

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**



---

**Degradación por fotocátalisis de colorantes en medio acuoso  
utilizando mezclas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y óxido de zinc (ZnO)**

---

Para optar el título profesional de ingeniero forestal y del medio ambiente

Presentado por:

**Carranza Salazar Joselyn Judicsa**

**Tumbes, 2022**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**



---

**Degradación por fotocátalisis de colorantes en medio acuoso  
utilizando mezclas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y óxido de zinc (ZnO)**

---

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Ing. Bermejo Requena Luis A. (Presidente)

Dr. Ing. Herrera Palacios Eber L. (Secretario)

Mg. López Celi Alduvar N. (Vocal)

**Tumbes, 2022**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE**



---

**Degradación por fotocátalisis de colorantes en medio acuoso  
utilizando mezclas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y óxido de zinc (ZnO)**

---

Los suscritos declaramos que la tesis es original en su contenido y  
forma:

Bach. Carranza Salazar Joselyn Judicsa (Autor) \_\_\_\_\_

Dr. Cruz Cerro Gerardo Juan Francisco (Asesor) \_\_\_\_\_

Dr. Jaroslav Lang Ph. D (Co-Asesor) \_\_\_\_\_

Mg. Rimaycuna Ramírez John H. (Co-Asesor) \_\_\_\_\_

Tumbes, 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES  
FACULTAD DE CIENCIAS GRARIAS  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL Y  
MEDIO AMBIENTE  
CAMPUS UNIVERSITARIO S/N "LA CRUZ"  
SECRETARIA ACADEMICA  
TUMBES - PERU



## ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

En Tumbes, a los siete (07) días del mes de junio de dos mil veintidós, se reunieron de manera virtual, a través del siguiente enlace <https://us02web.zoom.us/j/89105357449?pwd=cWxjMStjM2lMVjJOb1R6eHNsenlHQ09>, los integrantes del jurado designados, según Resolución Decanal N° 035-2019/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D (29-03-2019) y con Aprobación del Proyecto de Tesis, según Resolución Decanal N° 010-2020/UNTUMBES-VRACAD-FCA-D (15-01-2020); con el objetivo de evaluar la sustentación de la tesis denominada: "**Degradación por fotocátalisis de colorantes en medio acuoso utilizando mezclas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) y óxido de zinc (ZnO)**", presentada para optar el Título de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente por **CARRANZA SALAZAR JOSELYN JUDICSA**. Cuyo asesor de la mencionada tesis es el **Dr. GERARDO JUAN FRANCISCO CRUZ CERRO**, y coasesores **Ing. Jaroslav Lang Ph.D** y el **MSc. JOHN RIMAYCUNA RAMÍREZ**

A las dieciséis horas con treinta minutos y, de acuerdo a lo estipulado en el Reglamento respectivo, el presidente del jurado dio por iniciado el acto.

Luego de la exposición del trabajo, la formulación de preguntas y la deliberación del jurado lo declararon **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **BUENO**

Por lo tanto, el Bachiller, **CARRANZA SALAZAR JOSELYN JUDICSA**, queda apto para que el Consejo Universitario de la Universidad Nacional de Tumbes, le expida el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente de conformidad con lo estipulado en el Artículo 90 del Estatuto de la Universidad Nacional de Tumbes y a lo normado en el Reglamento de Grados y Títulos.

Siendo las **DICISIETE** horas con **QUINCE (15)** minutos, el presidente del jurado dio por concluido el presente acto académico y para mayor constancia de lo actuado firman en señal de conformidad todos los integrantes de este jurado, presentes en el acto de sustentación.

**Mg. Luis Alberto Bermejo Requena**

DNI N° 02642832  
Presidente

**Mg. Alduvar Nectali Lopez Celi**

DNI N° 32826529  
Vocal

**Dr. Eber L. Herrera Palacios**

DNI N° 42450218  
Secretario

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros docentes de la Universidad Nacional de Tumbes por la orientación profesional que nos brindaron e inspirarnos para formarnos como personas capaces y competitivas en el transcurso de nuestras vidas.

Agradezco especialmente a mi Asesor el Ing. Gerardo J. F. Cruz Cerro y a mis Co asesores al Dr. Jaroslav Lang Ph.D. y al Dr. John H. Rimaycuna Ramírez, ya que con sus valiosas experiencias, asesoría y apoyo desinteresado permitieron la culminación con éxito del proyecto.

Por el último agradezco a todos los que permitieron y ayudaron en culminar esta gran etapa de mi vida.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

I. Introducción .....	11
II. Revisión de Literatura .....	13
III. Materiales y métodos .....	16
3.1. Obtención de nanoparticulas de ZnO y TiO <sub>2</sub> .....	16
3.2. Preparación de los tratamientos.....	17
3.3. Caracterización del ZnO y TiO <sub>2</sub> .....	17
3.4. Preparación de soluciones .....	17
3.5. Ensayos de fotocatalisis.....	18
3.6. Fotocatalisis .....	18
3.7. Plan de procesamiento y análisis de datos .....	18
IV. Resultados y discusiones .....	19
4.1. Caracterización de las nanoparticulas.....	19
4.2. Degradación fotocatalítica.....	23
V. Conclusiones .....	49
VI. Recomendaciones.....	50
VII. Referencias bibliográficas .....	51
VIII. Anexos .....	60

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma metodológico de la investigación. ....	16
Figura 2. Difractograma de rayos X de las partículas de TiO <sub>2</sub> .....	19
Figura 3. Difractograma de rayos X de las partículas de ZnO. ....	20
Figura 4. Análisis de grupos funcionales mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier de las partículas de TiO <sub>2</sub> .....	21

Figura 5. Análisis de grupos funcionales mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier de las partículas de ZnO.....	22
Figura 6. Influencia del catalizador TiO <sub>2</sub> al 100% sobre la degradación del azul de metileno. ....	23
Figura 7. Influencia del catalizador de ZnO al 100% sobre la degradación del azul de metileno.....	24
Figura 8. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 50% c/u sobre la degradación del azul de metileno. ....	25
Figura 9. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 75% y 25% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno. ....	26
Figura 10. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 95% y 5% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno. ....	27
Figura 11. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 97% y 3% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno. ....	28
Figura 12. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 99% y 1% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno. ....	29
Figura 13. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 99,5% y 0,5% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno.....	30
Figura 14. Influencia del TiO <sub>2</sub> al 100% sobre la degradación del oxalato verde de malaquita. ....	32
Figura 15. Influencia del ZnO al 100% sobre la degradación del oxalato verde de malaquita. ....	33
Figura 16. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 50% c/u sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.....	34
Figura 17. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 75% y 25% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.....	35
Figura 18. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 95% y 5% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.....	36
Figura 19. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 97% y 3% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.....	37
Figura 20. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 99% y 1% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.....	38
Figura 21. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 99,5% y 0,5% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita. ....	39

Figura 22. Influencia del ZnO al 100% sobre la degradación de la tartrazina. ....	41
Figura 23. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 50% c/u sobre la degradación de la tartrazina. ....	42
Figura 24. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 75% y 25% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina. ....	43
Figura 25. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 95% y 5% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina. ....	44
Figura 26. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 97% y 3% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina. ....	45
Figura 27. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 99% y 1% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina. ....	46
Figura 28. Influencia de los catalizadores TiO <sub>2</sub> y ZnO al 99,5% y 0,5% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina. ....	47

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los tratamientos. ....	17
--	----



## RESUMEN

Actualmente la industria textil viene contaminando grandes cantidades de agua siendo el principal contaminante los colorantes y estos son peligrosos para la salud humana debido a que son tóxicos, cancerígenos por ello la presente investigación tuvo como objetivo principal degradar colorantes (Azul de metileno, Tartrazina y Oxalato de verde de malaquita) por fotocátalisis utilizando mezclas de Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y Óxido de Zinc ( $\text{ZnO}$ ). Se sintetizó la nanopartículas ( $\text{ZnO}$ ) usando el método de emulsión/evaporación, se caracterizaron las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  mediante Difracción de rayos X (XRD) y Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Se prepararon soluciones de Azul de metileno, Oxalato verde malaquita y tartrazina a concentración  $9,6 \times 10^{-5}$  mol/L,  $4,64 \times 10^{-3}$  mol/L y  $2,7 \times 10^{-4}$  mol/L respectivamente. Se trabajó con 8 tratamientos a diferentes concentraciones de catalizadores por colorante en el proceso fotocatalizador y se obtuvieron los resultados a través de la espectrofotometría UV-Vis doble haz. Se determinó que la mejor combinación de los catalizadores para degradar el azul de metileno fue de  $\text{TiO}_2$  al 99,5% con  $\text{ZnO}$  al 0,5%, para degradar el oxalato verde malaquita fue de ambos catalizadores al 50% y para la degradación de la tartrazina fue  $\text{TiO}_2$  al 75% con  $\text{ZnO}$  al 25% respectivamente obteniendo la mayor degradación de todos los tratamientos con una concentración de  $1,05 \times 10^{-09}$  mol/L para el azul de metileno,  $3,51 \times 10^{-08}$  mol/L para el oxalato verde malaquita y  $9,48 \times 10^{-08}$  mol/L para la tartrazina. Se logró comprobar que existe una gran eficiencia y eficacia en los procesos de oxidación fotocatalítica, a través de un catalizador  $\text{TiO}_2$ , obteniendo que la concentración de residuos contaminantes (azul de metileno, verde de malaquita y tartrazina) y el tiempo afectan directamente en el crecimiento, evolución y eficacia del proceso de la fotocátalisis.

**Palabras Claves:** Fotocatálisis,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ , Colorantes, Luz Visible.

## ABSTRACT

Currently, the textile industry has been contaminating large amounts of water, the main contaminant being dyes and these are dangerous to human health because they are toxic, carcinogenic, therefore the main objective of this research was to degrade dyes (Methylene Blue, Tartrazine and Oxalate of malachite green) by photocatalysis using mixtures of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) and Zinc Oxide (ZnO). The nanoparticles (ZnO) were synthesized using the emulsion/evaporation method, the TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles were characterized by X-ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR). Solutions of methylene blue, malachite green oxalate and tartrazine were prepared at concentrations of  $9.6 \times 10^{-5}$  mol/L,  $4.64 \times 10^{-3}$  mol/L and  $2.7 \times 10^{-4}$  mol/L, respectively. We worked with 8 treatments at different concentrations of catalysts per dye in the photocatalyst process and the results were obtained through double beam UV-Vis spectrophotometry. It was determined that the best combination of catalysts to degrade methylene blue was TiO<sub>2</sub> at 99.5% with ZnO at 0.5%, to degrade malachite green oxalate it was both catalysts at 50% and for the degradation of tartrazine was 75% TiO<sub>2</sub> with 25% ZnO, respectively, obtaining the highest degradation of all treatments with a concentration of  $1.05 \times 10^{-9}$  mol/L for methylene blue,  $3.51 \times 10^{-8}$  mol/L for malachite green oxalate and  $9.48 \times 10^{-8}$  mol/L for tartrazine. It was possible to verify that there is great efficiency and effectiveness in the photocatalytic oxidation processes, through a TiO<sub>2</sub> catalyst, obtaining that the concentration of polluting residues (methylene blue, malachite green and tartrazine) and time directly affect growth, evolution and efficiency of the photocatalysis process.

**Keywords:** Photocatalysis, TiO<sub>2</sub>, ZnO, Dyes, Visible Light.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es una sustancia indispensable para la vida, por sus múltiples propiedades (Pelegrí, 2020), es ampliamente utilizada en actividades diarias tales como la agricultura (~ 70%), la industria (~ 20%), el uso doméstico (~ 6%), entre otras, convirtiéndose en uno de los recursos más apreciados en el planeta (Llop, 2018). Actualmente diversos productos químicos que derivan de las actividades humanas desembocan en los cuerpos de agua alterando su composición y naturaleza (Valladares Cisneros et al., 2019), la industria textil tiene un alto consumo de agua y es una actividad que genera grandes cantidades de residuos contaminantes (Brañez Sánchez, 2018).

Dentro de estos contaminantes tenemos los colorantes como la tartrazina (Aoudjit et al., 2021), azul de metileno (Danish et al., 2018) y verde de malaquita (P. Zhang et al., 2018).

La tartrazina es un tinte azo sintético utilizado como colorante alimentario que proporciona un color de amarillo a naranja en su aplicación (Bhatt et al., 2018) Sin embargo, diversos estudios afirman que su uso causa problemas de salud como causar ansiedad, depresión, migraña, trastornos de la visión y del sueño (Sahnoun et al., 2018) , ataque de asma, rinitis, urticaria, eccema atópico y choques anafilácticos (Gallen & Pla, 2013) dolores de cabeza frecuentes en adultos, neurotoxicidad , genotoxicidad y carcinogenicidad (Yamjala et al., 2016) además presenta fitotoxicidad en el crecimiento vegetal (Leulescu et al., 2018).

El azul de metileno es un colorante catiónico de base aromática de bajo peso molecular (Imron et al., 2019), la exposición prolongada puede causar metahemoglobinemia, náuseas, anemia, hipertensión, vómitos cianosis, ictericia, necrosis tisular y daño neurológico en humanos (L. Chen et al., 2021; Sahu et al., 2020).

El verde de malaquita es un colorante orgánico catiónico importante que contiene un grupo trifenilmetano y se ha utilizado ampliamente como agente colorante en las industrias (Mohamed et al., 2019; Raval et al., 2016).

Los tintes son peligrosos para la salud humana (Abdelrahman, 2018) debido a que son tóxicos, cancerígenos (Lou et al., 2018), mutagénicos por naturaleza (Sriram et al., 2019) y no biodegradables debido a su estructura aromática (Uthappa et al., 2020) debido a esto la eliminación de tintes ha ganado un gran interés (Salama, 2017).

Los métodos para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes incluyen ósmosis inversa, coagulación, floculación, intercambio iónico, adsorción de carbón activado, oxidación avanzada, ozonización, fotocatalisis, proceso Fenton, foto-Fenton, oxidación electroquímica (Lade et al., 2015). Estos procesos suelen ser costosos y generan residuos de amina que se encuentran en los lodos después del tratamiento (Sarkar et al., 2020).

Alternativamente, los semiconductores como el dióxido de titanio y el óxido de zinc han mostrado una excelente actividad fotocatalítica debido a una posición de banda positiva que desarrolla más electrones y huecos bajo la luz ultravioleta (Xu et al., 2019) sin embargo no se han encontrado referencias donde se usen dióxido de titanio y óxido de zinc en diversas concentraciones en forma de nanopartículas.

Por ello esta investigación tiene por objetivo degradar por fotocatalisis colorantes (azul de metileno, tartrazina y verde malaquita) en medio acuoso utilizando mezclas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ).

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

Los procesos de oxidación avanzados se conocen como métodos prometedores para la eliminación de contaminantes de preocupación emergente de los efluentes de aguas residuales, entre ellos la fotocatalisis se estudia ampliamente para el tratamiento de aguas residuales (Rueda-Marquez et al., 2020).

