cm^{-1} y a 1047 cm^{-1} C-O-C como puede ser visto en la figura 4. Estos análisis se obtuvieron mediante una comparación entre los picos obtenidos y lo reportado en la literatura para el azul de metileno (MB) [28], [29]. La caracterización para los demás colorantes resulta un poco más compleja ya que su estructura es un secreto comercial y no se encuentra información sobre ella. Este análisis comparativo permite identificar información relevante que puede ser útil para los usuarios de estos colorantes.

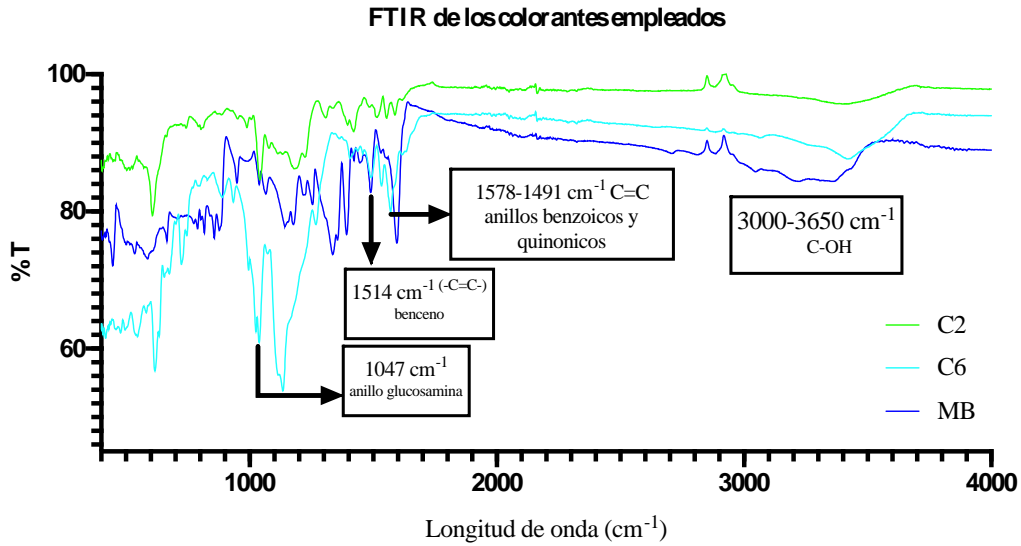


Fig 4. FTIR de los colorantes solidos MB, C2 y C6

3.1.3 Caracterización de absorción UV soluciones con colorantes

En la figura 5, se observan los barridos de los tres colorantes empleados, el pico de máxima absorción de C2 se encuentra entre los 320 nm y 500 nm, para C6 está entre 450 nm y 740 nm y para MB es entre 525 nm y 700 nm. Sin embargo, C6 y MB al ser tonalidades azules absorben en zonas similares entre los 500 y 680 nm, usualmente existen problemas para determinar cuantitativamente los componentes de mezclas al haber traslapamiento en los picos [30]. En comparación el colorante que más absorbe es el azul de metileno (MB), en su longitud de onda máxima su absorción alcanzó un valor de 1.739 mientras que para C2 y C6 obtuvieron una absorción de 0.084 y 0.112 respectivamente en sus longitudes de máxima absorción.

Comparación de los barridos de los colorantes a 10 ppm

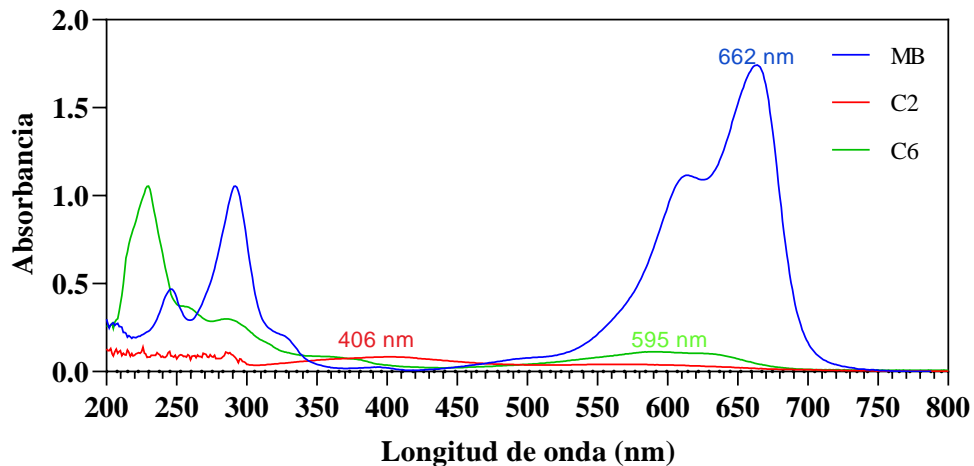


Fig 5. Comparación de los barridos de los colorantes MB, C2 y C6 a 10 ppm

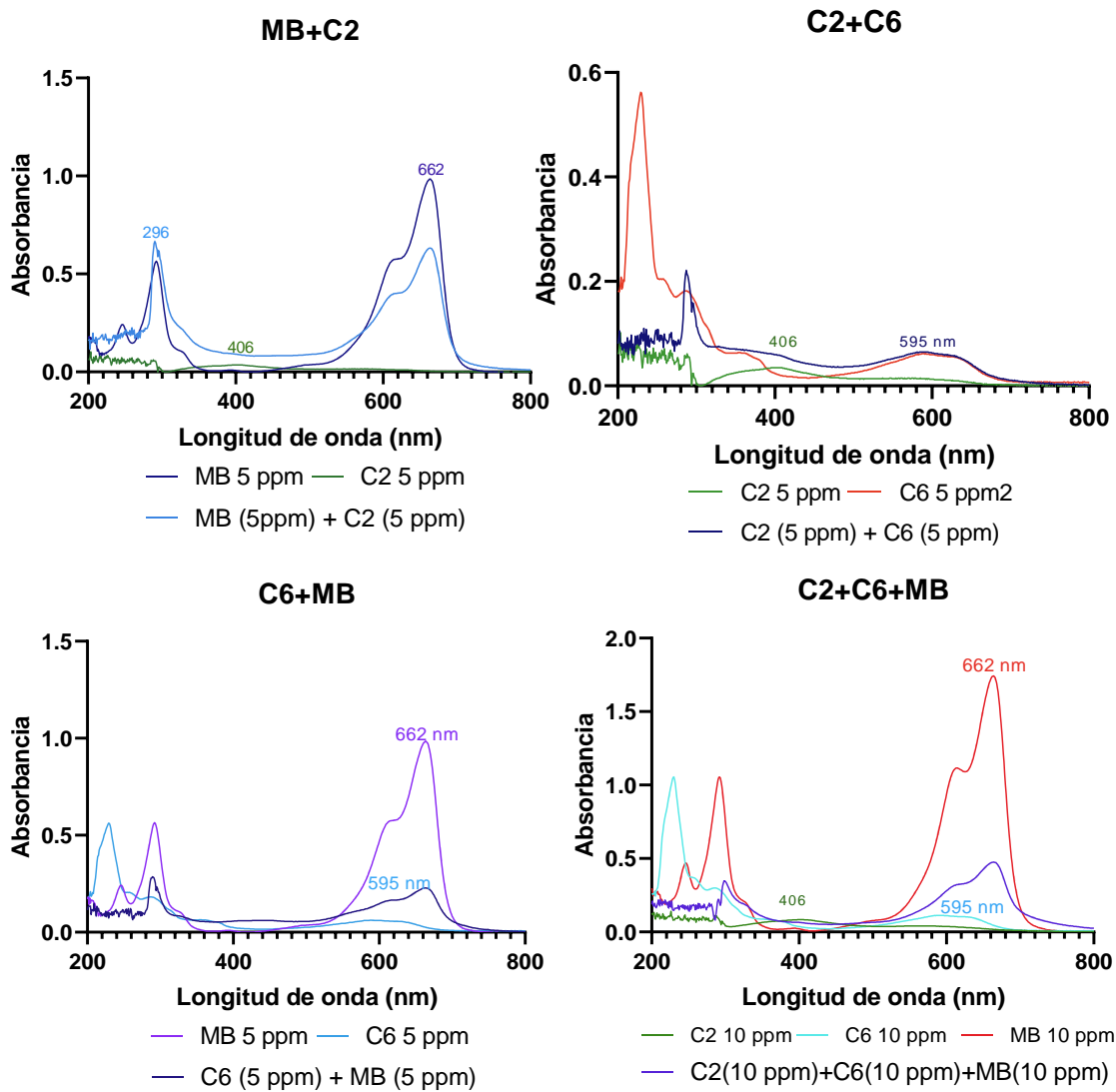


Fig 6 Comparación de los barridos de mezclas de colorantes MB+C2 a 10 ppm y sus componentes MB a 5 ppm y C2 a 5 ppm, C2+C6 a 10 ppm y sus componentes C2 a 5 ppm y C6 a 5 ppm, C6+MB a 10 ppm y sus componentes C6 a 5 ppm y MB a 5 ppm, C2+C6+MB a 30 ppm y sus componentes C2 a 10 ppm, C6 a 10 ppm y MB a 10 ppm.

El rango de concentraciones que presentaron un comportamiento lineal fue establecido para cada colorante y mezcla de colorante mediante el grafico absorbancia versus concentración a sus respectivos λ máxima, se obtuvieron curvas de calibración con porcentajes de correlación mayores al 99.32% (Ver anexo R01).