La fotocatalisis es una técnica que utiliza luz y semiconductores (Pedanekar et al., 2020) además presenta resistencia a la corrosión, alta estabilidad, no toxicidad y no causa contaminación secundaria (X. Zhang, 2020). El fotocatalizador ideal debe tener una energía de banda prohibida estrecha, baja tasa de recombinación, bajo costo, mayor separación de carga, seguridad, mayor eficiencia de luz visible y buena estabilidad (Ge et al., 2019).

El mecanismo de fotocatalisis implica la generación de radical hidroxilo ( $\bullet$  OH) y anión superóxido ( $\bullet$  O<sub>2</sub><sup>-</sup>). Entre estos dos  $\bullet$  OH exhibe un alto potencial de oxidación que actúa como principal especie oxidante. Tanto  $\bullet$  OH como  $\bullet$  O<sub>2</sub><sup>-</sup> actúan como oxidantes para degradar compuestos orgánicos. Después de la mineralización, el contaminante orgánico produce CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O menos dañinos como productos de reacción (Mohite et al., 2017).

La fotocatalisis tiene diversas ventajas como que es amigable con el medio ambiente, tiene bajo costo de proceso, alto ahorro de energía, excelente susceptibilidad y el ajuste de la carga de catalizador es fácil, por otro lado, como desventajas tiene que los materiales son difíciles de recuperar y regenerar, la eficacia de la degradación se reduce debido al exceso de contaminante y las pérdidas potenciales de fotocatalizador bajo operación a largo plazo (D. Chen et al., 2020).

Los óxidos metálicos son candidatos prometedores para aplicaciones fotocatalíticas debido a su biocompatibilidad, vida útil, estabilidad, estructura electrónica favorable, capacidad para generar portadores de carga y características de transporte de carga (Pedanekar et al., 2020), los más populares son TiO<sub>2</sub>, ZnO, SnO<sub>2</sub> y WO<sub>3</sub> (Khan et al., 2015).

El fotocatalizador de  $\text{TiO}_2$  es ambientalmente benigno, está disponible en abundancia, es biocompatible y puede inmovilizarse en una variedad de soportes para eliminar varios contaminantes (Byrne et al., 2018). Dependiendo de la temperatura, existe en tres fases: anatasa ( $<800^\circ\text{C}$ ), rutilo ( $>800^\circ\text{C}$ ) y brookita (Munirah et al., 2018).

Después de la irradiación UV, los fotones de energía igual o mayor que la energía de banda prohibida de  $\text{TiO}_2$  ( $h\nu > 3,2\text{ eV}$ , es decir,  $\lambda < 380\text{ nm}$ ) se absorben en la superficie de  $\text{TiO}_2$  fotocatalizador, se produce la generación del par electrón-hueco, los huecos contribuyen a la formación del radical hidroxilo ( $\bullet\text{HO}$ ) y los electrones dan el anión superóxido. Tanto el radical hidroxilo como el anión superóxido interactúan con contaminantes orgánicos y finalmente se convierten en productos inocuos (Wardhani et al., 2018).

El  $\text{ZnO}$  es un fotocatalizador potencial prometedor, ya que tiene una banda prohibida directa amplia (3,37 eV), estabilidad química, síntesis fácil, bajo costo, gran energía de enlace de excitación (60 meV), excelentes propiedades ópticas y baja toxicidad en comparación con otros semiconductores (Chia et al., 2017).

El  $\text{ZnO}$  exhibe una alta tasa de recombinación debido a su gran banda prohibida (3.2eV). Por lo tanto, se desarrollan diversas estrategias, como el dopaje con catión o anión y junto con otros semiconductores, para minimizar la tasa de recombinación (Alfaro Cruz et al., 2018). Varios dopantes como Er (Narayanan & Deepak, 2018b), Ag (Abdelsamad et al., 2018), Al (Aprilia et al., 2018), Ce (Narayanan & Deepak, 2018a), Co (Altintas Yildirim et al., 2016) y N (Tiron et al., 2017) se utilizan para degradar tintes orgánicos.

Las nanopartículas de  $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$  han sido probadas para la degradación de colorantes (Hussin et al., 2019). Se ha comprobado que usando como catalizador el  $\text{TiO}_2$  sulfatado al 3% se logra eliminar el 100% del colorante azul de metileno a las 6 horas de reacción (Contreras-Bermúdez, 2009). Al usar el  $\text{TiO}_2$  soportado en arcilla logra una degradación del 90% del colorante oxalato verde de malaquita a los 90 minutos de haber iniciado el ensayo (Ladino Moreno & Trejos Cadavid, 2017). En la investigación de (Turriago & Gutierrez, 2011) usaron el  $\text{TiO}_2$  soportado con carbón

activado para la degradación de tartrazina donde obtuvieron una degradación del 81,7%. Se verificó que efectivamente el sistema realizaba una degradación y no solo una adsorción mediante el análisis del Espectro Infrarrojo Cercano de la tinta a lo largo del periodo de degradación.

El catalizador ZnO funcionalizado con montmorillonita natural logro una degradación del colorante azul de metileno del 40% en un tiempo de 150 min (Fatimah et al., 2011). El nanocompuesto de ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> sintetizado por calcinaciones de ZnO y NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> a una temperatura alta de 800 ° C exhibe una alta actividad fotocatalítica para la decoloración de la solución de azul de metileno bajo luz ultravioleta (Adeleke et al., 2018). Por otro lado, para la degradación del colorante oxalato verde de malaquita (Saad et al., 2020) dopo en ZnO con quitosano mostrando una mejora del 87%, en comparación con el ZnO puro. La síntesis de ZnO mediante la técnica sol-gel asistida por microondas mostro que el 95% de tartrazina a una concentración de 50 mg/L se degradó en 120 min debido a la degradación fotocatalítica en presencia de 0,02 g de nanopartículas de ZnO (Assi et al., 2017).

Manjarres Martínez (2019) sintetizo películas de TiO<sub>2</sub>/ZnO para la remoción de azul de metileno y llego al resultado que mientras menos cantidad de ZnO había una mayor degradación de azul de metileno. Por otro lado, para la degradación de oxalato verde malaquita con los catalizadores TiO<sub>2</sub>/ZnO Baseri & Alizadeh (2018) en su investigación concluye que ambos fotocatalíticos sintetizados han mostrado muy buenos resultados en la eliminación de la MG, con una degradación máxima del 66 % a los 60 minutos.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

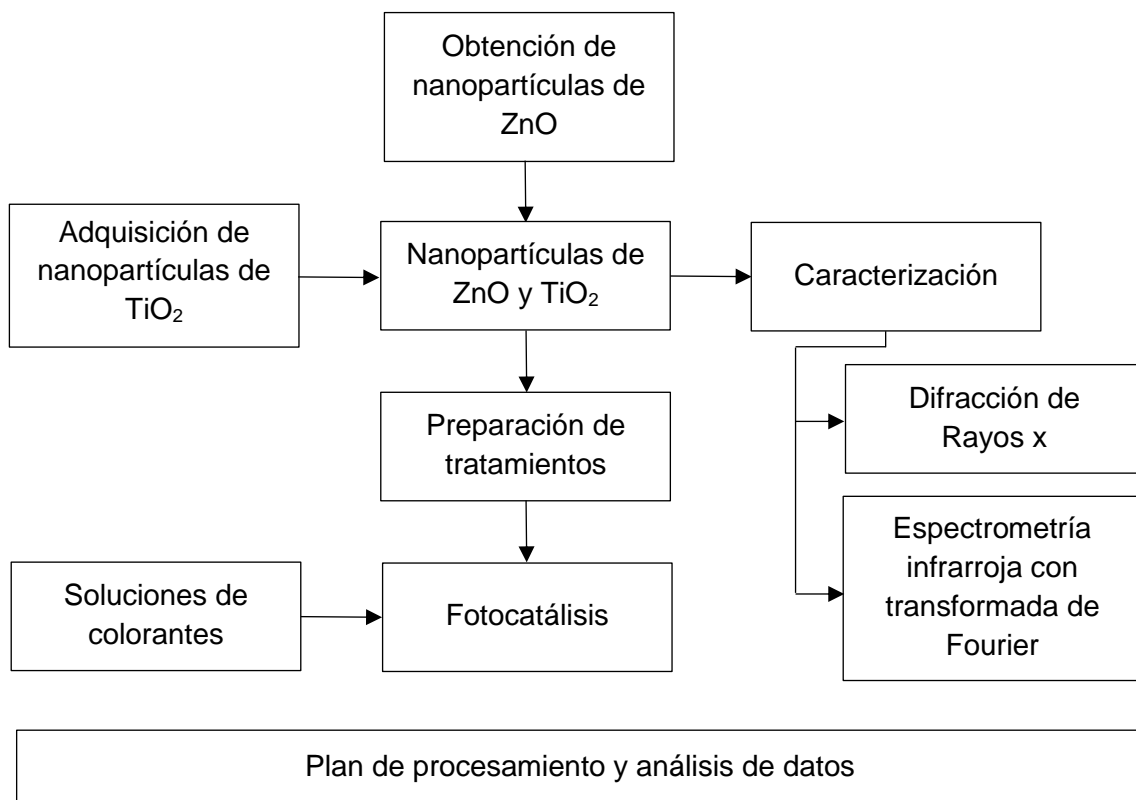


Figura 1. Flujograma metodológico de la investigación. .

#### 1.1. Obtención de nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub>

Se usaron 200 mL de NaOH y Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Se calentó la solución de NaOH en agitador magnético (Heating Magnetic Stirrer), a una temperatura a 60 °C, luego se ingresó con ayuda de una bureta en velocidad lenta el Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> hasta que llegue a una temperatura de 80°C. La mezcla de estas dos sustancias, es un líquido de un color blanquecino. Se dejó enfriar a una temperatura 60 °C. Luego se pasó al agitador magnético por 30 minutos, posterior a eso se secó a 60° C por 12 a 18 horas como parte de la síntesis. De allí obtenemos un sólido que fue pasado por un proceso de molienda, tamizado y pesaje, obteniendo una masa de 3,878 g de ZnO.

El TiO<sub>2</sub> es un producto químico inorgánico importante, contiene principalmente pigmento blanco y presenta las siguientes características: Contenido de TiO<sub>2</sub> es



≥98,5%, absorción de aceite (g/100) ≥26, Volatilidad a 105°C es ≥0,5%, residuo de 45µm es ≥0,5% y sal soluble de 0,5.

## 1.2. Preparación de los tratamientos

En la preparación de los tratamientos se pesaron ambas nanopartículas para llevarlas a homogenización para los análisis correspondientes, almacenándolos hasta las pruebas siguientes.

*Tabla 1. Descripción de los tratamientos.*

Tratamientos	WT% ZnO	WT% TiO <sub>2</sub>	Wt ZnO	Wt TiO <sub>2</sub>
T 0	100 %	0%	0,800	0
T 1	50 %	50%	0,400	0,400
T 2	25 %	75%	0,200	0,600
T 3	5 %	95%	0,040	0,760
T 4	3 %	97%	0,024	0,776
T 5	1 %	99%	0,008	0,792
T 6	0,5 %	99,5%	0,004	0,796
T 7	0 %	100%	0	0,800

## 1.3. Caracterización del ZnO y TiO<sub>2</sub>

La estructura cristalina se estudió mediante difracción de rayos X usando un difractómetro Rigaku SmartLab operado a 40 kV y 40 mA, radiación CoK $\alpha$  ( $\lambda = 0,179278$  nm). Los patrones de difracción de rayos X se recogieron en un rango de 5° a 90° 2 $\theta$ . La interpretación de los picos de difracción de rayos X, se realizó mediante el software Match<sub>3</sub> (Crystal Impact, Alemania).

Los grupos funcionales de las partículas de ZnO y TiO<sub>2</sub> se analizaron mediante un analizador de espectros de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) (Shimadzu IR Tracer 100, Japan.).

## 1.4. Preparación de soluciones

Se prepararon las soluciones de colorantes por separado donde se pesó 0,0096 g de Azul de Metileno, 0,464 g de Oxalato Verde Malaquita, 0,027 g de Tartrazina, cada colorante se mezcló con 100 mL agua destilada y se

homogenizó por un tiempo de 50 minutos en un vaso de precipitado, después se enraso con agua destilada hasta completar un litro, teniendo una dosis de  $9,6 \times 10^{-5}$  mol/L,  $4,64 \times 10^{-3}$  mol/L y  $2,7 \times 10^{-4}$  mol/L respectivamente. Para los análisis se midieron con una longitud de onda de 664 nm (Azul de metileno), 617 nm (Oxalato verde malaquita) y 426 nm (Tartrazina). Se eligieron estos colorantes debido a su alto uso en la industria alimentaria, además han sido ampliamente usados en el tipo de ensayo que se realizó en la presente investigación.

### **1.5. Ensayos de fotocatalisis**

Se realizó tratamientos para probar la capacidad de los catalizadores seleccionados. En el primer ensayo se pesó 0,05 g de Titanio y se mezcló con 100 mL de muestra patrón que es el azul metileno, se prosiguió a homogenizar en 30 minutos. Esto nos ayudó a saber si el reactivo es eficiente en la solución. La longitud de onda que se utilizó en nuestras pruebas fue de 664 nm

### **1.6. Fotocatalisis**

Se agregó 100 mL de los colorantes indicados en vasos de precipitado de 250 mL, con una agitación constante en la cámara fotocatalizador, se mantuvo en oscuridad por 30 minutos para que el  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  puedan absorber el contaminante, luego se activó la lámpara UV y se tomó la muestra cada 5 minutos por un periodo de 120 minutos. Las muestras recolectadas se colocaron en la centrifuga a 4000 rpm por un tiempo de 3 minutos, y se tomó una alícuota de 2 mL en un vaso de precipitado de 25 mL para luego enrasarlo, finalmente se realizó la lectura en el espectrofotómetro en su longitud máxima de onda.

### **1.7. Plan de procesamiento y análisis de datos**

Se usará un diseño muestral probabilístico, en ensayo de posibilidad seleccionada, extrayendo al azar muestras de aguas que serán tratadas con oxidación foto catalítica y analizadas en laboratorios, empleando tablas resumidas, para observar los resultados esperados.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 1.8. Caracterización de las nanopartículas

#### 1.8.1. Difracción de rayos X

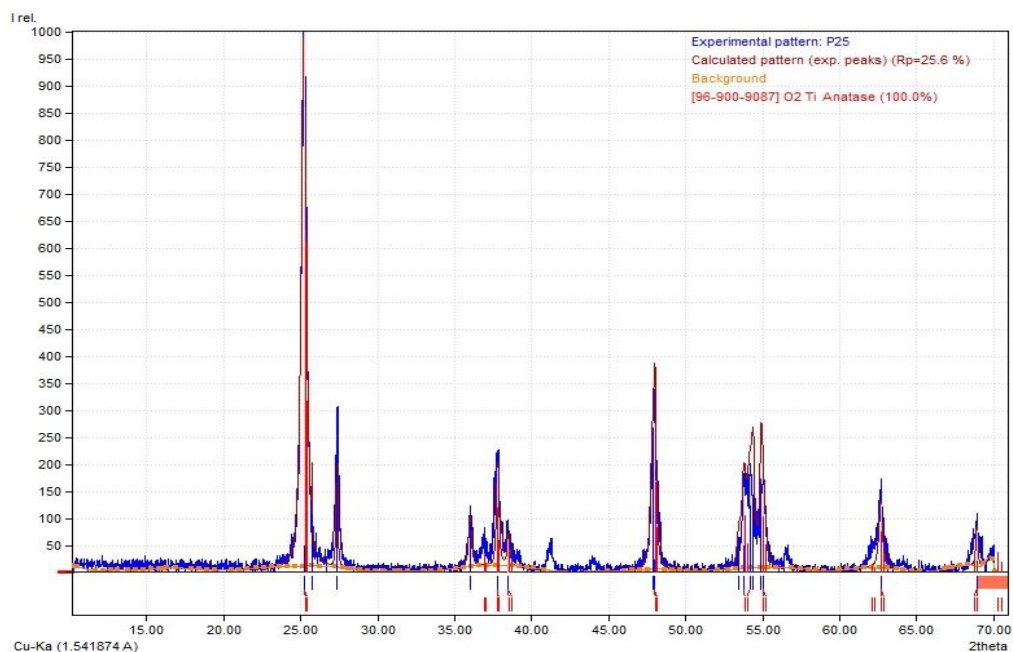
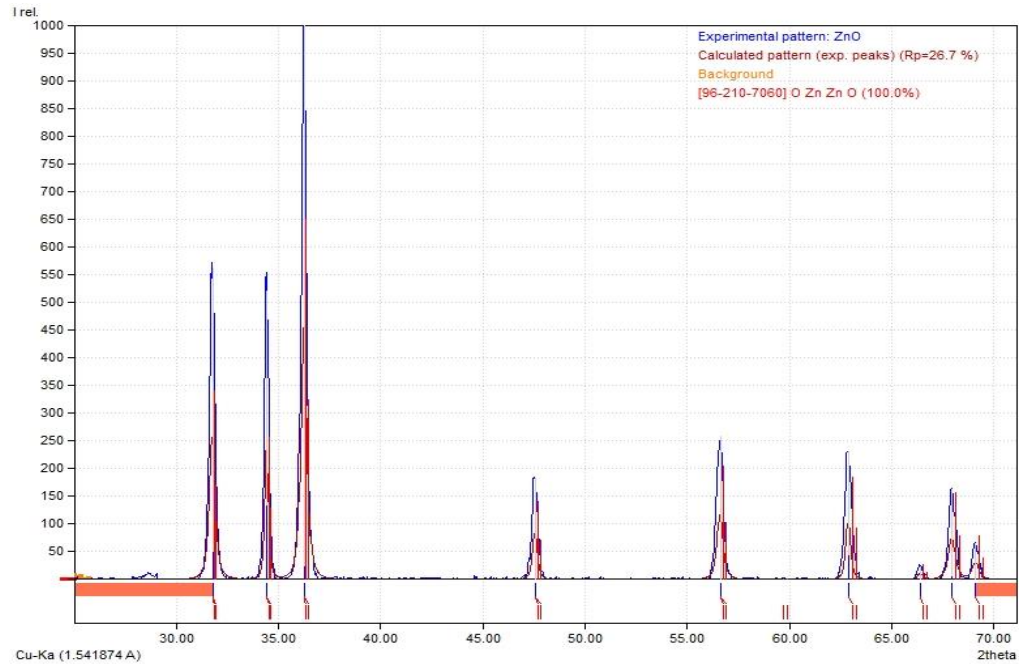


Figura 2. Difractograma de rayos X de las partículas de TiO<sub>2</sub>.

El TiO<sub>2</sub> es un material fuerte, relativamente barato, fácil de preparar y no tóxico consta de tres diferentes estructuras cristalinas, anatasa, rutilo y brokita (Y. Zhang et al., 2021). En la figura 2 muestra los patrones de difracción de rayos x de Dióxido de Titanio, exhibiendo líneas de difracción en  $2\theta = 25^\circ, 37^\circ, 48^\circ, 54^\circ, 55^\circ, 62^\circ$  y  $75^\circ$  presenta una mezcla de fases cristalinas, que caracterizan la fase anatasa (tetragonal) del óxido de titanio y en una minoría a la fase rutilo, estos resultados son similares (Abdulmajeed et al., 2019; Cruz-Ortiz et al., 2017; Sohn & Shin, 2008).



*Figura 3. Difractograma de rayos X de las partículas de ZnO.*

En la figura 3 muestra los patrones de difracción de rayos x de Óxido de Zinc, exhibiendo líneas de difracción en las posiciones  $2\theta = 32^\circ, 35^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 57^\circ, 63^\circ, 66^\circ, 68^\circ$  y  $69^\circ$ . Estas líneas de difracción fueron comparadas con patrones reportados por otros autores (Dulta et al., 2020; Jayachandran et al., 2021; Selim et al., 2020) donde se encontró una alta correspondencia entre los planos cristalinos y/o posiciones de los picos característicos.

### 1.8.2. Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier

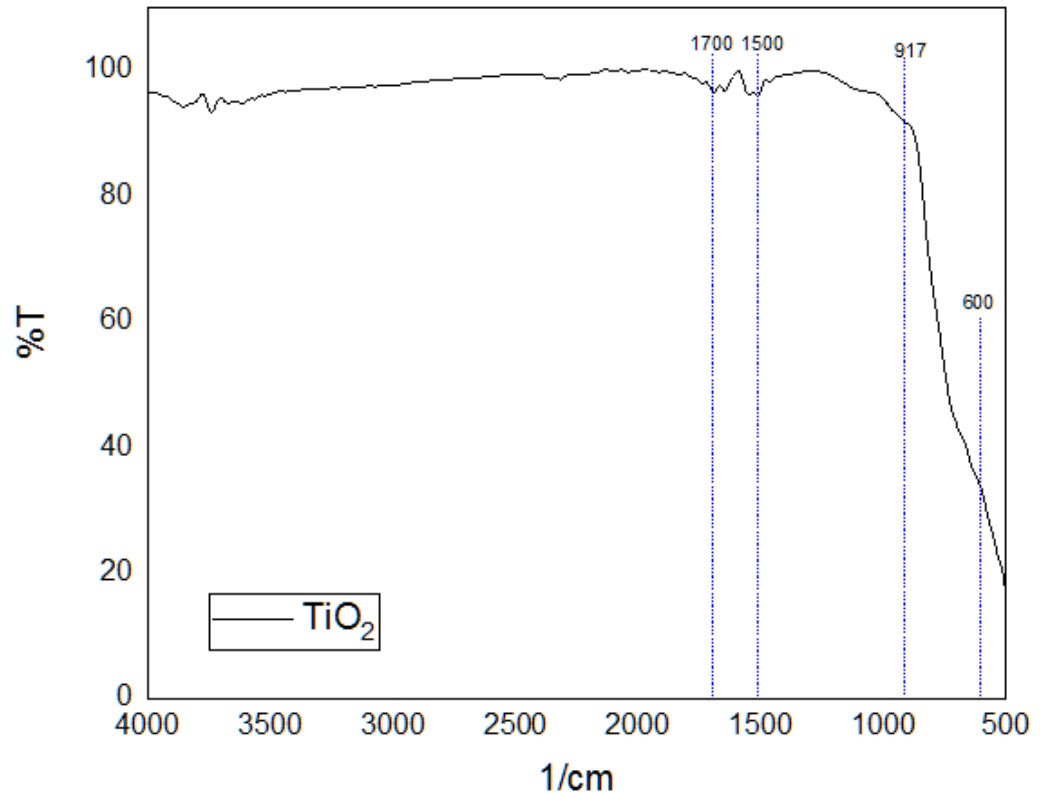
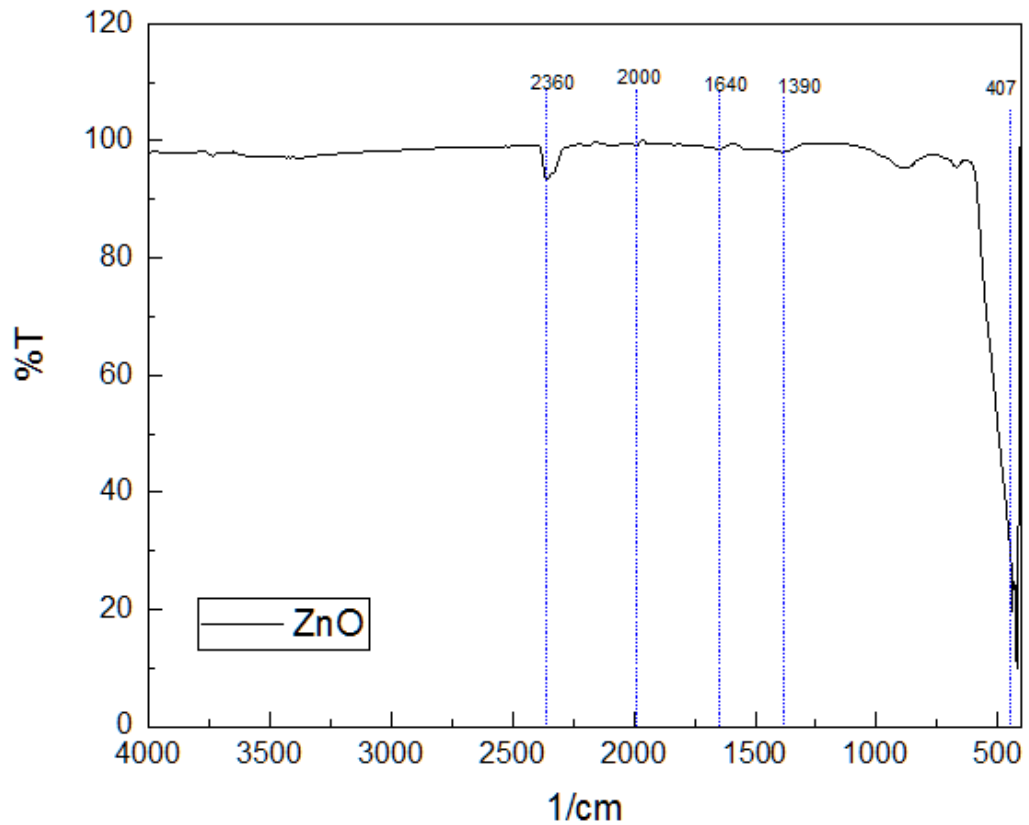


Figura 4. Análisis de grupos funcionales mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier de las partículas de TiO<sub>2</sub>.

En la figura 4 se observa el espectro infrarrojo de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> que nos permitió evidenciar la presencia de grupos funcionales, como se observa en la figura se destacan picos en las bandas de 1700 y 1500 1/cm, correspondientes al grupo C=O en la banda de 1700 y al grupo N-H en la banda 1500 (Montiel-Juárez et al., 2015).

Además, en el intervalo de 400 a 1000 1/cm hay que poner especial atención porque es ahí donde están las bandas de interés correspondientes a los enlaces Ti-O, Ti-OH y Ti-C (Vargas Urbano et al., 2011). Como se aprecia en la figura las bandas en el intervalo de 700 a 500 1/cm indican características de enlace Ti-O-Ti. (Mosquera et al., 2015).



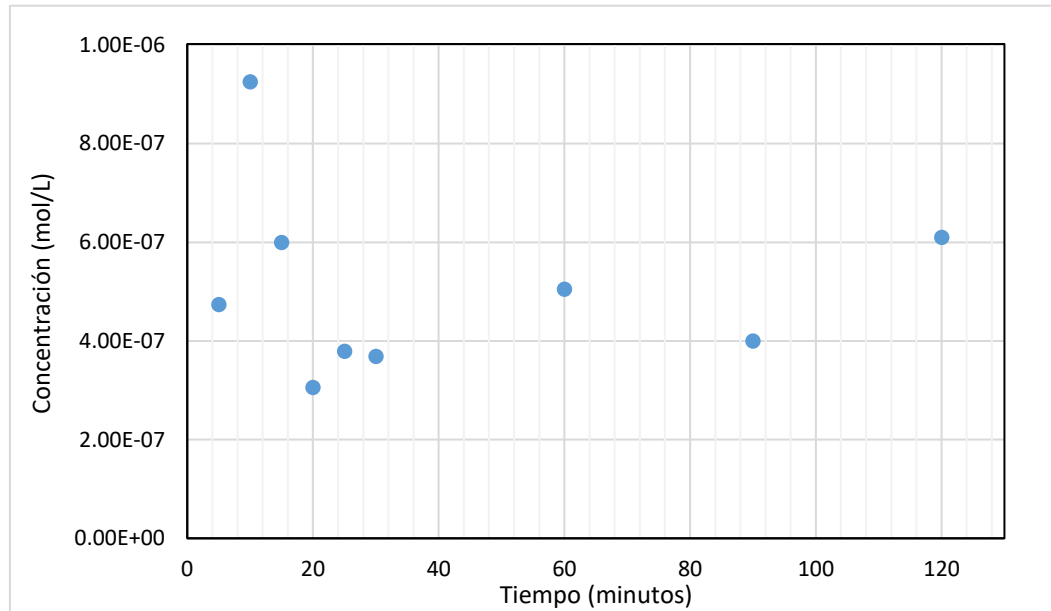
*Figura 5. Análisis de grupos funcionales mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier de las partículas de ZnO.*

En la figura 5 se observa el espectro infrarrojo de las nanopartículas de ZnO que nos permitió evidenciar la presencia de grupos funcionales, como se observa en la figura se destacan picos en las bandas 2360, 2000 y 1640 correspondientes al grupo funcional OH (Liza Castillo, 2019), además la banda de 1390 se puede asociar con el grupo funcional C-O (Estrada Urbina, 2018).

En el espectro se observa un pico pronunciado entre las bandas a partir de 500 a 400 1/cm es debido a las vibraciones de nanopartículas de ZnO (Aquino Granados, 2016; Cordova Paz, 2017).