Al analizar el comportamiento del barrido de las mezclas, tal y como puede ser observado en la figura 6, para cada mezcla se obtiene un comportamiento diferente y dicho patrón no está asociado al de sus componentes puesto que las señales no son aditivas mientras que los picos de máxima absorbancia se mantienen cercanos, esto puede decirse ya que al haber preparado soluciones binarias y ternarias con la misma cantidad másica de cada uno de sus componentes se pudo comparar el barrido obtenido de la mezcla con el de sus componentes a la concentración a la que están en la mezcla. Este comportamiento también se puede ver en estudios de mezclas binarias anteriormente realizados en [31], en donde al analizar el comportamiento de la mezcla RHB y DR81

también se obtuvieron interferencias en el barrido obtenido y debido a esto las mediciones no se pueden realizar por colorante individual como en este caso.

3.1.4 Adsorción

Como puede observarse en la tabla 2, el AS presenta mayores porcentajes de remoción de colorantes en comparación con SG. Los colorantes más difíciles de remover por adsorción utilizando los materiales evaluados son C2, C6 y la mezcla de estos, puesto que para ambos materiales su porcentaje de remoción fue muy bajo o cero, adicional a esto se puede observar que MB y las mezclas que poseen MB son más fáciles de remover mediante adsorción con los dos materiales evaluados pues alcanzan porcentajes de remoción mayores al 80% en la mayoría de los casos.

Tabla 2. Datos proceso de adsorción de colorantes

Colorante	Abs in	C in [mg/L]	Tipo de Adsorbente	Peso [g]	Abs out	C out [mg/L]	%remoción
C2	0,811	98,834	AS	0,507	0,635	77,386	21,702%
			SG	0,500	0,813	99,078	0,000%
C6	0,878	102,573	AS	0,506	0,821	95,914	6,492%
			SG	0,507	0,89	103,975	0,000%
MB	1,739	11,893	AS	0,501	0,009	0,062	99,482%
			SG	0,502	0,041	0,280	97,642%
C2-C6	0,665	105,079	AS	0,502	0,547	86,434	17,744%
			SG	0,502	0,67	105,870	0,000%
C2-MB	1,932	34,387	AS	0,502	0,029	0,516	98,499%
			SG	0,501	0,057	1,015	97,050%
C6-MB	1,319	48,232	AS	0,506	0,099	3,620	92,494%
			SG	0,501	0,196	7,167	85,140%
C2-C6-MB	0,852	53,159	AS	0,502	0,077	4,804	90,96 2%
			SG	0,502	0,092	5,740	89,202%

Estudios anteriores con residuos de aluminosilicato han reportado que son una alternativa eficiente y de bajo costo para remover colorantes catiónicos como el azul de metileno (MB) debido a que el aluminosilicato posee una carga superficial negativa [28], [29]. Esto concuerda con los resultados obtenidos y sugiere que los colorantes C2 y C6 son colorantes aniónicos debido a su bajo porcentaje de remoción en AS, mientras que los porcentajes de remoción alcanzados en las mezclas deben aumentar debido a la presencia de azul de metileno (MB) en estas. Otros estudios realizados con MB y SG indican que las interacciones que ocurre entre la superficie de este material y MB son muy bajas explicando los resultados obtenidos y se cree que lo mismo ocurre con C2 y C6.

3.1.5 Fitotoxicidad

3.1.5.1 Evaluación de fitotoxicidad de colorantes individuales en concentraciones de 2000, 1500, 1000, 500 y 250 ppm y mezclas de colorantes en agua en concentraciones de 500 ppm, antes de tratamiento UV/H₂O₂, con *Raphanus sativus*

Con el fin de conocer la fitotoxicidad que podían presentar los colorantes a tratar y las mezclas de estos, se realizaron pruebas de fitotoxicidad en agua a diferentes concentraciones como se describe en el Anexo R03. Al evaluar se encontró que los colorantes individuales no presentan toxicidad en concentraciones menores a 1000 ppm ver figura 7 (Ver anexo R03), sin embargo, en concentraciones de 1500 ppm y 2000 ppm se presentaban síntomas de toxicidad y estos aumentaban a medida que aumentaba la concentración de colorante (Ver anexo R03) La etapa donde los síntomas son más evidentes como se ven en la figura 8, es en el crecimiento de la

semilla, después de 24 horas de haber germinado, lo cual se ve representado en el porcentaje de crecimiento de la figura 10. El colorante que presenta mayor toxicidad en la germinación y el crecimiento a 2000 ppm es el Azul de Metileno (MB) como se muestra en la figura 10 el menos tóxico en la germinación y el crecimiento es el Oliva novazul luz j (C2) como se puede observar en la figura 10.

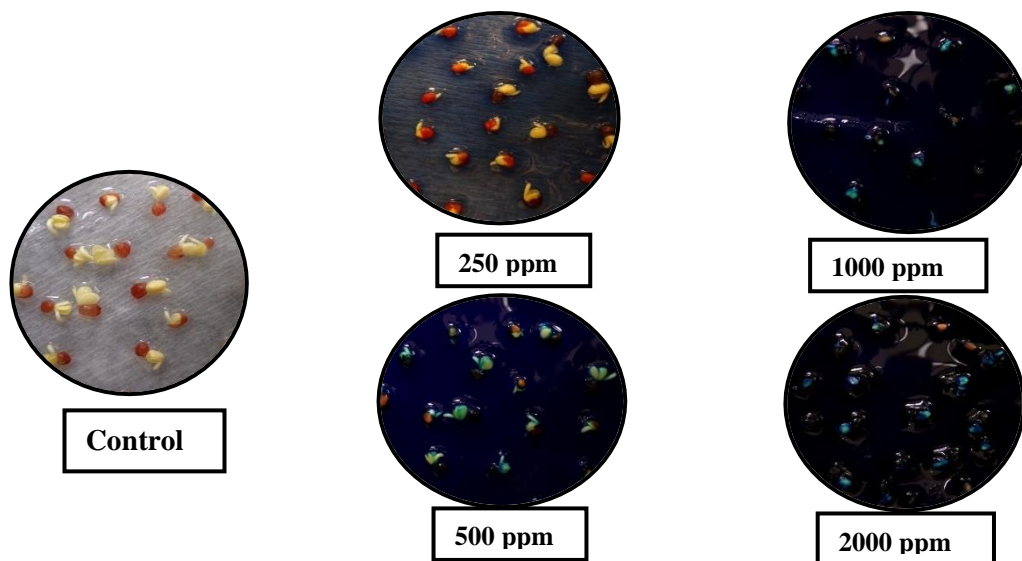


Fig. 7. Muestra de aumento de toxicidad en colorantes individuales en concentraciones de 2000, 1500, 1000, 500 y 250 ppm antes de tratamiento UV/H₂O₂, con *Raphanus sativus*

En cuanto a mezclas se encontró que en 500 ppm no presentan toxicidad, el porcentaje de germinación esta entre 93% y 85%, y el crecimiento es de 95% y 88% en comparación al control. Se evidencio que la mezcla binaria Azul de Metileno y Turquesa EFDCE (C6 MB) presenta menor porcentaje de germinación en comparación a las otras mezclas como se evidencia en la figura 11, en el crecimiento la mezcla de menor porcentaje fue la de Azul de Metileno y Oliva novazul luz j (C2 MB) con una diferencia de 17% en comparación al control como se ve en la figura 11.

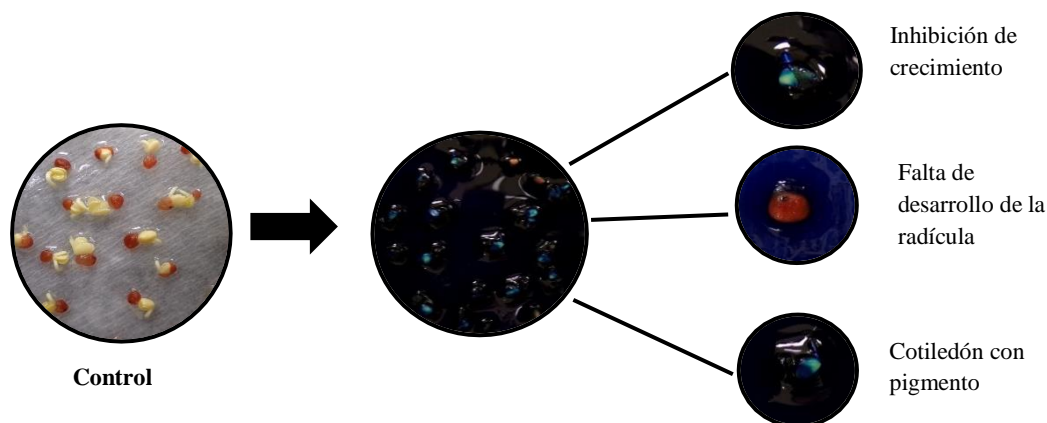


Fig. 8. Síntomas de toxicidad en muestras de aguas con colorantes individuales y mezclas con colorantes en concentraciones de 2000, 1500 ppm antes de tratamiento UV/H₂O₂, con *Raphanus sativus*, en la etapa de germinación.