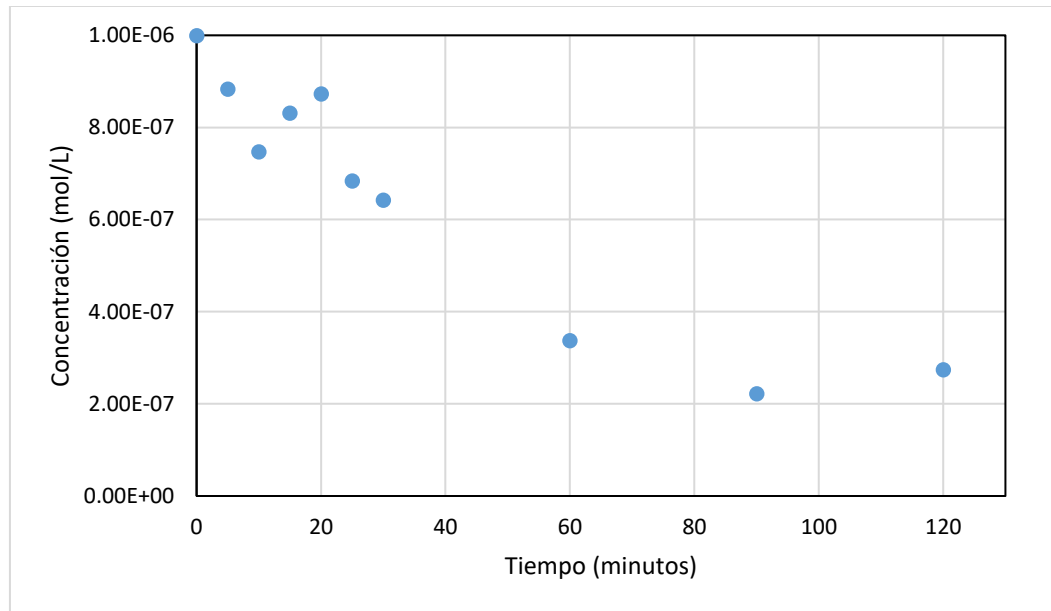
## 1.9. Degradación fotocatalítica

### 1.9.1. Degradación del colorante azul de metileno por mezclas de $\text{TiO}_2$ y $\text{ZnO}$



*Figura 6. Influencia del catalizador  $\text{TiO}_2$  al 100% sobre la degradación del azul de metileno.*

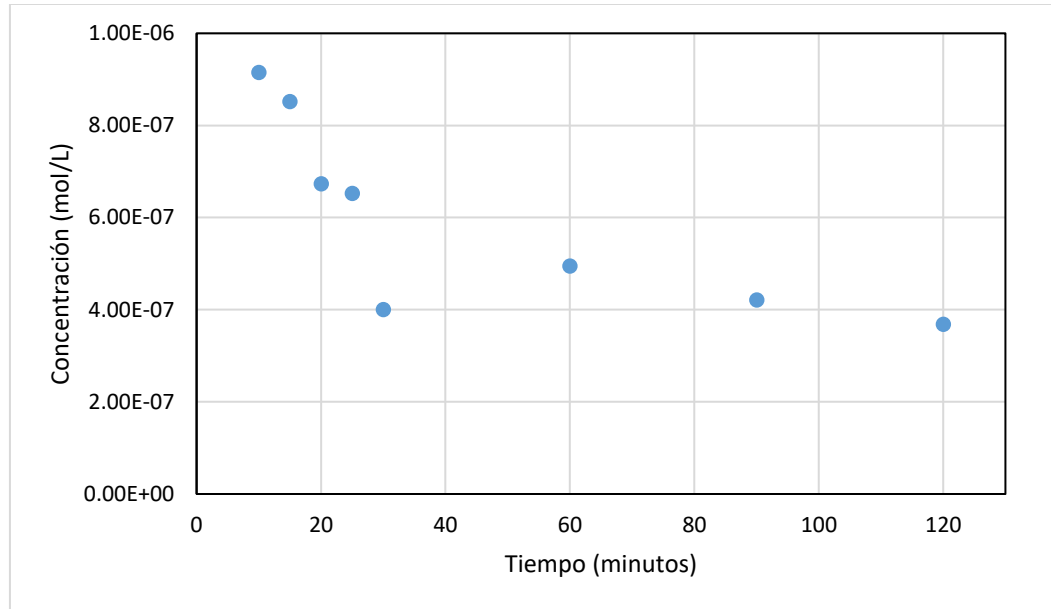
En la figura 6 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 20 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,06 \times 10^{-07}$  mol/L, con el catalizador de  $\text{TiO}_2$  al 100%.



*Figura 7. Influencia del catalizador de ZnO al 100% sobre la degradación del azul de metileno.*

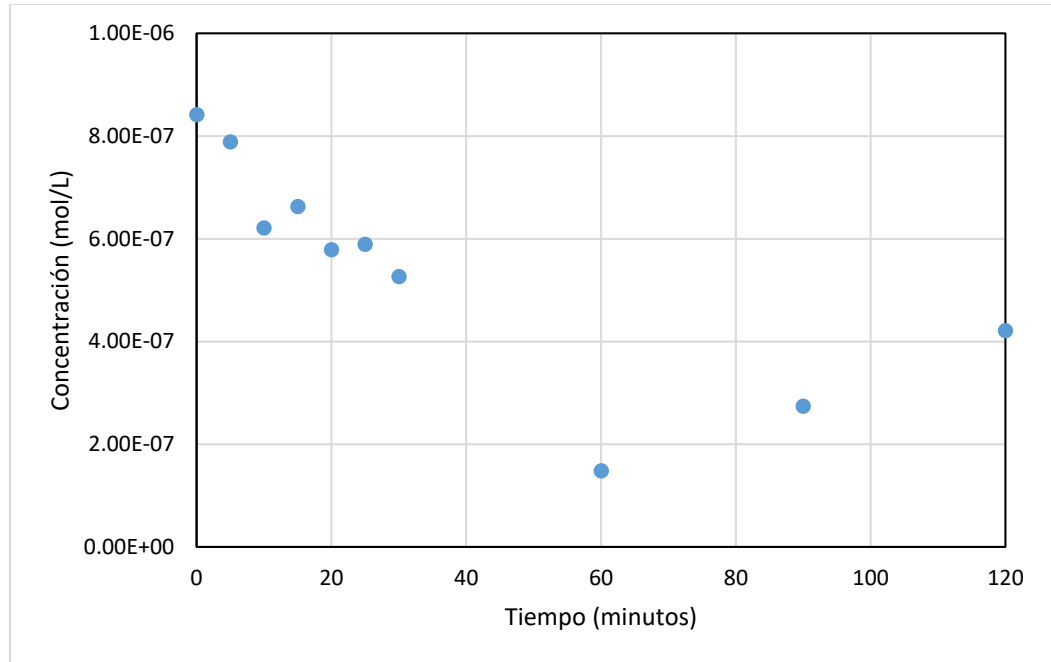
En la figura 7 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 90 minutos del tratamiento con una concentración de  $2,22 \times 10^{-07}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 100%.





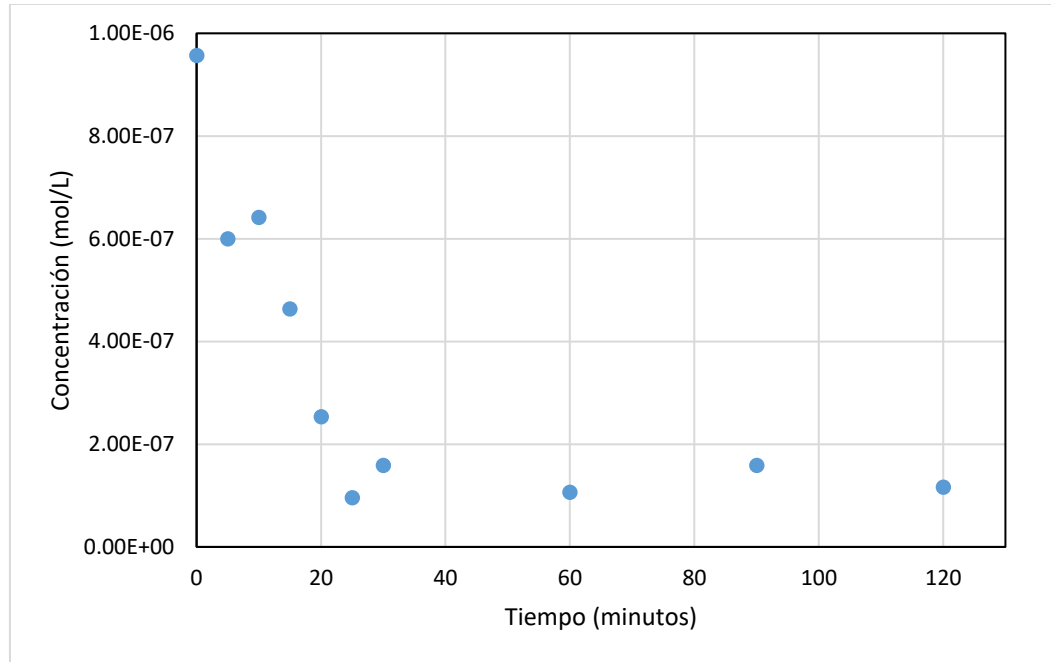
*Figura 8. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 50% c/u sobre la degradación del azul de metileno.*

En la figura 8 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,69 \times 10^{-07}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 50% cada uno.



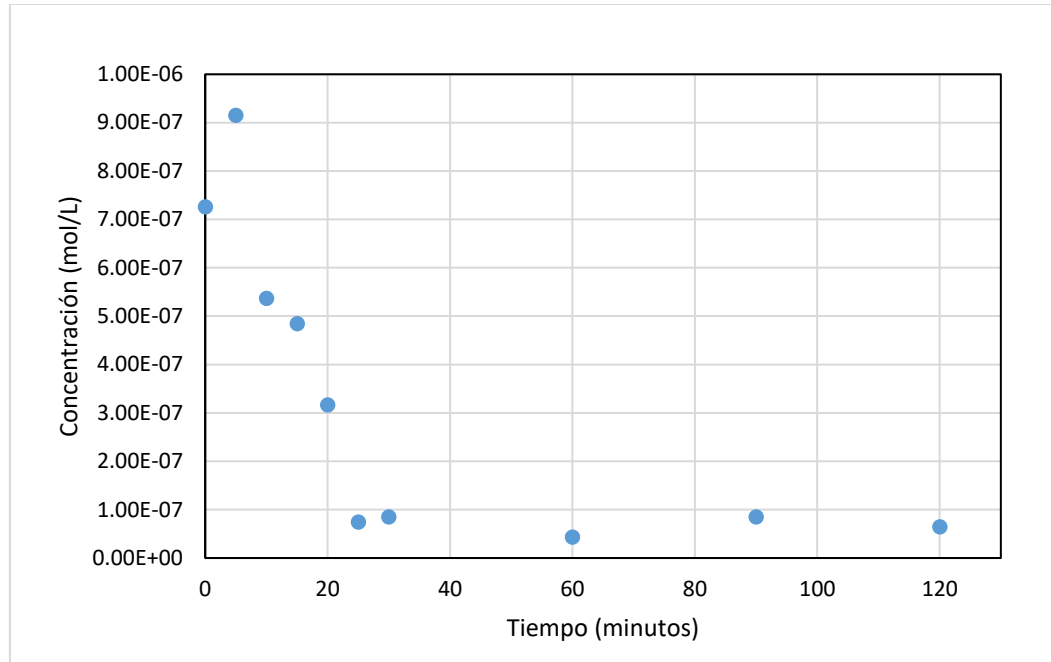
*Figura 9. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 75% y 25% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno.*

En la figura 9 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 60 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,48 \times 10^{-7}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 75% y 25% respectivamente.



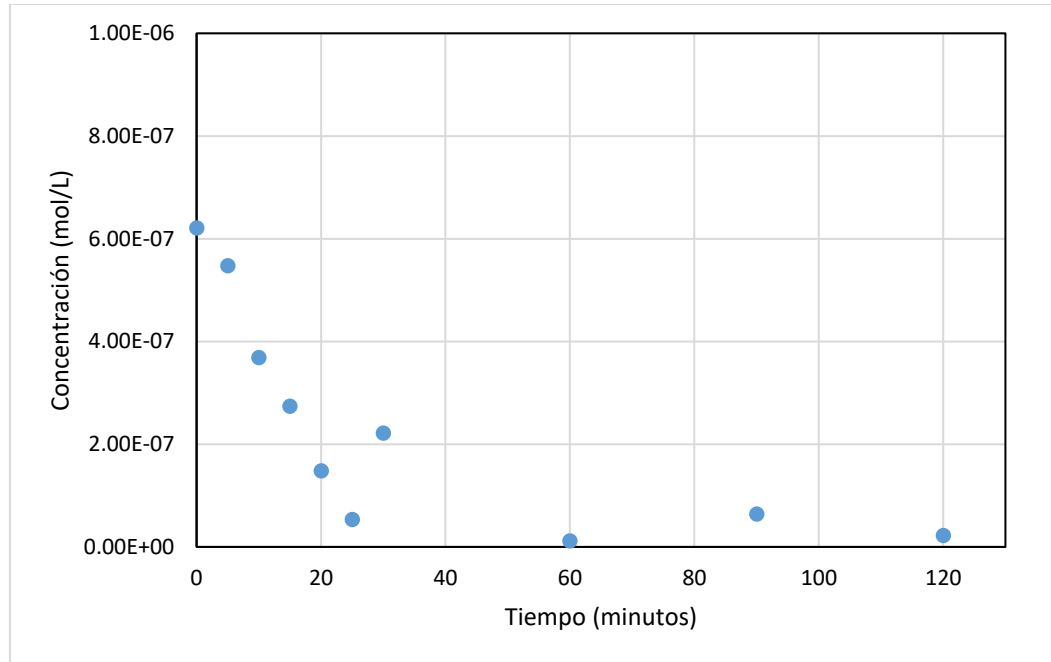
*Figura 10. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 95% y 5% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno.*

En la figura 10 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 60 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,06 \times 10^{-07}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 95% y 5% respectivamente.



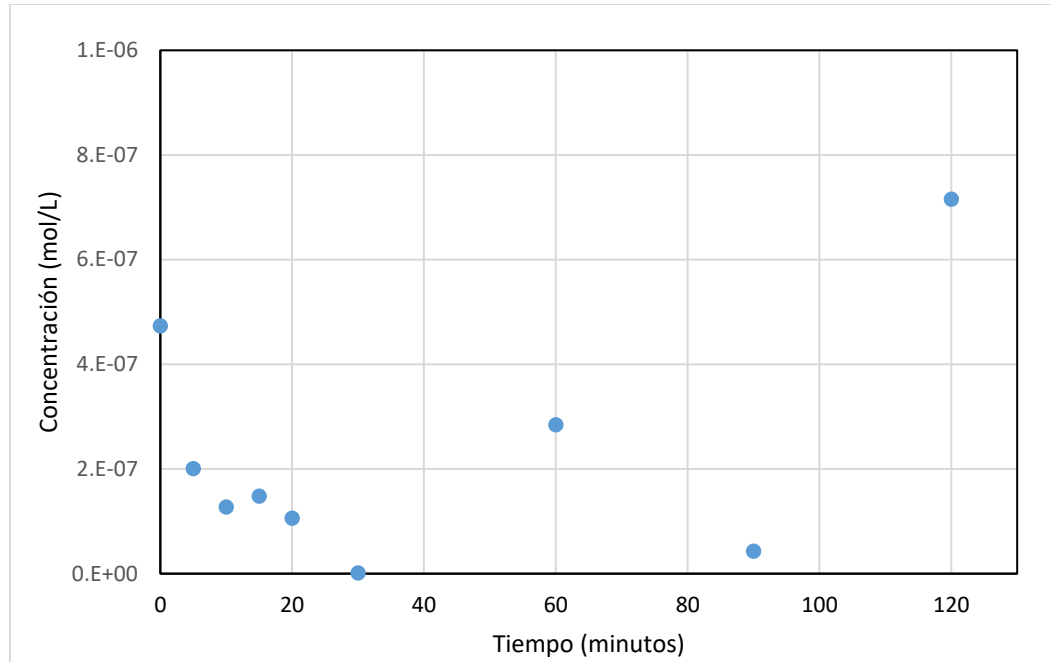
*Figura 11. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 97% y 3% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno.*

En la figura 11 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 60 minutos del tratamiento con una concentración de  $4,31 \times 10^{-08}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 97% y 3% respectivamente.



*Figura 12. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99% y 1% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno.*

Se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 60 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,16 \times 10^{-8}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99% y 1% respectivamente.



*Figura 13. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99,5% y 0,5% respectivamente sobre la degradación del azul de metileno.*

En la figura 13 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante azul de metileno, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 30 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,05 \times 10^{-09}$  mol/L, con el catalizador de  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99,5% y 0,5 %.

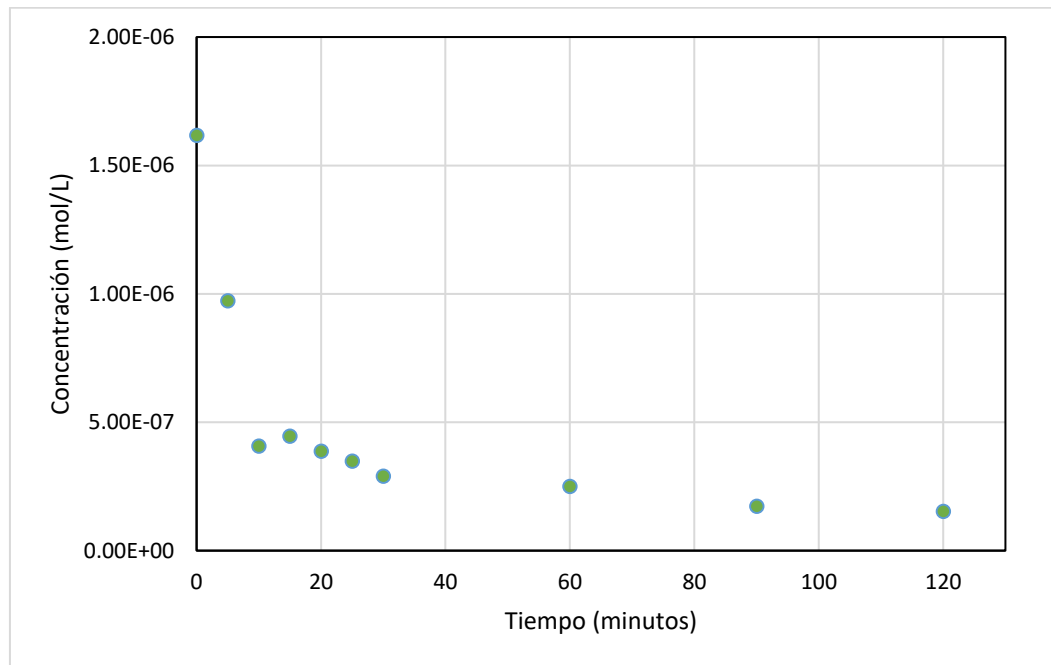
Cuando se analizan los catalizadores individualmente se observa que el catalizador  $ZnO$  tiene una mayor degradación de azul de metileno en comparación con el catalizador de  $TiO_2$  sin embargo este último tiene un mayor tiempo de acción. Sin embargo, cuando ambos se encuentran al 50% la eficiencia de degradación baja.

Por otro lado, cuando el catalizador de  $ZnO$  se encuentra al 25, 5, 3 y 1 % la mayor degradación ocurre a los 60 minutos con unas concentraciones  $1,48 \times 10^{-07}$  mol/L,  $1,06 \times 10^{-07}$  mol/L,  $4,31 \times 10^{-08}$  mol/L,  $1,16 \times 10^{-08}$  mol/L respectivamente.

Por último, en la figura 13 se observa que la mayor degradación es a los 30 minutos del tratamiento llegando a una concentración de  $1,05 \times 10^{-09}$  mol/L, con los catalizadores de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  al 99,5% y 0,5 % respectivamente, siendo este último tratamiento en el que se observó la mayor degradación de azul de metileno en comparación a los demás tratamientos.

En investigación pasadas se evidencia que al funcionalizar los catalizadores con otros compuestos logran mejorar la degradación de este colorante (Adeleke et al., 2018; Contreras-Bermúdez, 2009; Fatimah et al., 2011), sin embargo, a menor concentración de  $\text{ZnO}$  la efectividad de la remoción de azul de metileno aumenta (González Mendieta & León Moreno, 2013). Estos resultados se asemejan a lo encontrado por (Manjarres Martínez, 2019). Esto podría atribuirse al tamaño de la partícula y el uso de la lámpara UV (Ramírez-Salazar & Valero-Melo, 2021).

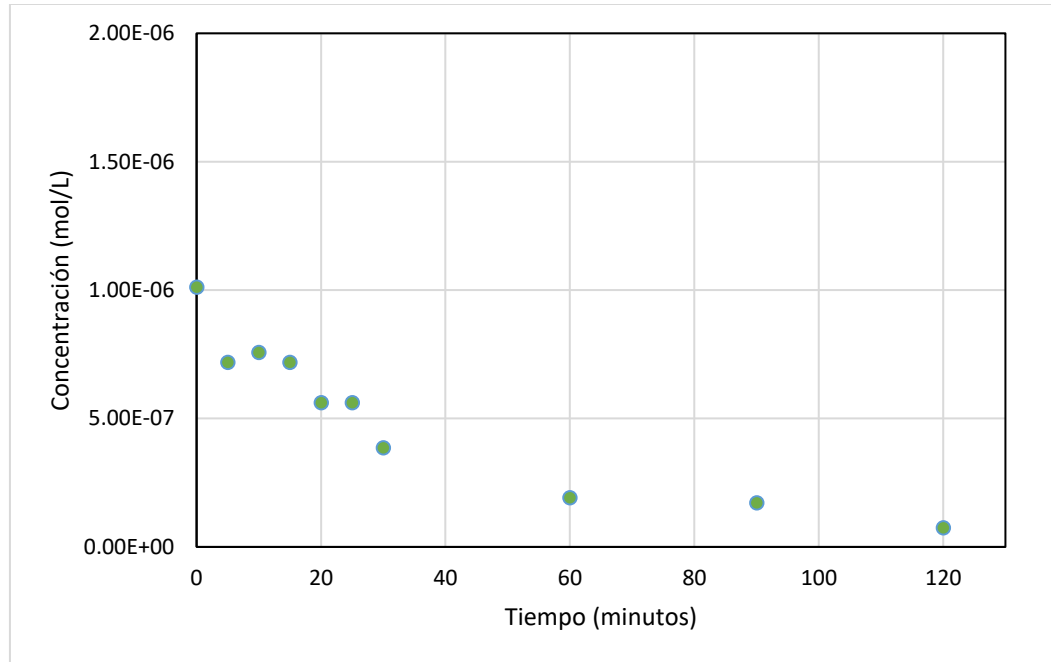
### 1.9.2. Degradación del oxalato verde de malaquita por TiO<sub>2</sub> y ZnO



*Figura 14. Influencia del TiO<sub>2</sub> al 100% sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

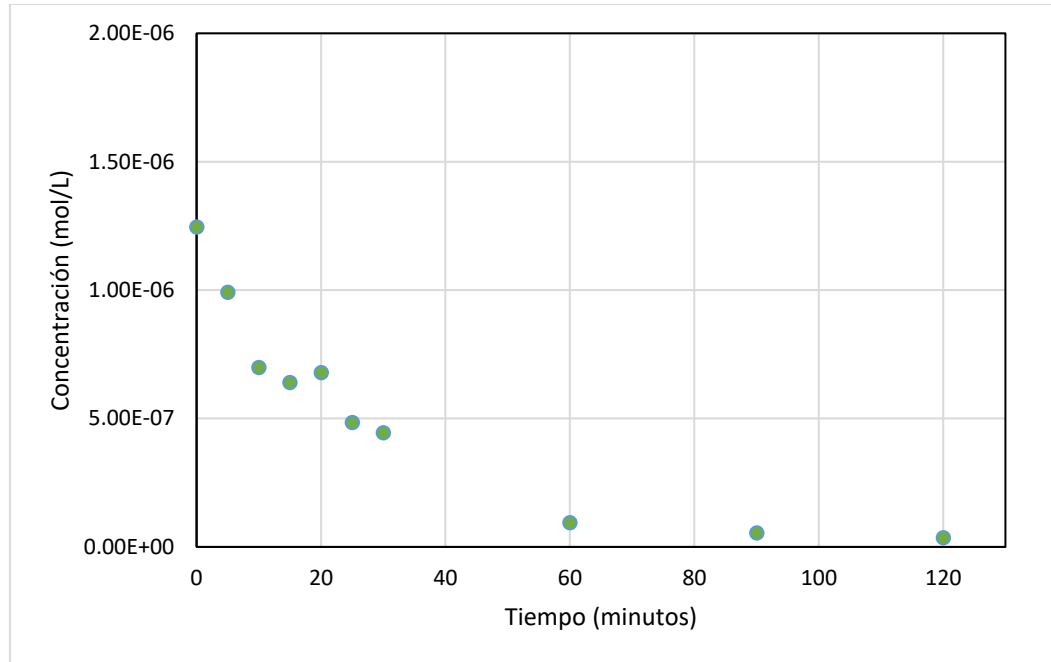
En la figura 14 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,52 \times 10^{-7}$  mol/L, con el catalizador de TiO<sub>2</sub> al 100%.





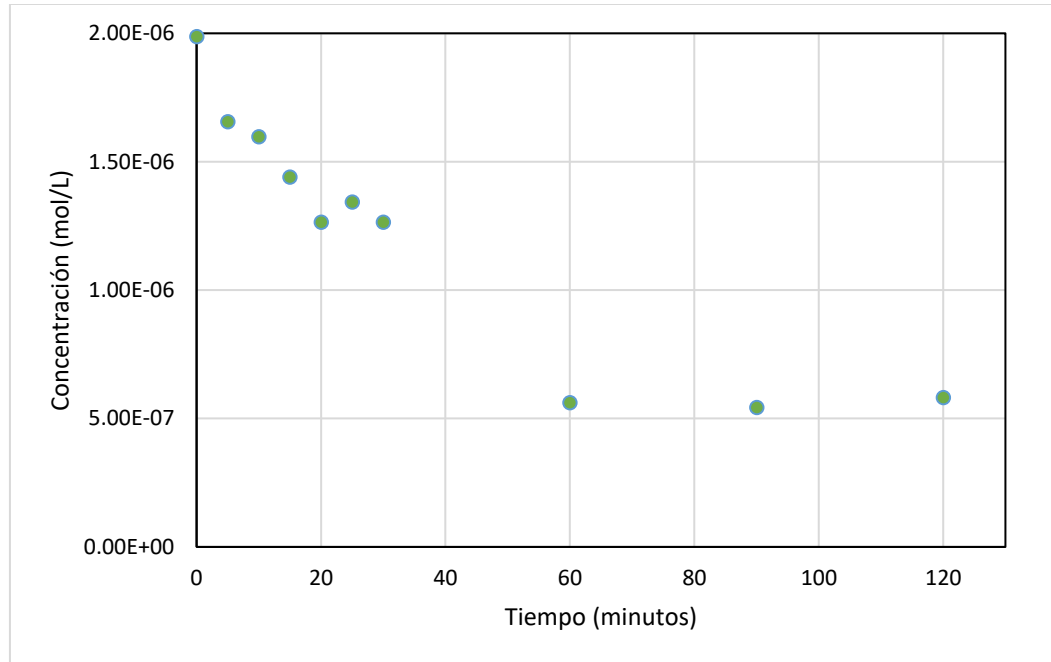
*Figura 15. Influencia del ZnO al 100% sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 15 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $7,42 \times 10^{-08}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 100%.



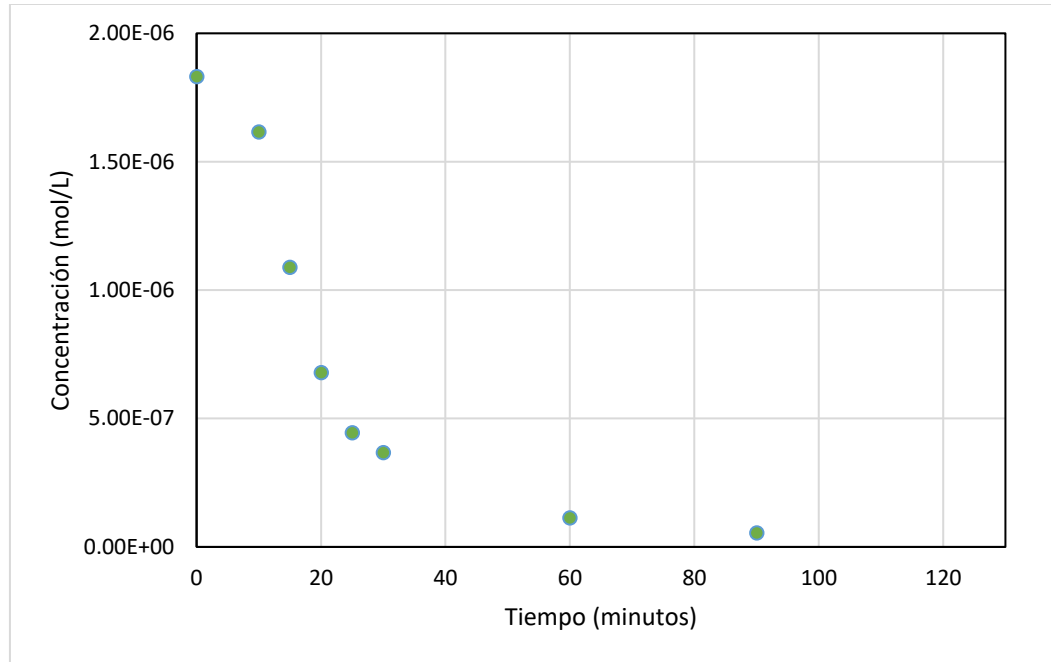
*Figura 16. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 50% c/u sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 16 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,51 \times 10^{-08}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 50% cada uno.