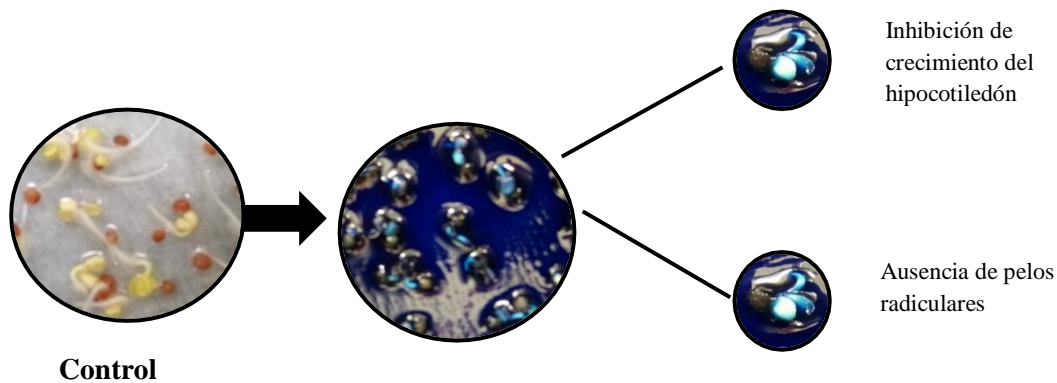


Fig. 9. Síntomas de toxicidad en muestras de aguas con colorantes individuales y mezclas con colorantes en concentraciones de 2000, 1500 ppm antes de tratamiento UV/H₂O₂, con *Raphanus sativus*, en la etapa de crecimiento.

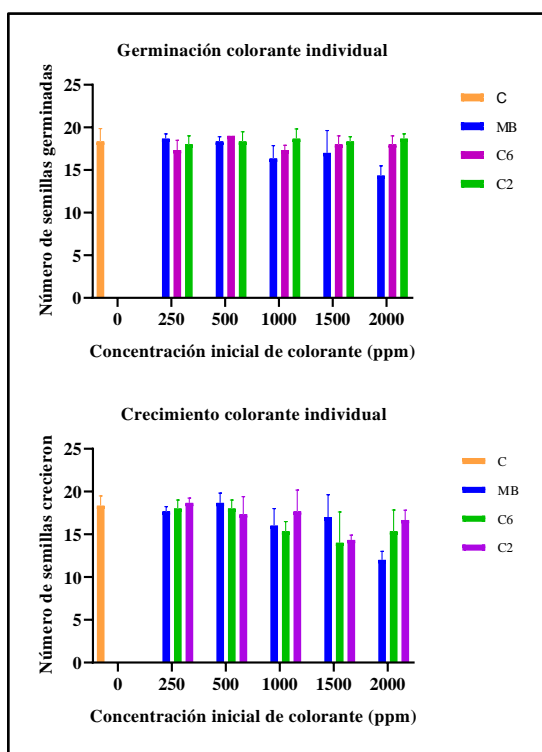


Fig. 10 Evaluación de fitotoxicidad de colorantes individuales en agua en concentraciones de 2000, 1500, 1000, 500 y 250 ppm, antes de tratamiento UV/H₂O₂, en etapas de germinación y crecimiento con *Raphanus sativus*

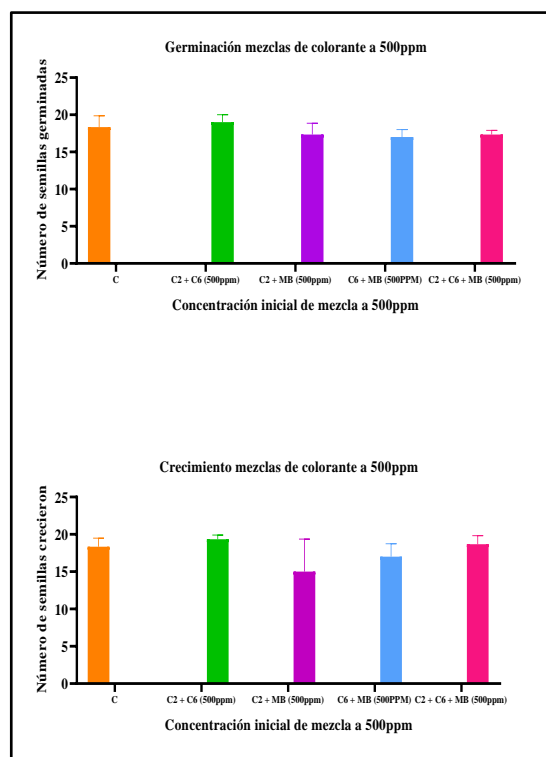


Fig. 11 Evaluación de fitotoxicidad de mezclas de colorantes en agua en concentraciones de 500 ppm, antes de tratamiento UV/H₂O₂, en etapas de germinación y crecimiento con *Raphanus sativus*

3.1.5.2 Prueba de fitotoxicidad después de UV/H₂O₂ en agua con volúmenes 0, 0.5, 0.75 y 1 ml de H₂O₂ a 80 minutos y 220 minutos, con *Raphanus sativus*

Adicional a las evaluaciones realizadas anteriormente, se hicieron pruebas para evaluar si se presenta toxicidad en presencia de H₂O₂ a volúmenes de 0 ml, 0.5 ml, 0.75 ml y 1ml, en un volumen total de 15 ml por muestra, con radiación UV para 80 minutos y 220 minutos y sin radiación UV.

3.1.5.2.1 Prueba de fitotoxicidad después de UV/H₂O₂ en agua con volúmenes 0, 0.5, 0.75 y 1 ml de H₂O₂ a 80 minutos con *Raphanus sativus*

En la prueba se evidenció que tanto para la etapa de germinación como para la de crecimiento el volumen de H₂O₂ en presencia de radiación UV inhibe estas etapas, se puede decir que a medida que aumenta el volumen de H₂O₂ aumenta la toxicidad en el agua tratada como se ve en la figura 14, además presentó síntomas de toxicidad como los de la figura 12 y 13 en los volúmenes 0.75 ml y 1 ml de peróxido (Ver anexo R03), para el volumen de 0.5ml de H₂O₂ se puede decir que hubo menor afectación en comparación con los otros volúmenes, obteniendo así 52% y 38% de germinación y crecimiento respectivamente, tal como lo muestra la figura 14.

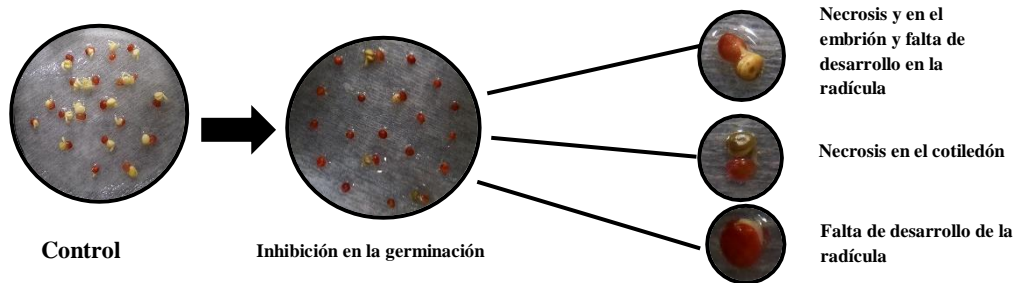


Fig. 12 Síntomas de toxicidad después de tratamiento con UV/H₂O₂ en agua en la germinación en las semillas de *Raphanus sativus*

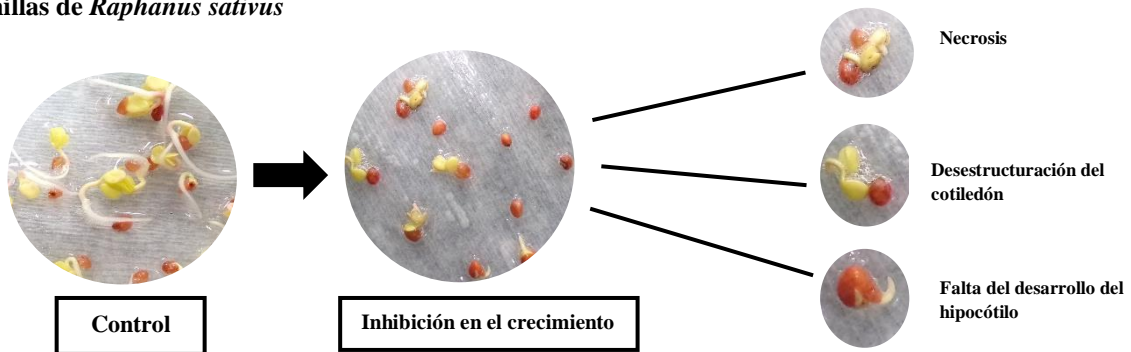


Fig. 13 Síntomas de toxicidad después de tratamiento con UV/H₂O₂ en agua en el crecimiento en las semillas de *Raphanus sativus*

3.1.5.2.2 Prueba de fitotoxicidad después de UV/H₂O₂ en agua con volúmenes 0, 0.5, 0.75 y 1 ml de H₂O₂ a 220 minutos con *Raphanus sativus*

En la figura 14 se refleja que al dejar más tiempo las muestras expuestas a radiación UV, se obtiene que tanto para la etapa de germinación y crecimiento el porcentaje de toxicidad aumenta, además a medida que aumenta el volumen de H₂O₂ se inhibe la germinación y el crecimiento, alcanzando valores de 0% y una germinación máxima del 12%, porcentajes mucho menores en comparación a los otros volúmenes. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la prueba de 220 minutos, se evidenció que a mayor tiempo de

exposición a radiación UV y mayor volumen de H_2O_2 la toxicidad aumenta y esta afecta más en la etapa de crecimiento.