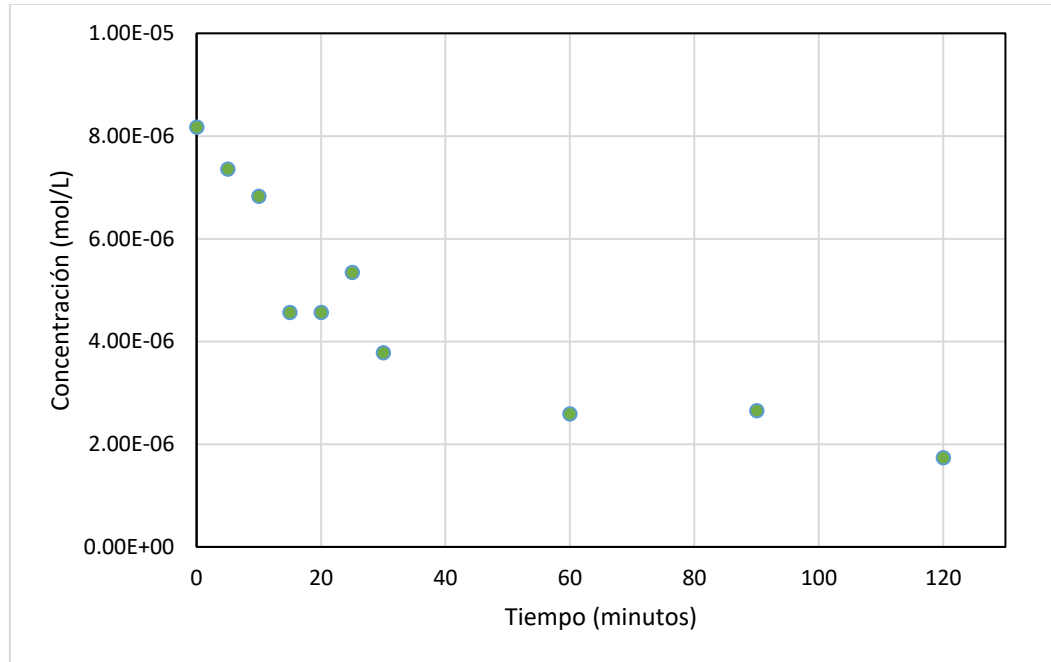
*Figura 17. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 75% y 25% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 17 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 90 minutos del tratamiento con una concentración de  $5,43 \times 10^{-06}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 75% y 25% respectivamente.



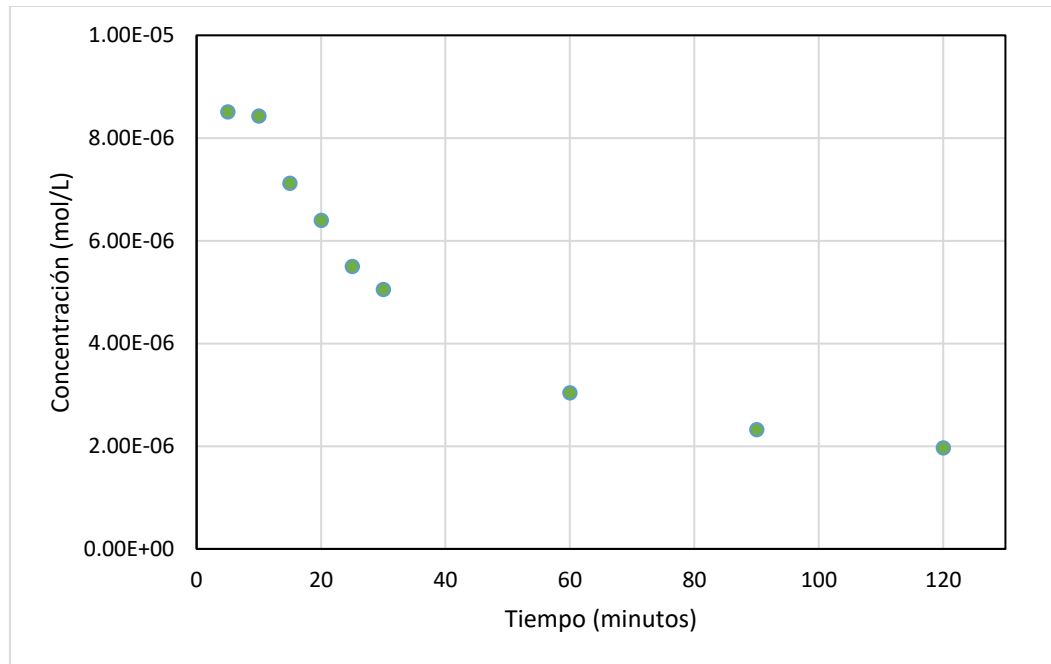
*Figura 18. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 95% y 5% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 18 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 90 minutos del tratamiento con una concentración de  $5,47 \times 10^{-08}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 95% y 5% respectivamente.



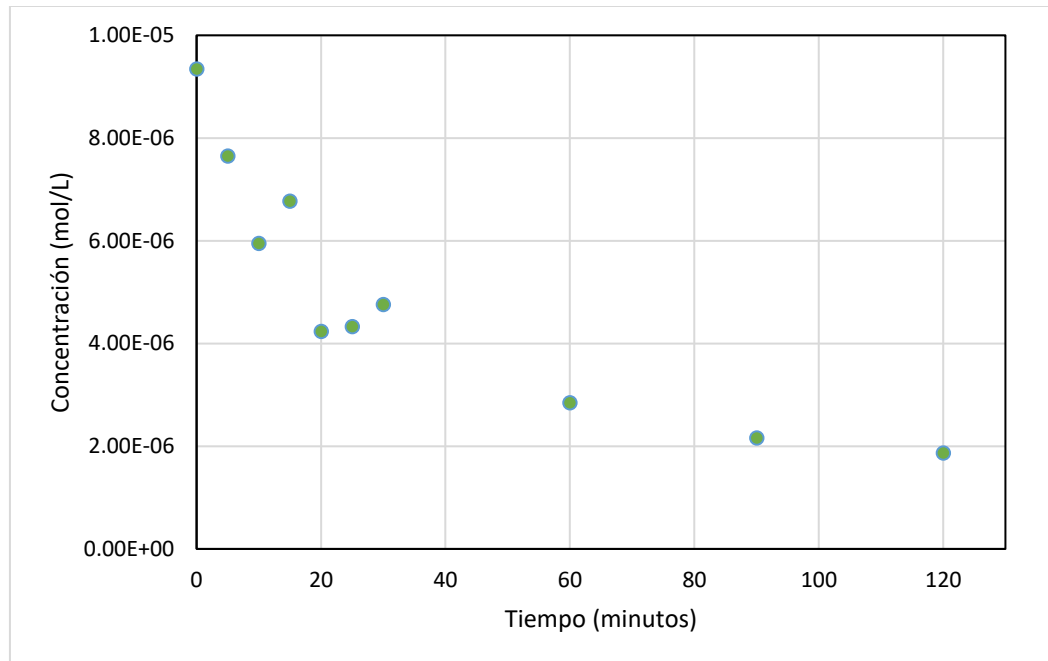
*Figura 19. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 97% y 3% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 19 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,73 \times 10^{-6}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 97% y 3% respectivamente.



*Figura 20. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99% y 1% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 20 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,97 \times 10^{-6}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99% y 1% respectivamente.



*Figura 21. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99,5% y 0,5% respectivamente sobre la degradación del oxalato verde de malaquita.*

En la figura 21 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante oxalato verde de malaquita, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,87 \times 10^{-6}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99,5% y 0,5% respectivamente.

Cuando se analizan los catalizadores por separado se observa que la mayor degradación de ambos catalizadores ocurre a los 120 minutos, sin embargo, el catalizador  $ZnO$  es más eficiente en la degradación del oxalato verde de malaquita a comparación con el catalizador de  $TiO_2$ , de igual forma cuando ambos catalizadores se encuentran al 50% la mayor degradación se observa a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,51 \times 10^{-8}$  mol/L, siendo esta combinación de catalizadores la mejor para la degradación de oxalato verde de malaquita.

Este resultado se asemeja a lo encontrado por (Kerli et al., 2021) donde la degradación del oxalato verde de malaquita se dio con la combinación ZnO y TiO<sub>2</sub>, degradando el 98,4% del colorante. Además (Zeidi et al., 2020) confirma el uso de nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub> para la degradación del oxalato verde de malaquita. Esto podría deberse

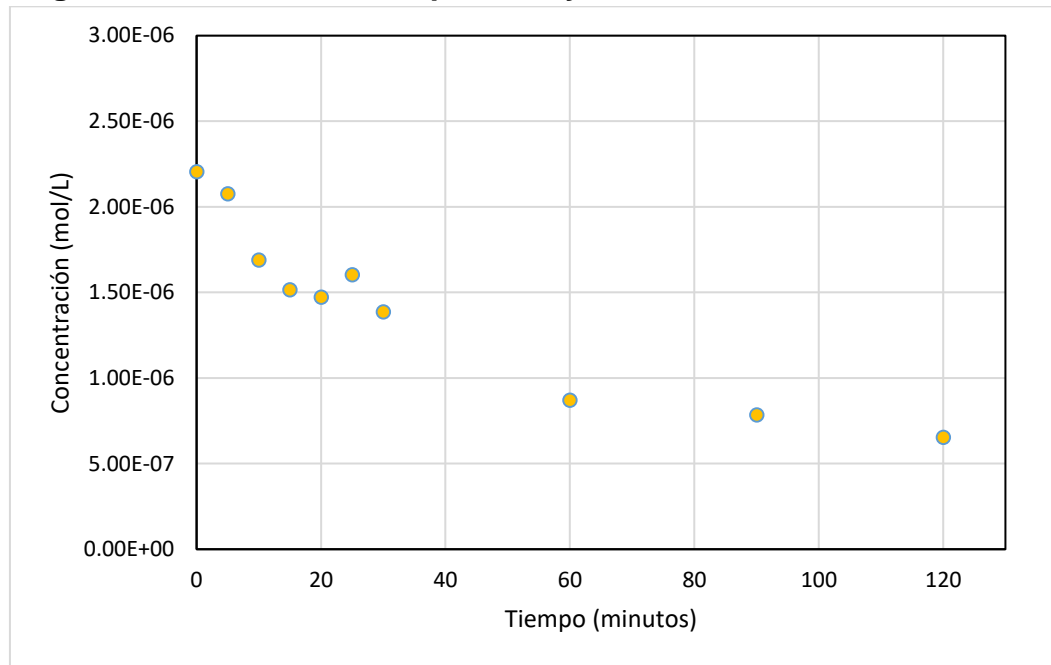
En la figura 17 se observa que con el catalizador de ZnO al 25% la mayor degradación ocurrió a los 90 minutos con una concentración de  $5,43 \times 10^{-06}$  mol/L (figura 17). En las figuras 19, 20 y 21 se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,73 \times 10^{-06}$  mol/L,  $1,97 \times 10^{-06}$  mol/L y  $1,87 \times 10^{-06}$  mol/L respectivamente, con el catalizador de ZnO al 3%, 1% y 0,5%.

Por otro lado, en la figura 18 se observa la mayor degradación a los 90 minutos del tratamiento con una concentración de  $5,47 \times 10^{-08}$  mol/L, con los catalizadores de TiO<sub>2</sub> y ZnO al 95% y 5% respectivamente.

En distintas investigaciones cuando el catalizador de TiO<sub>2</sub> esta soportado en arcilla se obtiene una mayor degradación en menor tiempo (Ladino Moreno & Trejos Cadavid, 2017), igual para el catalizador de ZnO dopado con quitosano mostro una mejora del 87%(Saad et al., 2020).

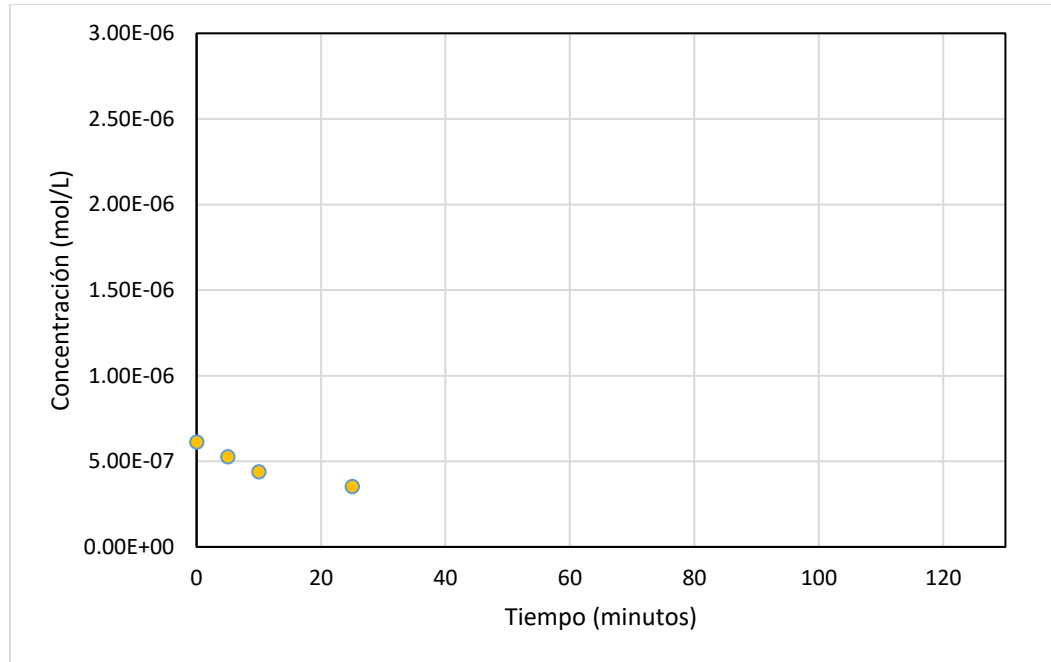


### 1.9.3. Degradación del Tartrazina por TiO<sub>2</sub> y ZnO



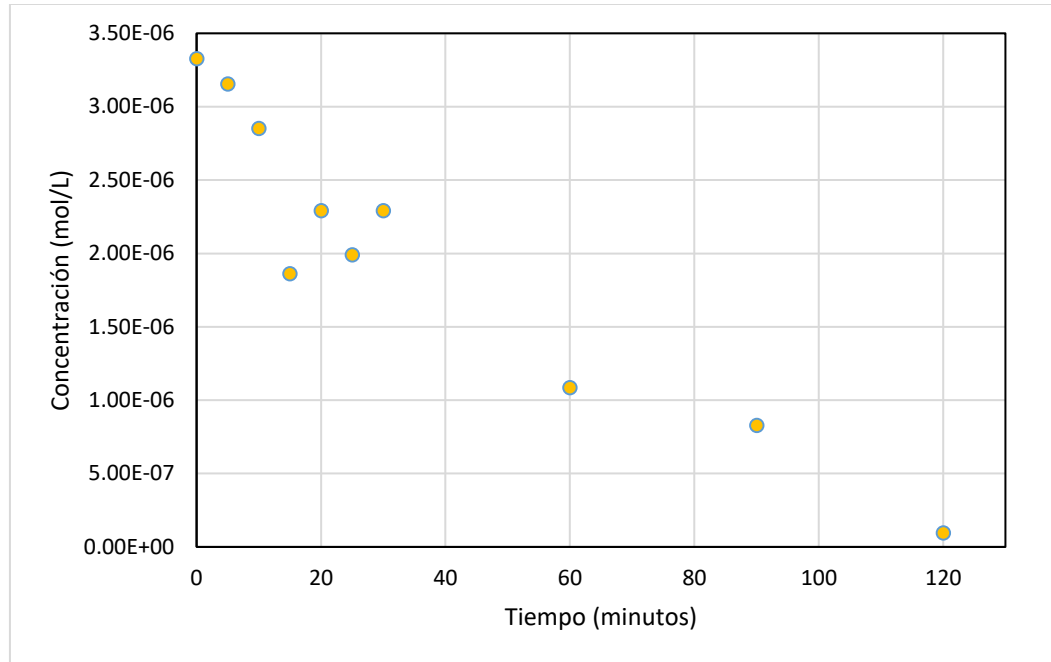
*Figura 22. Influencia del ZnO al 100% sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 22 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $6,55 \times 10^{-07}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 100%.