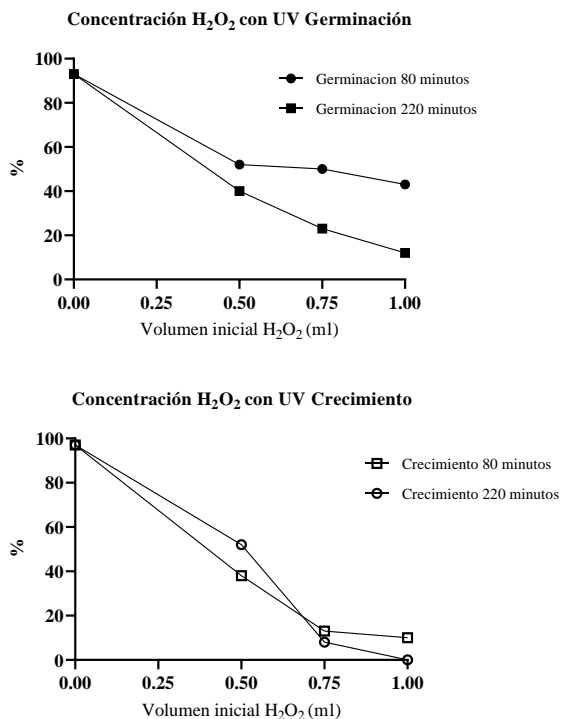


Fig 14. Prueba de fitotoxicidad después de UV/ H_2O_2 en agua con volúmenes 0, 0.5, 0.75 y 1 ml de H_2O_2 a 80 minutos y 220 minutos, con *Raphanus sativus*

2.1.1.1 Prueba de fitotoxicidad sin UV en agua con volúmenes 0, 0.5, 0.75 y 1 ml de H_2O_2 a 24 horas con *Raphanus sativus*

En la prueba que se realizó sin UV, se evidenció que el volumen de H_2O_2 afecta notoriamente al proceso de desarrollo de las semillas, obteniendo así para el volumen de 1ml de H_2O_2 un 30% en germinación y 0% en la etapa de crecimiento, siendo estos los valores más bajos en comparación a los otros volúmenes.

Adicional en comparación con la prueba realizada en presencia de radiación UV a 220 minutos, el porcentaje de germinación aumento en un 18% y el de crecimiento en un 17%, corroborando así que el efecto de la radiación UV y el tiempo de exposición a esta, en presencia de H_2O_2 genera toxicidad en las muestras. Ver anexo R03

2.1.1.2 Prueba de fitotoxicidad después de adsorción con materiales, Sílice gel y Aluminosilicato en agua

Para esta prueba se aplicó el procedimiento P04 con agua, con el fin de saber si los materiales presentaban algún tipo de toxicidad. Según las pruebas que se realizaron los materiales adsorbentes no presentan toxicidad, dado que el porcentaje de germinación y crecimiento está entre 92% y 98% respectivamente, muy similar al dado por el control. (Ver anexo R03)

3.2 Degradación de colorantes mediante UV/H₂O₂

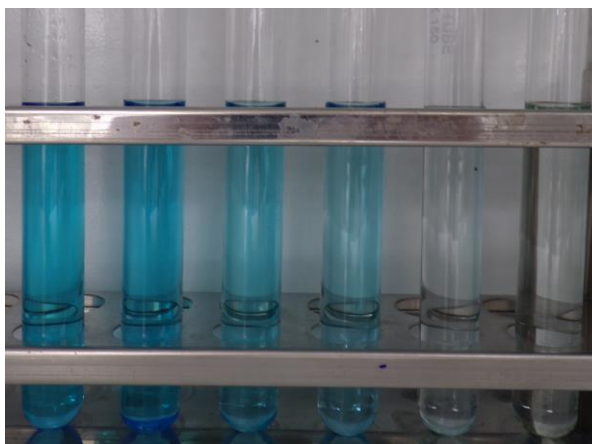


Fig. 15 Cinéticas de la mezcla (C2+C6+MB) a concentración inicial 8 ppm con 1 ml de H₂O₂ a los tiempos 0, 5, 10, 30, 60 y 90 minutos de izquierda a derecha.

3.2.1 Blancos

3.2.1.1 Efecto de luz UV sin H₂O₂ para la remoción de colorantes

Se obtuvieron porcentajes entre el 5.227% y 21.965% de remoción solamente con el efecto de la luz UV durante 120 minutos, los colorantes que presentan mayor porcentaje de remoción son C2 y C6, mientras que los de menor remoción fueron MB y las mezclas binarias con MB indicando que entre los colorantes empleados es el colorante más difícil de remover, esto no sucede en la mezcla ternaria posiblemente debido a que se encuentra en menor concentración en comparación a la que se encuentra en las mezclas binarias. Adicionalmente varios estudios han reportado que se obtienen mayores porcentajes de remoción si la longitud de onda a la cual irradian las lámparas UV coincide con el espectro de absorción del contaminante, especialmente a las longitudes de onda de máxima absorbancia de los colorantes para facilitar la ruptura de enlaces.[32]–[34]. Las lámparas utilizadas en este estudio Lp-Hg han sido estudiadas previamente y presentan tres bandas en su emisión de espectro UV a los 254, 313 y 365.5 nm. [35] Teniendo en cuenta los resultados del anexo R01 se puede inferir que C2 se degrada más rápido en comparación con los demás colorantes dado que las longitudes de onda en las que irradia la lámpara utilizada coinciden con la longitud de onda de máxima absorbancia de C2, en contraste con lo ocurrido para MB y las mezclas que contienen MB ya que su máxima absorbancia no se obtiene en las longitudes de onda a las que emite la lámpara y debido a esto se le atribuye un mayor tiempo de remoción.

3.2.1.2 Efecto H₂O₂ sin luz UV para la remoción de colorantes

Se obtuvieron porcentajes de remoción entre el 0,43% y 15,53% solamente con el efecto del peróxido durante 180 minutos, el colorante que presentó mayor porcentaje de remoción fue C2. Sin embargo, la mayoría de los porcentajes de remoción obtenidos no supera el 6% a excepción de lo ocurrido con el colorante C2 por lo tanto concuerda con lo reportado en literatura previa [2], [36], en donde se concluye que el efecto de peróxido solo es insignificante para la remoción de color.

Comparando ambos blancos se puede decir que se obtienen mayores porcentajes de remoción por el efecto de luz UV sin peróxido que con el efecto del peróxido sin luz UV, adicionalmente se puede observar como C2 tiene altos porcentajes de remoción en ambos efectos y aparenta ser el más fácil de remover en comparación con los demás colorantes y mezclas de colorantes empleados, mientras MB y las mezclas con MB parecen ser más complejas de remover.

3.2.2 Efecto del tipo de colorante en el proceso de remoción mediante UV/H₂O₂

Las cinéticas obtenidas fueron ajustadas utilizando el modelo de mínimos cuadrados mediante la ecuación 1, donde α es el orden y k es el parámetro de la cinética. Las figuras de las cinéticas y su ajuste mediante el modelo de mínimos cuadrados pueden ser observadas en los anexos (Ver anexo R02).

Tabla 3 Parámetros cinéticos obtenidos al evaluar el efecto del tipo de colorante a concentración inicial de 16 ppm totales.

colorante	orden	K
MB	0,4388	0,0343
C2	0,7120	0,0638
C6	0,8833	0,0276
C2+MB	0,9959	0,0298
C6+MB	0,9969	0,0252
C2+C6	0,5627	0,0907
C2+C6+MB	1,5504	0,0094

Como se puede observar en la figura 16 el colorante que más tiempo se demoró en degradar fue el azul de metileno, corroborando lo sospechado con las pruebas iniciales en los blancos de luz UV y peróxido relacionado con la longitud de onda de emisión de las lámparas y la longitud de onda de máxima absorción del colorante. El menor tiempo de remoción fue el alcanzado por la mezcla C2+C6 en un tiempo de 70 minutos y posteriormente C2 a los 80 minutos. Las mezclas C2+MB y C6+MB se demoraron más tiempo que los colorantes C2 y C6 respectivamente, pero, menos que MB, esto se podría atribuir a la concentración en la que esta MB en las mezclas pues al ser menor puede decirse que se demora menos tiempo en ser removido, adicional a esto, también está relacionado con las longitud de onda de máxima absorbancia de las mismas puesto que no coinciden con la longitud de onda a la cual emiten las lámparas utilizadas y aumenta el tiempo de remoción y como se analizó en el anexo R01 las mezclas con MB presentar menor absorbancia que MB por lo tanto tardan menos tiempo que MB en degradarse.

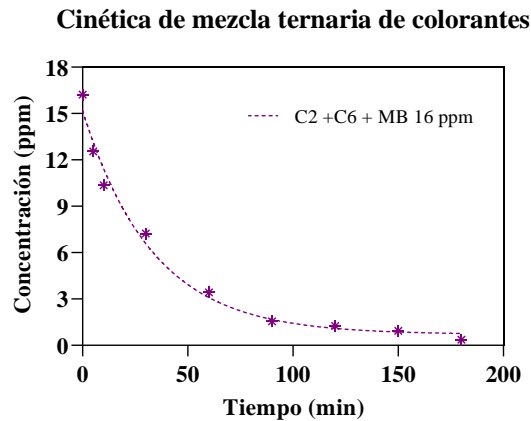
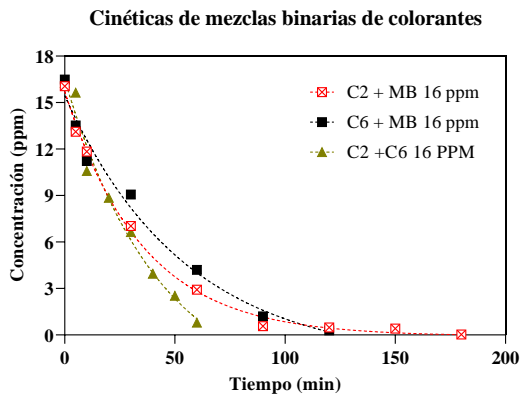
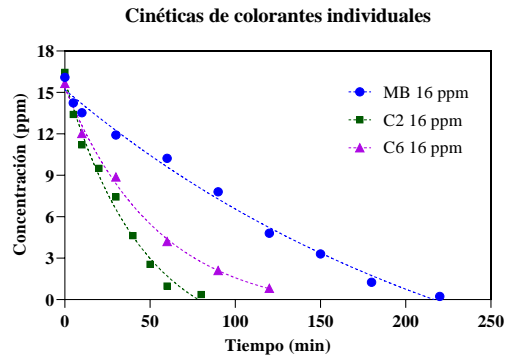


Fig. 16 Cinéticas de los colorantes individuales (C2, C6 y MB), de mezclas binarias (C2+C6, C2+MB y C6+MB) y de la mezcla ternaria (C2+C6+MB) a concentración inicial 16 ppm.

3.2.3 Efecto de la concentración inicial de H₂O₂

Se puede observar que en los colorantes y mezclas de colorantes evaluadas al aumentar la cantidad de peróxido en el rango evaluado (0 ml – 1 ml) aumenta el porcentaje de remoción, los porcentajes de mayor remoción fueron alcanzados al utilizar 1 ml de peróxido en la solución, se obtuvieron valores de remoción entre el 2.21% y 11.07%, 12% y 55.66%, 20.77% y 50% y 26.34 y 65.56% para 0, 0.5, 0.75 y 1 ml de peróxido respectivamente. Se han realizado estudios previos en los cuales demuestran que el efecto de la concentración de peróxido varía dependiendo del tipo de lámpara empleada, la longitud de onda a la cual emite la lámpara y

la concentración inicial del mismo debido a que un incremento en la concentración inicial de peróxido conlleva a una disminución en el porcentaje de remoción debido a que se presentan reacciones competitivas que favorecen la formación de otras especies oxidantes menos efectivas o agua por dimerización [37], [38] [39], [40], razón por la cual es importante determinar el óptimo de la concentración inicial de peróxido para maximizar la remoción al mínimo costo y evitar el exceso que disminuye la conversión[35], adicional a esto al comparar los porcentajes de remoción obtenidos por la combinación UV/H₂O₂ son mucho mayores a los obtenidos solo con radiación o solo con peróxido.

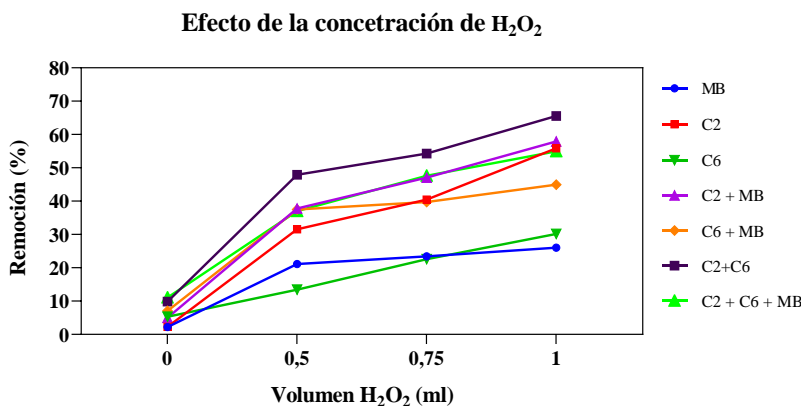


Fig 17: Efecto de la concentración inicial de H₂O₂ en el proceso UV/H₂O₂ durante 30 minutos al remover los colorantes: azul de metileno (MB), Oliva Novazul luz J (C2) Turquesa EDFC (C6) y las mezclas entre estos (C2+MB, C6+MB, C2+C6 y C2+C6+MB) a concentraciones iniciales de 16 ppm.

Como se puede observar en la figura 17 para algunos colorantes como MB y mezclas de colorantes como C6+MB y C2+C6 el porcentaje de remoción alcanzado entre 0,5 y 1 ml de peróxido no cambia tan significativamente; sin embargo, los ensayos se realizaron con 1 ml de H₂O₂ ya que en los demás colorantes y mezclas evaluados si se obtuvieron cambios significativos en el porcentaje de remoción y adicional a esto permitió tener las mismas condiciones en los ensayos realizados.

3.2.4 Efecto de la concentración inicial de colorante

3.2.4.1 Evaluación del efecto de la concentración inicial de colorante a 8 ppm

En la tabla 4 se puede observar los parámetros cinéticos obtenidos al ajustar el modelo de mínimos cuadrados a los colorantes y mezclas preparadas a 8 ppm.

Tabla 4: Parámetros cinéticos obtenidos al evaluar el efecto del tipo de colorante a concentración inicial de 8 ppm totales.

colorante	alfa	k
MB	1,5130	0,0153
C2	0,7586	0,0916
C6	0,0000	0,1183
C2+C6+MB	1,7162	0,0158

2.1.1.1 Evaluación del efecto de la concentración inicial de colorante a 16 ppm por componente

En la tabla 5 se puede observar los parámetros cinéticos obtenidos al ajustar el modelo de mínimos cuadrados a los colorantes y mezclas preparadas a 16 ppm por componente es decir las mezclas binarias a 32 ppm totales y la mezcla ternaria a 45 ppm totales.

Tabla 5: Parámetros cinéticos obtenidos al evaluar el efecto del tipo de colorante a concentración inicial de 16 ppm por componente (mezclas binarias a 32 ppm y ternaria a 45 ppm).

colorante	alfa	k
C2+C6+MB	1,4627	0,0014
C2+MB	1,7356	0,0020
C6+MB	1,7356	0,0020
C2+C6	1,1093	0,0232

Cinéticas de colorantes individuales y mezcla ternaria a 8 ppm totales

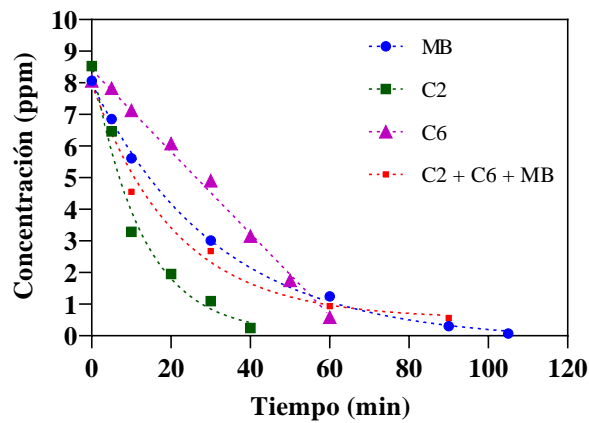


Fig. 18 Cinéticas obtenidas al evaluar el efecto del tipo de colorante con los colorantes (MB), Oliva Novazul luz J (C2) Turquesa EDFC (C6) y la mezcla ternaria (C2+C6+MB) a concentración inicial de 8 ppm.

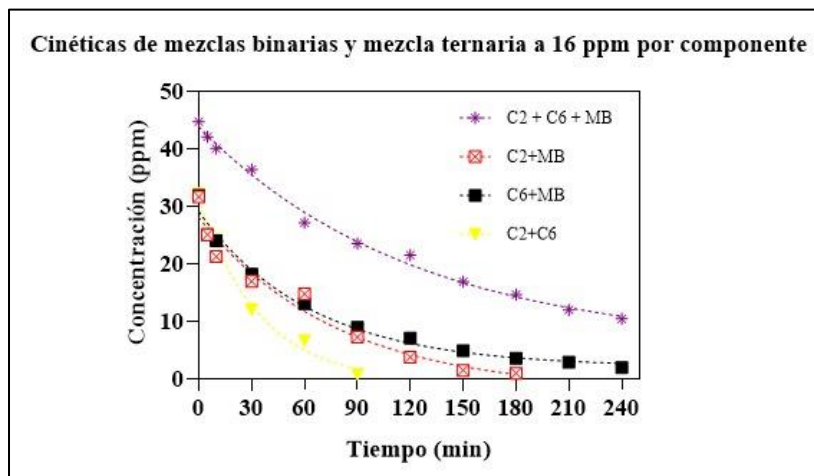


Fig. 19 Cinéticas obtenidas al evaluar el efecto del tipo de colorante con las mezclas (C2+C6+MB, C2+MB, C6+MB y C2+C6) a concentración inicial de 16 ppm por componente (binarias a 32 ppm y ternaria a 45 ppm).

Como se puede observar en el fig. 18, el tiempo de remoción más largo en las cinéticas realizadas con concentraciones iniciales de 8 mg/L totales de colorante fue 105 minutos para MB, al compararlo con la cinética inicialmente realizada (fig 16) a 16 ppm en el efecto del tipo de colorante en donde MB se demoró 220 minutos en llegar a valores cercanos a cero, se puede observar que a mayores concentraciones de colorantes aumenta el tiempo de remoción, esta tendencia se presenta en todos los colorantes y mezclas evaluadas, sugiriendo que el tiempo de remoción y la concentración son directamente proporcionales. Esto concuerda con lo expuesto en [37], en donde se concluye que se obtienen mayores porcentajes de remoción para menores concentraciones de colorante asociados a una mejor transmisión de la luz UV a través de soluciones de menor concentración en donde hay menos moléculas para interactuar con la luz. Como se puede observar al comparar la fig. 16 con la fig. 19, el mismo comportamiento se presentó en las mezclas binarias y la mezcla ternaria pues a mayor concentración inicial se necesitó un mayor tiempo de remoción confirmando la validez de lo anteriormente expuesto.