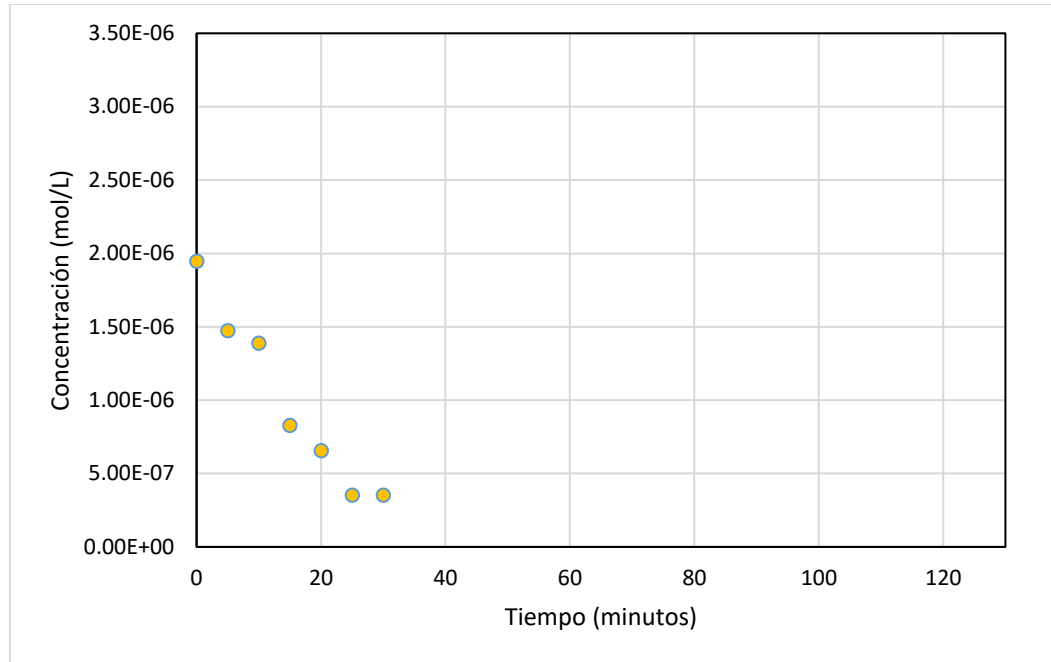
*Figura 23. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 50% c/u sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 23 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, sin embargo, en la figura solo se observa datos hasta los 25 minutos debido a que pasado ese tiempo no se detectó degradación. Se observa una mayor degradación a los 25 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,53 \times 10^{-07}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 50% cada uno.



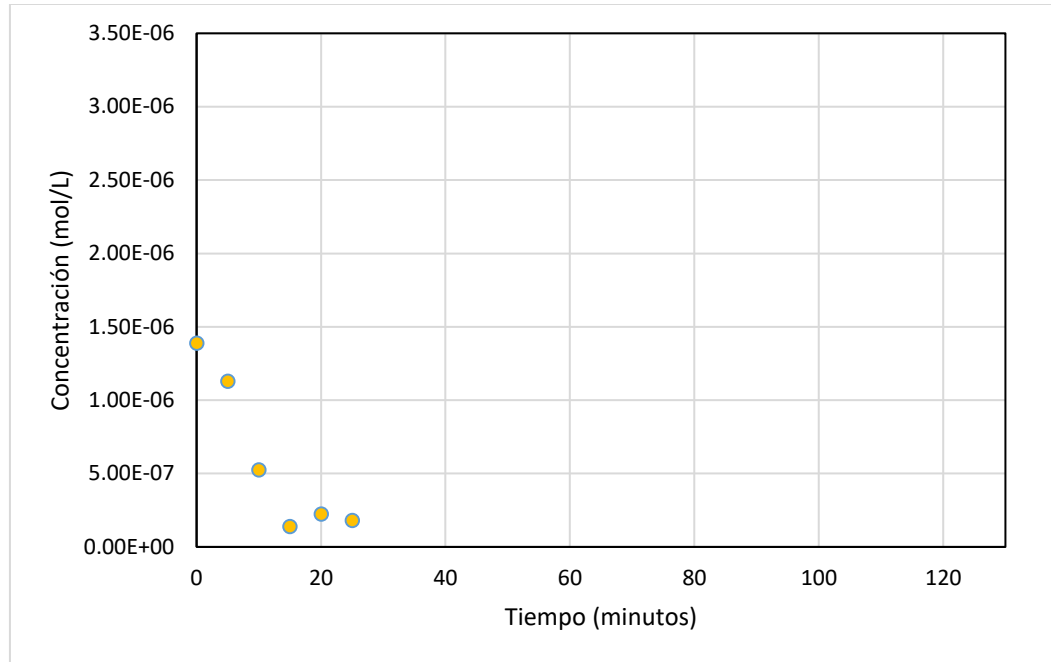
*Figura 24. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 75% y 25% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 24 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, donde se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $9,48 \times 10^{-08}$  mol/L



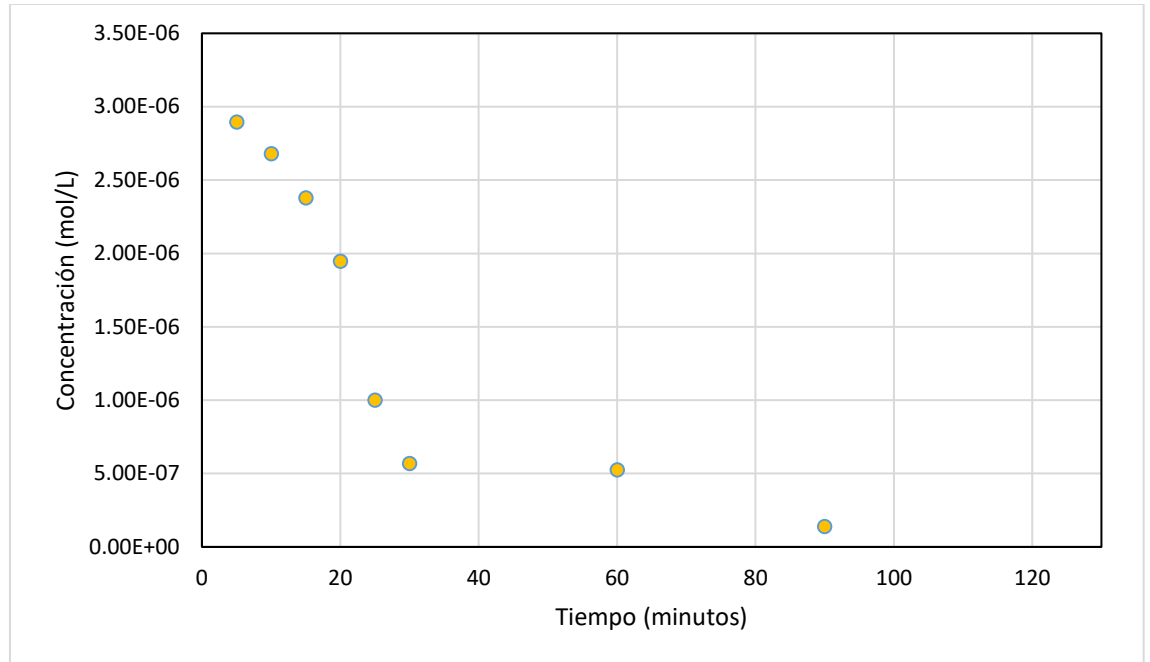
*Figura 25. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 95% y 5% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 25 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, sin embargo, en la figura solo se observa datos hasta los 30 minutos debido a que pasado ese tiempo no se detectó degradación. Se observa la mayor degradación a los 25 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,53 \times 10^{-07}$  mol/L con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 95% y 5% respectivamente.



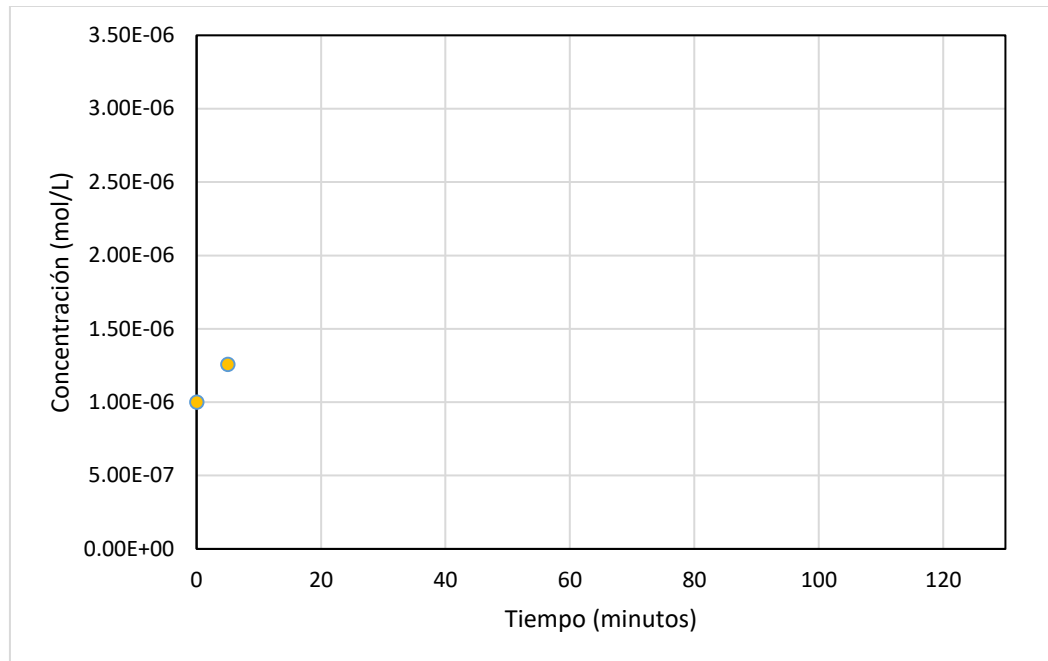
*Figura 26. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 97% y 3% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 26 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, sin embargo, en la figura solo se observa datos hasta los 25 minutos debido a que pasado ese tiempo no se detectó degradación. Se observa la mayor degradación es a los 15 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,38 \times 10^{-7}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 97% y 3% respectivamente.



*Figura 27. Influencia de los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99% y 1% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 27 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, sin embargo, en la figura solo se observa datos hasta los 90 minutos debido a que pasado ese tiempo no se detectó degradación. Se observa la mayor degradación a los 90 minutos con una concentración de  $1,38 \times 10^{-07}$  mol/L, con los catalizadores  $TiO_2$  y  $ZnO$  al 99% y 1% respectivamente.



*Figura 28. Influencia de los catalizadores TiO<sub>2</sub> y ZnO al 99,5% y 0,5% respectivamente sobre la degradación de la tartrazina.*

En la figura 28 se comprobó la influencia de la concentración del catalizador en la degradación del colorante tartrazina, en intervalos de 0 a 2 horas, sin embargo, en la figura solo se observa datos hasta los 10 minutos debido a que pasado ese tiempo no se detectó degradación. Se observa la mayor degradación a los 0 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,00 \times 10^{-06}$  mol/L, con los catalizadores TiO<sub>2</sub> y ZnO al 99,5% y 0,5% respectivamente.

Con el catalizador de TiO<sub>2</sub> al 100% no se detectó degradación esto difiere a lo encontrado por (Morales et al., 2013) donde si hubo degradación del colorante de tartrazina, y al usar el catalizar de ZnO al 100% se obtiene una mayor degradación a los 120 minutos con una concentración de  $6,55 \times 10^{-07}$  mol/L, como se observa en la figura 22 esto se asemeja a lo encontrado por (Assi et al., 2017) donde su tiempo de mayor degradación también fue de 120 minutos. Mientras que con los catalizadores de TiO<sub>2</sub> y

ZnO al 50% c/u se observa una mayor degradación a los 25 minutos con una concentración de  $3,53 \times 10^{-07}$  mol/L (figura 23).

Por otro lado en la figura 25 se observa la mayor degradación a las 30 minutos del tratamiento con una concentración de  $3,53 \times 10^{-07}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 5%, en la figura 26 la mayor degradación es a los 25 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,81 \times 10^{-07}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 3%, en la figura 27 aumenta el tiempo donde se encuentra la mayor degradación a los 90 minutos con una concentración de  $1,38 \times 10^{-07}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 1% y por último en la figura 28 se observa la mayor degradación a los 0 minutos del tratamiento con una concentración de  $1,00 \times 10^{-06}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 0,5%.

En la figura 24 se observa la mayor degradación a los 120 minutos del tratamiento con una concentración de  $9,48 \times 10^{-08}$  mol/L, con el catalizador de ZnO al 25% siendo este el mejor tratamiento para la degradación de tartrazina, esta degradación alta en relación 3:1 de TiO<sub>2</sub> y ZnO se podría explicar por la acción simultanea de tres factores diferentes: mayor cantidad de superficie de catalizadores iluminados, mejor contacto entre los dos óxidos semiconductores y, por lo tanto, una carga efectiva separación de los portadores de carga fotogenerados bajo excitación ligera (Siuleiman et al., 2014).