En la figura 20 se puede apreciar claramente el efecto de la concentración de colorante en la mezcla triple en donde se trabajó con concentraciones iniciales totales de 8, 16 y 45 mg/L y se puede apreciar el incremento del tiempo de remoción a medida que aumenta la concentración.

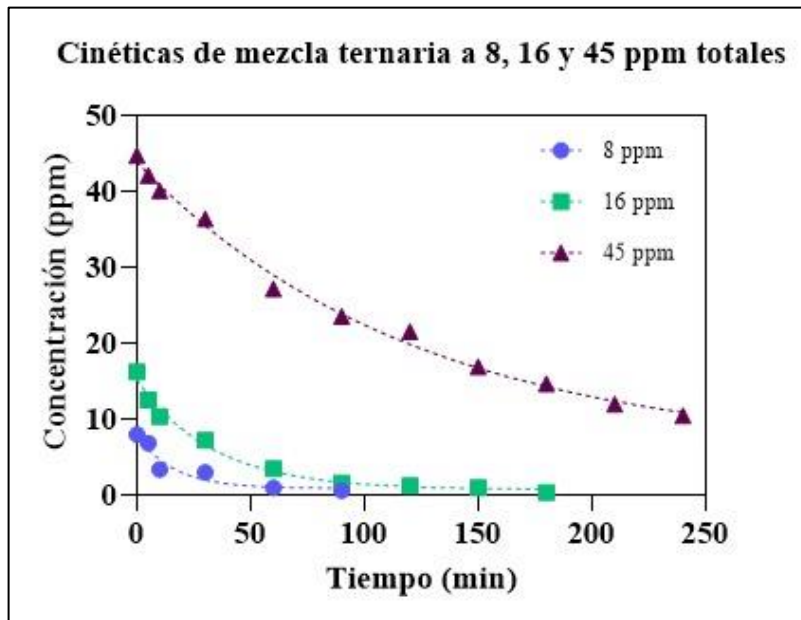


Fig. 20 Cinéticas de mezcla ternaria (C2+C6+MB) a concentración inicial 8, 16 y 45 ppm.

2.2 Evaluación de fitotoxicidad después de tratamientos

2.2 Evaluación de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamientos con UV/H₂O₂, combinación con UV/H₂O₂ y adsorción

2.2.1 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂, con *Raphanus sativus*

Después de tratar con UV/H₂O₂ las muestras de agua con colorantes individuales y mezclas de colorantes, según el procedimiento P02, se procedió a evaluar fitotoxicidad. En los ensayos realizados se encontró que las muestras tanto de colorantes individuales como mezclas con colorantes después del tratamiento UV/H₂O₂ la germinación disminuye en comparación a antes de someter al tratamiento las muestras ver figura 21, 10 y 11, en esta etapa se presentan síntomas de toxicidad como necrosis, falta de desarrollo del embrión y debilidad de la testa, los cuales afectan el crecimiento de las semillas, resultando así el crecimiento como la etapa donde es más evidente los síntomas de toxicidad dado que no todas las muestras logran crecer y estas presentan síntomas de toxicidad como pedicelo corto, ausencia de pelos radiculares y desestructuración de cotiledón

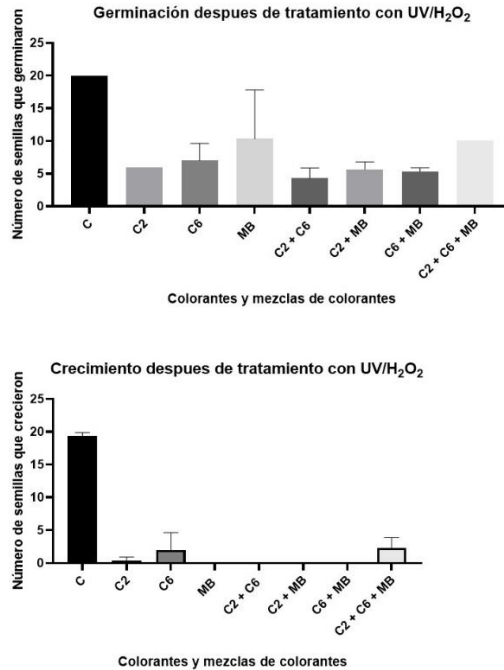


Fig. 21 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂, con *Raphanus sativus*

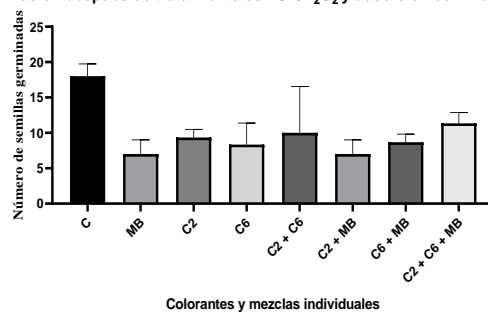
En la etapa de germinación, el colorante que presentó mayor toxicidad fue el Oliva novazul luz j (C2) con un 30% de crecimiento, una reducción del 70% en comparación al control, adicional a ello este también presenta un menor crecimiento en comparación a los otros colorantes, obtuvo 2% de crecimiento, siendo así el colorante C2 el que presenta mayor toxicidad después del tratamiento de fotodegradación.

En las mezclas se obtuvo que en la etapa de germinación la que mayor porcentaje de germinación presenta es la mezcla ternaria (C2 C6 MB), con un 50% de germinación, la mezcla de menor porcentaje de germinación fue la mezcla binaria C2 C6, con un promedio de 22%, en cuanto a la etapa de crecimiento todas las mezclas binarias presentaron un 0% de crecimiento, siendo así la mezcla ternaria la que mayor porcentaje de crecimiento en comparación con las otras obteniendo un 12%, por lo tanto las mezclas binarias presentan mayor toxicidad en comparación a la mezcla ternaria.

2.2.2 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Sílice gel y Aluminosilicato con *Raphanus sativus*

Después de aplicar los procedimientos de fotodegradación con UV/H₂O₂ (procedimiento P02) y de adsorción (procedimiento P04) usando aluminosilicato y sílice gel, se procede a realizar la prueba de fitotoxicidad para cada material.

Germinación después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Aluminosilicato



Crecimiento después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Aluminosilicato

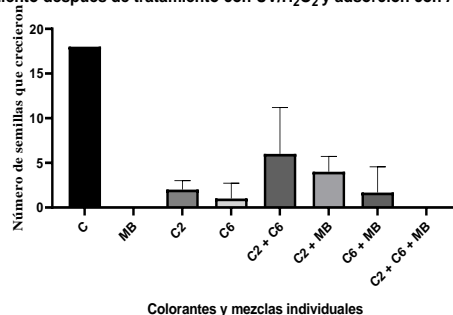
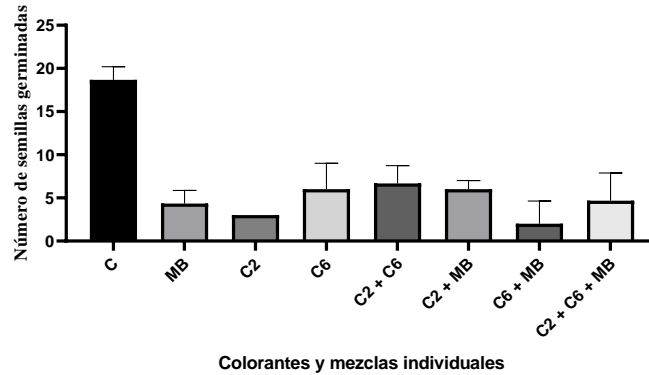


Fig. 22 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Aluminosilicato con *Raphanus sativus*, germinación y crecimiento

2.2.2.1 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Aluminosilicato en *Raphanus sativus*

La combinación del proceso de fotodegradación UV/H₂O₂ y adsorción usando como adsorbente aluminosilicato, presentó un porcentaje de germinación menor en los colorantes individuales, entre ellos el que presentó mayor germinación en comparación a los otros colorantes fue el colorante C2 con 47%, el colorante con menos porcentaje de germinación en comparación a los otros fue el MB con un 35%, con una diferencia de 55% en comparación al control ver figura 22, se presentaron síntomas de toxicidad como necrosis, falta de desarrollo del embrión y debilidad en la testa ver figura 10. En la etapa de crecimiento también se presentaron síntomas como pedicelo corto, ausencia de pelos radiculares y desestructuración de los cotiledones ver figura 11, además se obtuvo que el porcentaje de crecimiento es menor que el de germinación dando como resultado el colorante que presenta menor crecimiento en comparación con los otros es el MB con un 0% (Ver anexo R03)

Germinación después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Sílice gel



Crecimiento después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Sílice gel

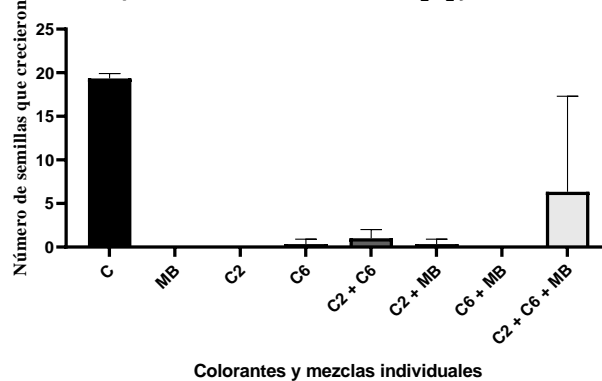


Fig. 23 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con Sílice gel con *Raphanus sativus*, germinación y crecimiento

En cuanto a las mezclas, se obtuvo que la mezcla con mayor germinación en comparación con las otras mezclas fue la mezcla ternaria C2 C6 MB con un 57%, siendo la mezcla C2 MB la que presentó menor germinación en comparación a las otras con un 35%, sin embargo, en la etapa de crecimiento la mezcla que presentó menor crecimiento fue la mezcla ternaria C2 C6 MB con 0% (Ver anexo R03). En las dos etapas se evidenciaron síntomas de toxicidad como lo mencionados anteriormente ver figura 15.

2.2.2.2 Prueba de fitotoxicidad de aguas con colorantes individuales y mezclas de colorantes después de tratamiento con UV/H₂O₂ y adsorción con y Sílice Gel con *Raphanus sativus*

Para la combinación del tratamiento de fotodegradación UV/H₂O₂ y adsorción usando sílice gel, se obtuvo que, de todas las muestras, en los colorantes individuales el que menor germinación presentó en comparación a los otros fue el colorante C2 con un 15% (Ver anexo R03) manifestando síntomas de toxicidad como falta de desarrollo del embrión, necrosis, y debilidad en la testa ver figura 10. En cuanto a la etapa de crecimiento se evidencio que tanto el colorante MB como C2 obtuvieron un 0% de crecimiento, siendo de C6 el único colorante que presentó crecimiento con un 2% (Ver anexo R03)

Así también la mezcla con menor porcentaje de germinación en comparación a las otras mezclas fue C6 MB con un 10% de germinación ver figura 23, en esta etapa las muestras presentaron síntomas de toxicidad ver

figura 23, que pudieron afectar a la etapa de crecimiento dando así como resultado la mezcla que menos crecimiento obtuvo fue C6 MB con 0%, por otro lado, la mezcla ternaria presenta mayor crecimiento en comparación a las otras mezclas con un 32%, como se puede observar (Ver anexo R03).

2.2.3 Evaluación de fitotoxicidad después de tratamiento UV/H₂O₂ a 160 y 240 minutos con colorante de mayor toxicidad, con *Raphanus sativus* y *Lactuca sativa*

Esta prueba se realizó para el colorante C2, dado que después de tratamiento con UV/ H₂O₂ presentó mayor toxicidad, con el fin de evaluar si el tiempo de tratamiento puede remover las moléculas intermediarias causantes de la fitotoxicidad, se mantuvo un volumen de 15 ml por muestra de colorante después de tratamiento con UV/H₂O₂, usando 1 ml de H₂O₂, para 160 minutos y 240 minutos, se realizó con semillas RS y LS. Para la semilla LS, se realizó la prueba solo en la etapa de crecimiento.

2.1.1 Evaluación de fitotoxicidad después de tratamiento UV/H₂O₂ a 160 minutos con colorante de mayor toxicidad, con *Raphanus sativus* y *Lactuca sativa*

En la etapa de germinación se evidenció que el colorante C2, presenta mayor toxicidad en comparación a los otros colorantes individuales dado que los síntomas de toxicidad se presentan con mayor frecuencia (Ver anexo R03) dado que la germinación de las semillas RS es de 33%, mucho menor en comparación al control, adicional a ello se presentaron síntomas de toxicidad como necrosis y falta de desarrollo de la radícula.

Por otra parte, se realizaron pruebas de crecimiento a las 48 horas tanto para la semilla RS como LS, donde se evidenció mayor porcentaje de crecimiento en comparación con LS para la semilla RS con un 18% de crecimiento después del tratamiento, lo cual permite intuir que la semilla LS es más vulnerable que la semilla RS y que aun después de 160 minutos de tratamiento UV/ H₂O₂ se presenta toxicidad.

2.1.1.1 Evaluación de fitotoxicidad después de tratamiento UV/H₂O₂ a 240 minutos con colorante de mayor toxicidad, con *Raphanus sativus* y *Lactuca sativa*

En comparación con el control se evidenció que la germinación disminuyó en un 7% en comparación con la prueba de 160 minutos y el crecimiento disminuyó en un 11% en comparación con la prueba de menor tiempo ver en las figuras 24 y 25, las semillas LS no lograron crecer. por lo tanto, se puede decir que las moléculas intermediarias que surgen durante el tratamiento UV/H₂O₂ no se logran remover con este tipo de tratamientos.

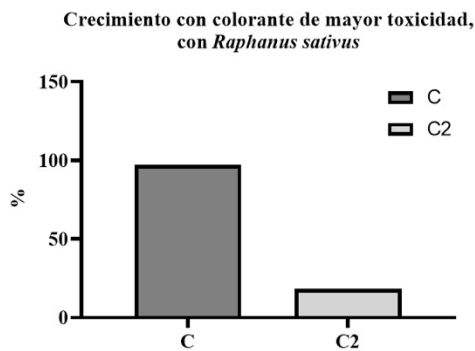
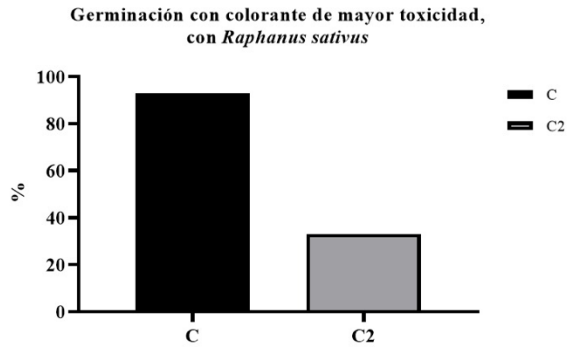


Fig. 24 Evaluación de fitotoxicidad después de tratamiento UV/H₂O₂ a 240 minutos con colorante de mayor toxicidad, con *Raphanus sativus*, germinación y crecimiento.

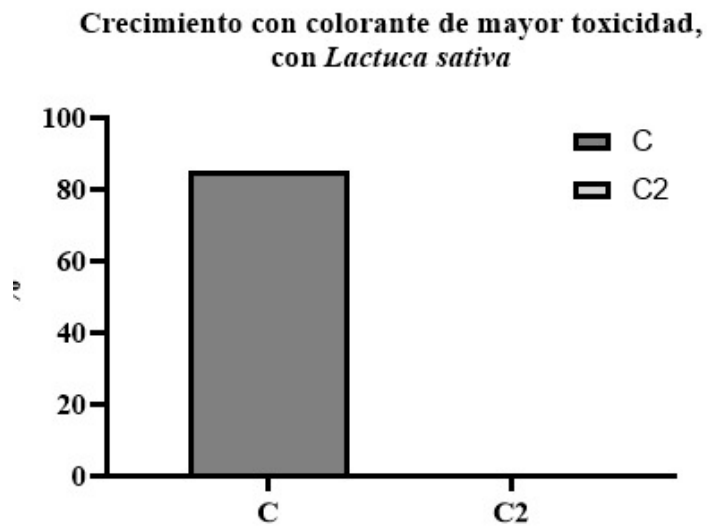


Fig. 25 Evaluación de fitotoxicidad después de tratamiento UV/H₂O₂ a 240 minutos con colorante de mayor toxicidad, con *Lactuca sativa*, crecimiento.

3 Conclusiones

Varios efectos en el proceso de fotodegradación UV/H₂O₂ fueron estudiados al emplear este proceso en tres colorantes y sus mezclas (C2, C6, MB, C2+C6, C2+MB, C6+MB y C2+C6+MB). Se determinó que el efecto más significativo para la remoción de colorantes en este proceso es el aportado por el efecto de la luz UV, en comparación con el efecto del peróxido, al combinar ambos efectos se aumenta la efectividad del proceso de remoción siendo mucho más significativa que el efecto del peróxido o de la luz UV por si solos. Adicionalmente se estudió el efecto del tipo de colorante para el cual es muy importante la longitud de onda de máxima absorbancia del colorante y la longitud de onda a la cual emite las lamparas usadas en el proceso, obteniéndose mayores porcentajes de remoción cuando estos se encuentran en zonas cercanas, la concentración inicial del colorante también es un factor muy importante pues al aumentar la concentración aumentan las partículas con las cuales la luz UV debe interactuar. Así mismo se considera un factor importante la absorbancia del colorante pues el tiempo de remoción en las mezclas estudiadas fue mayor para las muestras con más absorbancia en su longitud de onda máxima lo cual asocia el tiempo de remoción con la absorbancia del compuesto.

Teniendo en cuenta que la combinación de los procesos de UV/H₂O₂ y adsorción se obtuvo un porcentaje de toxicidad de 59% y 80% para aluminosilicatos y sílice gel respectivamente, en la etapa de germinación, se concluye que la combinación de estos procesos presenta baja efectividad en el tratamiento de aguas con colorantes textiles.

Analizando los resultados obtenidos en la prueba de UV/ H₂O₂ a 80 y 220 minutos se define que a mayor tiempo de exposición a radiación UV y mayor volumen de H₂O₂ la toxicidad aumenta y esta se refleja en gran medida en la etapa de crecimiento de las semillas.

Antes del tratamiento UV/H₂O₂ se logra una germinación entre 93% y 85%, sin embargo después de tratamiento en promedio solo el 34% de las muestras de colorantes individuales y mezclas después de tratamiento con UV/H₂O₂ logran germinar, presentando mayor toxicidad las mezclas binarias en comparación que las ternarias, el colorante que presenta mayor toxicidad es el Oliva novazul luz j (C2), por lo cual se puede afirmar que el tratamiento UV/H₂O₂ es viable para remover el color, sin embargo su eficiencia es baja dado que produce mayor toxicidad que el colorante y mezcla sin tratamiento.

Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 1. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombr e	Desarrollo (propio/tercero s)	Tip o de Archiv o	Enlace google drive (https://goo.gl/)
P01			
R01			
P02			
R02			
P03	Propio	PD	https://drive.google.com/open?id=1EPHXkxOzASdAtRCuhGaSI5Efokr-QE_E
R03		F	
R05			
R07			
P04			
P06			

Referencias

- [1] N. Ali, A. Hameed, and S. Ahmed, "Physicochemical characterization and Bioremediation perspective of textile effluent, dyes and metals by indigenous Bacteria," *J. Hazard. Mater.*, vol. 164, no. 1, pp. 322–328, 2009.
- [2] E. Basturk and M. Karatas, "Decolorization of antraquinone dye Reactive Blue 181 solution by UV/H₂O₂ process," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 299, pp. 67–72, 2015.
- [3] V. K. Gupta, S. Khamparia, I. Tyagi, D. Jaspal, and A. Malviya, "Decolorization of mixture of dyes: A critical review," *Glob. J. Environ. Sci. Manag. Glob. J. Environ. Sci. Manag.*, vol. 1, no. 11, pp. 71–94, 2015.
- [4] S. Ge *et al.*, "Effect of framework structure, pore size and surface modification on the adsorption performance of methylene blue and Cu²⁺ in mesoporous silica," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 539, no. September 2017, pp. 154–162, 2018.
- [5] R. D. Saini, "Synthetic Textile Dyes : Constitution , Dying process and Environmental Impacts," vol. 11, no. February, pp. 206–214, 2018.
- [6] G. A. R. de Oliveira *et al.*, "A test battery for assessing the ecotoxic effects of textile dyes," *Chem. Biol. Interact.*, vol. 291, pp. 171–179, 2018.
- [7] Legiscomex, "Estudio de mercado Textiles y confecciones en colombia," p. 37, 2012.
- [8] En Colombia, "Industria Textil," 2010. [Online]. Available: <https://encolombia.com/economia/info-economica/algodon/industriatextil/>.
- [9] A. Aleboye, Y. Moussa, and H. Aleboye, "The effect of operational parameters on UV/H₂O₂ decolourisation of Acid Blue 74," *Dye. Pigment.*, vol. 66, no. 2, pp. 129–134, 2005.
- [10] M. Bilal, T. Rasheed, M. N. Iqbal, H. Hu, and W. Wang, "Toxicological Assessment and UV / TiO₂ -Based Induced Degradation Profile of Reactive Black 5 Dye," 2017.
- [11] M. R. Sohrabi and M. Ghavami, "Photocatalytic degradation of Direct Red 23 dye using UV / TiO₂ : Effect of operational parameters," vol. 153, pp. 1235–1239, 2008.
- [12] G. Matafonova and V. Batoev, "Recent advances in application of UV light-emitting diodes for degrading organic pollutants in water through advanced oxidation processes : A review," *Water Res.*, vol. 132, pp. 177–189, 2018.
- [13] P. Aravind, H. Selvaraj, S. Ferro, G. Muniyandi, and M. Sundaram, "A one-pot approach : Oxychloride radicals enhanced electrochemical oxidation for the treatment of textile dye wastewater treated by mixed salts recycling," *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 246–258, 2018.
- [14] Z. Changchao, C. Feng, Y. Jintao, and Z. Mingqiang, "Enhanced UV / H₂O₂ process by expanded graphite : an effective method for rhodamine B dye decolorization," *Res. Chem. Intermed.*, 2017.
- [15] M. Dang, Q. Deng, G. Fang, D. Zhang, H. Li, and J. Liu, "Journal of Colloid and Interface Science Bifunctional supported ionic liquid-based smart films for dyes adsorption and photodegradation," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 530, no. 29, pp. 302–311, 2018.
- [16] M. A. Barakat, "Adsorption and photodegradation of Procion yellow H-EXL dye in textile wastewater over TiO₂ suspension," *J. Hydro-Environment Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 137–142, 2011.
- [17] S. Khan and A. Malik, "Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 5, pp. 4446–4458, 2018.
- [18] M. Bilal, T. Rasheed, M. N. Iqbal, H. Hu, and W. Wang, "Toxicological Assessment and UV / TiO₂ -Based Induced Degradation Profile of Reactive Black 5 Dye," 2017.
- [19] M. Markovic, M. Jovic, D. Stankovic, J. Mutic, G. Roglic, and D. D. Manojlovic, "Toxicity Screening after Electrochemical Degradation of Reactive Textile Dyes," vol. 23, no. 6, pp. 2103–2109, 2014.
- [20] Y. Kourkoutas, A. Bekatorou, I. M. Banat, R. Marchant, and A. A. Koutinas, "ARTICLE IN PRESS Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production : a review," vol. 21, pp. 377–397, 2004.
- [21] D. Baumer, A. Val, M. A. G. U. De Souza, and G. S. Erzinger, "Toxicity of enzymatically decolorized textile dyes solution by horseradish peroxidase," *J. Hazard. Mater.*, 2018.
- [22] R. R. Manesh *et al.*, "Co-exposure to titanium dioxide nanoparticles does not affect cadmium toxicity

- in radish seeds (*Raphanus sativus*),” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 148, no. May 2017, pp. 359–366, 2018.
- [23] S. S. Yadav, R. Shukla, and Y. K. Sharma, “Nickel toxicity on seed germination and growth in radish (*Raphanus sativus*) and its recovery using copper and boron,” *J. Environ. Biol.*, vol. 30, no. 3, pp. 461–466, 2009.
- [24] C. Hernández, N. Duarte, L. Hernández, D. Peña, A. Coy, and F. Viejo, “Síntesis , caracterización y evaluación de recubrimientos híbridos porosos sol-gel dopados con acetato de cerio sobre la aleación de magnesio WE54-AE,” *Iteckne*, vol. 10, pp. 249–258, 2013.
- [25] B. Koohestani, A. K. Darban, E. Darezereshki, P. Mokhtari, E. Yilmaz, and E. Yilmaz, “The influence of sodium and sulfate ions on total solidification and encapsulation potential of iron-rich acid mine drainage in silica gel,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 3520–3527, 2018.
- [26] F. García-Villén, E. Flores-Ruíz, C. Verdugo-Escamilla, and F. J. Huertas, “Hydrothermal synthesis of zeolites using sanitary ware waste as a raw material,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 160, no. February, pp. 238–248, 2018.
- [27] E. Pabón, S. Borja, O. Javier, and A. Ramirez, “Síntesis Y Caracterización De Óxidos Mixtos De Sílice-Titania Preparados Por Método Sol-Gel Prepared By Sol – Gel Method and Hydrothermal Treatment,” *Rev. EIA*, vol. 10, no. 19, pp. 123–132, 2013.
- [28] A. Meier, “Characterisation of the surface of a new amorphous microporous silica,” vol. 11, pp. 155–163, 1989.
- [29] C. A. P. Almeida *et al.*, “Removal of methylene blue by adsorption on aluminosilicate waste: equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters,” *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 10, pp. 2437–2445, 2016.
- [30] M. Mincea, V. Patrulea, A. Negulescu, R. Szabo, V. Ostafe, and E. T. Al, “Adsorption of Three Commercial Dyes onto Chitosan Beads Using Spectrophotometric Determination and a Multivariate Calibration Method,” vol. 2013, no. April, pp. 446–457, 2013.
- [31] S. Khamparia and D. Jaspal, “Study of decolorisation of binary dye mixture by response surface methodology,” *J. Environ. Manage.*, vol. 201, pp. 316–326, 2017.
- [32] M. Gomez, M. D. Murcia, N. Christofi, E. Gomez, and J. L. Gomez, “Photodegradation of 4-chlorophenol using XeBr, KrCl and Cl₂ barrier-discharge excilamps: A comparative study,” *Chem. Eng. J.*, vol. 158, no. 2, pp. 120–128, 2010.
- [33] S. De Gisi, G. Lofrano, M. Grassi, and M. Notarnicola, “Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 9, pp. 10–40, 2016.
- [34] E. A. Sosnin, T. Oppenländer, and V. F. Tarasenko, “Applications of capacitive and barrier discharge excilamps in photoscience,” *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, vol. 7, no. 4, pp. 145–163, 2006.
- [35] A. Aristizábal, G. Perilla, and R. Diez, “KrCl and XeCl excilamps and LP-Hg lamp for UV and UV / H₂O₂ decolourization of dyes in water,” *Environ. Technol.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2018.
- [36] A. Rezaee, M. T. Ghaneian, S. J. Hashemian, G. Moussavi, A. Khavanin, and G. Ghanizadeh, “Decolorization of reactive blue 19 dye from textile wastewater by the UV/H₂O₂ process,” *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, pp. 1108–1112, 2008.
- [37] P. Navarro, J. A. Gabaldón, and V. M. Gómez-López, “Degradation of an azo dye by a fast and innovative pulsed light/H₂O₂ advanced oxidation process,” *Dye. Pigment.*, vol. 136, pp. 887–892, 2017.
- [38] F. Banat, S. Al-Asheh, M. Al-Rawashdeh, and M. Nusair, “Photodegradation of methylene blue dye by the UV/H₂O₂ and UV/acetone oxidation processes,” *Desalination*, vol. 181, no. 1–3, pp. 225–232, 2005.
- [39] G. X. Jian-Xiao L, Ying C, “Decoloration of methylene blue simulated wastewater using a UV-H₂O₂ combined system,” *J Water Reuse Desalination.*, vol. 1, pp. 45–51, 2011.
- [40] Q. Zhang, C. Li, and T. Li, “UV/H₂O₂ Process Under High Intensity UV Irradiation: A Rapid and Effective Method for Methylene Blue Decolorization,” *Clean - Soil, Air, Water*, vol. 41, no. 12, pp. 1201–1207, 2013.