## V. CONCLUSIONES

La presente investigación llegó a las siguientes conclusiones:

- Se sintetizó de manera satisfactoria el fotocatalizador de ZnO, comprobándose en la caracterización hecha por difracción de rayos x y espectrometría infrarroja con transformada de Fourier.
- Se determinó que la mejor combinación de los catalizadores para degradar el azul de metileno fue de TiO<sub>2</sub> al 99,5% y ZnO al 0,5% obteniendo la mayor degradación de todos los tratamientos con una concentración de  $1,05 \times 10^{-09}$  mol/L.
- Se determinó que la mejor combinación de los catalizadores para degradar el oxalato verde de malaquita fue de TiO<sub>2</sub> al 50% y ZnO al 50% obteniendo la mayor degradación de todos los tratamientos con una concentración de  $3,51 \times 10^{-08}$  mol/L.
- Se determinó que la mejor combinación de los catalizadores para degradar la tartrazina fue de TiO<sub>2</sub> al 75% y ZnO al 25% obteniendo la mayor degradación de todos los tratamientos con una concentración de  $9,48 \times 10^{-08}$  mol/L.
- El total de cargas contaminadas encontradas fueron superiores durante el proceso de oxidación foto catalítica, el tratamiento disminuyó la carga de contaminantes al ensayar sobre aguas bio-contaminadas, demostrando con grandes resultados una gran técnica para mejorar las condiciones de aguas residuales

## VI. RECOMENDACIONES

La presente investigación tiene las siguientes recomendaciones:

- Se deberían probar procesos de oxidación fotocatalítica con mezclas de  $\text{TiO}_2$  y/o  $\text{ZnO}$  en otros contaminantes orgánicos como grasas, pesticidas, etc. Esto con la finalidad de probar la efectividad del proceso en la degradación de otros tipos de contaminantes.
- Es de importancia incluir análisis de carbono orgánico e inorgánico, al final de la pruebas de fotocátalisis para detectar si el contaminante ha sido completamente mineralizado o todavía permanecen compuesto orgánicos que podrían ser más peligrosos que los colorantes.
- Se debe evaluar otros fotocatalizadores para que el tratamiento con  $\text{TiO}_2$  mejore, aplicado en aguas contaminadas y sus efectos degradadores en cada uno de ellos
- Realizar más pruebas con agua residual real para verificar el potencial de fotocátalisis y renovación de los colorantes.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelrahman, E. A. (2018). Synthesis of zeolite nanostructures from waste aluminum cans for efficient removal of malachite green dye from aqueous media. *Journal of Molecular Liquids*, 253, 72–82. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2018.01.038>
- Abdelsamad, A. M. A., Gad-Allah, T. A., Mahmoud, F. A., & Badawy, M. I. (2018). Enhanced photocatalytic degradation of textile wastewater using Ag/ZnO thin films. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.07.002>
- Abdulmajeed, B. A., Hamadullah, S., & Allawi, F. A. (2019). Synthesis and Characterization of Titanium Dioxide Nanoparticles under Different pH Conditions. *Journal of Engineering*, 25(1), 40–50. <https://doi.org/10.31026/J.ENG.2019.01.04>
- Adeleke, J. T., Theivasanthi, T., Thirupathi, M., Swaminathan, M., Akomolafe, T., & Alabi, A. B. (2018). Photocatalytic degradation of methylene blue by ZnO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Applied Surface Science*, 455, 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.184>
- Alfaro Cruz, M. R., Ceballos-Sanchez, O., Luévano-Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2018). ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering: Effects of the annealing and atmosphere conditions on the photocatalytic hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10301–10310. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.054>
- Altintas Yildirim, O., Arslan, H., & Sönmezoğlu, S. (2016). Facile synthesis of cobalt-doped zinc oxide thin films for highly efficient visible light photocatalysts. *Applied Surface Science*, 390, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.069>
- Aoudjit, L., Zioui, D., Touahra, F., Mahidine, S., & Bachari, K. (2021). Photocatalytic Degradation of Tartrazine Dyes Using TiO<sub>2</sub>-Chitosan Beads under Sun Light Irradiation. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 95(5), 1069–1076. <https://doi.org/10.1134/S0036024421050034>
- Aprilia, A., Fernando, H., Bahtiar, A., Safriani, L., & Hidayat, R. (2018). Influences of Al dopant atoms to the structure and morphology of Al doped ZnO nanorod thin film.

- Journal of Physics: Conference Series*, 1080, 012009.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1080/1/012009>
- Aquino Granados, P. A. (2016). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de zinc obtenidas por el método de precipitación para su aplicación en pintura esmalte comercial*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Assi, N., Aberoomand Azar, P., Saber Tehrani, M., Waqif Husain, S., Darwish, M., & Pourmand, S. (2017). Synthesis of ZnO-nanoparticles by microwave assisted sol-gel method and its role in photocatalytic degradation of food dye Tartrazine (Acid Yellow 23). *International Journal of Nano Dimension*, 8(3), 241–249.
- Baseri, H., & Alizadeh, E. (2018). Photocatalytic degradation of Malachite Green using ZnO and ZnOTiO<sub>2</sub> nanoparticles from aqueous solution. *Journal of Nanoanalysis*, 5(4), 232–240. <https://doi.org/10.22034/JNA.2018.545578>
- Bhatt, D., Vyas, K., Singh, S., John, P. J., & Soni, I. (2018). Tartrazine induced neurobiochemical alterations in rat brain sub-regions. *Food and Chemical Toxicology*, 113, 322–327. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2018.02.011>
- Brañez Sánchez, M. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. *Campus*, 23(26), 129–143. <https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n26.03>
- Byrne, C., Subramanian, G., & Pillai, S. C. (2018). Recent advances in photocatalysis for environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(3), 3531–3555. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.080>
- Chen, D., Cheng, Y., Zhou, N., Chen, P., Wang, Y., Li, K., Huo, S., Cheng, P., Peng, P., Zhang, R., Wang, L., Liu, H., Liu, Y., & Ruan, R. (2020). Photocatalytic degradation of organic pollutants using TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts: A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 121725. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121725>
- Chen, L., Zhu, Y., Cui, Y., Dai, R., Shan, Z., & Chen, H. (2021). Fabrication of starch-based high-performance adsorptive hydrogels using a novel effective pretreatment and adsorption for cationic methylene blue dye: Behavior and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126953. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126953>

- Chia, M. Y., Chiu, W. S., Hasnan, N. H. M., Khiew, P. S., & Hamid, M. A. A. (2017). Hydrothermal growth of 1D ZnO nanorods thin films for hydrogen gas production through water splitting reaction. *Solid State Phenomena*, 264 SSP, 95–98. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.264.95>
- Contreras-Bermúdez, R. E. (2009). Degradación fotocatalítica de azul de metileno en aguas residuales utilizando TiO<sub>2</sub> como catalizador. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(2), 86–91.
- Cordova Paz, C. H. (2017). *Evaluación de la resistencia a la corrosión en probetas de acero estructural a36 recubiertas de pintura con Nanopartículas de óxido de zinc*. Pontificie Universidad Católica del Perú.
- Cruz-Ortiz, B. R., Díaz-Jiménez, L., Cortés-Hernández, D. A., & Múzquiz-Ramos, E. M. (2017). Catalizadores de TiO<sub>2</sub> utilizados en procesos claus: Causas de desactivación y actividad catalítica. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 16(1), 229–236.
- Danish, M., Ahmad, T., Nadhari, W. N. A. W., Ahmad, M., Khanday, W. A., Ziyang, L., & Pin, Z. (2018). Optimization of banana trunk-activated carbon production for methylene blue-contaminated water treatment. *Applied Water Science*, 8(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0644-7>
- Dulta, K., Koşarsoy Ağçeli, G., Chauhan, P., Jasrotia, R., & Chauhan, P. K. (2020). A Novel Approach of Synthesis Zinc Oxide Nanoparticles by *Bergenia ciliata* Rhizome Extract: Antibacterial and Anticancer Potential. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials 2020 31:1*, 31(1), 180–190. <https://doi.org/10.1007/S10904-020-01684-6>
- Estrada Urbina, J. (2018). *Influencia de las nanoparticulas de oxido de zinc sobre la calidad fisiologica y sanitaria de la semilla de maiz nativo (Zea mays L.)*. Universidad Autónoma de Guerrero.
- Fatimah, I., Wang, S., & Wulandari, D. (2011). ZnO/montmorillonite for photocatalytic and photochemical degradation of methylene blue. *Applied Clay Science*, 53(4), 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.001>

- Gallen, C., & Pla, J. (2013). Allergie et intolérance aux additifs alimentaires. *Revue Française d'Allergologie*, 53(S1), 9–18. [https://doi.org/10.1016/S1877-0320\(13\)70044-7](https://doi.org/10.1016/S1877-0320(13)70044-7)
- Ge, J., Zhang, Y., & Park, S. (2019). Avances recientes en fotocatalizadores carbonosos con rendimientos fotocatalíticos mejorados: una mini revisión. *Mdpi.Com*.
- González Mendieta, F. G., & León Moreno, J. P. (2013). *Reducción de cr (vi) a cr (iii) por fotocatalisis en presencia de zno y radiación solar*.
- Hussin, R., Seng, G. H., Zulkiflee, N. S., Harun, Z., Hatta, M. N. M., & Yunos, M. Z. (2019). ZnO/TiO<sub>2</sub> thin films for photocatalytic application. *AIP Conference Proceedings*, 2068(1), 020096. <https://doi.org/10.1063/1.5089395>
- Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Soegianto, A., & Wahyudianto, F. E. (2019). Phytoremediation of methylene blue using duckweed (*Lemna minor*). *Heliyon*, 5(8), e02206. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E02206>
- Jayachandran, A., T.R., A., & Nair, A. S. (2021). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Cayratia pedata* leaf extract. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 26, 100995. <https://doi.org/10.1016/J.BBREP.2021.100995>
- Kerli, S., Kavgacı, M., Soğuksu, A. K., & Avar, B. (2021). Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, Rhodamine-B, and Malachite Green by Ag @ ZnO/TiO<sub>2</sub>. *Brazilian Journal of Physics* 2021 52:1, 52(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S13538-021-01007-1>
- Khan, M. M., Adil, S. F., & Al-Mayouf, A. (2015). Metal oxides as photocatalysts. *Journal of Saudi Chemical Society*, 19(5), 462–464. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2015.04.003>
- Lade, H., Kadam, A., Paul, D., & Govindwar, S. (2015). Biodegradation and detoxification of textile azo dyes by bacterial consortium under sequential microaerophilic/aerobic processes. *EXCLI Journal*, 14, 158–174. <https://doi.org/10.17179/excli2014-642>
- Ladino Moreno, C. D., & Trejos Cadavid, E. (2017). *Degradación fotocatalítica de verde de malaquita mediante dióxido de titanio soportado en arcilla*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

- Leulescu, M., Rotaru, A., Pălărie, I., Moanță, A., Cioateră, N., Popescu, M., Morîntale, E., Bubulică, M. V., Florian, G., Hărăbor, A., & Rotaru, P. (2018). Tartrazine: physical, thermal and biophysical properties of the most widely employed synthetic yellow food-colouring azo dye. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2018 134:1, 134(1), 209–231. <https://doi.org/10.1007/S10973-018-7663-3>
- Liza Castillo, D. C. (2019). *Efecto del dopaje con cobalto o plata en las propiedades estructurales, ópticas y fotocatalíticas de nanopartículas de titanato de zinc y óxido de zinc*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Llop, A. (2018). *Economía del agua y su ambiente*.
- Lou, T., Cui, G., Xun, J., Wang, X., Feng, N., & Zhang, J. (2018). Synthesis of a terpolymer based on chitosan and lignin as an effective flocculant for dye removal. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 537, 149–154. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2017.10.012>
- Manjarres Martínez, J. D. (2019). *Evaluación de la actividad fotocatalítica de la mezcla  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  en la remoción de azul de metileno*. Fundación Universidad de América.
- Mohamed, A., Ghobara, M. M., Abdelmaksoud, M. K., & Mohamed, G. G. (2019). A novel and highly efficient photocatalytic degradation of malachite green dye via surface modified polyacrylonitrile nanofibers/biogenic silica composite nanofibers. *Separation and Purification Technology*, 210, 935–942. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2018.09.014>
- Mohite, S. V., Ganbavle, V. V., & Rajpure, K. Y. (2017). Photoelectrocatalytic activity of immobilized Yb doped  $\text{WO}_3$  photocatalyst for degradation of methyl orange dye. *Journal of Energy Chemistry*, 26(3), 440–447. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.01.001>
- Montiel-Juárez, L., Rojas-López, M., Martínez-Ayala, A. L., Orduña-Díaz, A., Gayou, V. L., Delgado-Macuil, R., Zaca-Moran, O., & Zaca-Moran, P. (2015). ANALISIS FTIR DE LA INCORPORACIÓN DE NANOESTRUCTURAS DE  $\text{TiO}_2$  EN PELICULAS DE PROTEÍNA DE *Jatropha curcas* L. *XII Encuentro Participacion de La Mujer En La Ciencia*, 5.

- Morales, G. V., Sham, E. L., Cornejo, R., Morales, P. J., & Torres, M. F. (2013). *Degradación fotocatalítica de tartrazina: influencia de parámetros significativos del proceso*. Universidad de Salta.
- Mosquera, E., Rosas, N., Debut, A., & Guerrero, V. H. (2015). Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Dióxido de Titanio Obtenidas por el Método de Sol-Gel. *Revista Politecnica*, 36.
- Munirah, S., Rani, R. A., Asib, N. A. M., Robaiah, M., Khusaimi, Z., Abdullah, S., Hamzah, F., Alrokayan, S., Khan, H., & Rusop, M. (2018). A study on the atomic topography of nanostructured TiO<sub>2</sub> thin films: Effect of annealing. *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings, ICSE, 2018-Augus*, 160–163. <https://doi.org/10.1109/SMELEC.2018.8481326>
- Narayanan, N., & Deepak, N. K. (2018a). Realizing luminescent downshifting in ZnO thin films by Ce doping with enhancement of photocatalytic activity. *Solid State Sciences*, 78, 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2018.02.017>
- Narayanan, N., & Deepak, N. K. (2018b). Amelioration of photocatalytic activity of ZnO thin films by Er doping. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(10), 8774–8784. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8894-6>
- Pedaneekar, R. S., Shaikh, S. K., & Rajpure, K. Y. (2020). Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review. *Current Applied Physics*, 20(8), 931–952. <https://doi.org/10.1016/J.CAP.2020.04.006>
- Pelegrí, J. L. (2020). *Planeta océano: el corazón líquido que nos mantiene vivos*.
- Ramírez-Salazar, Y., & Valero-Melo, L. (2021). *Combinación de ozono y nanopartículas magnéticas verdes para la degradación de azul de metileno en agua residual sintética textil*. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/26635>
- Raval, N. P., Shah, P. U., & Shah, N. K. (2016). Malachite green “a cationic dye” and its removal from aqueous solution by adsorption. *Applied Water Science* 2016 7:7, 7(7), 3407–3445. <https://doi.org/10.1007/S13201-016-0512-2>
- Rueda-Marquez, J. J., Levchuk, I., Fernández Ibañez, P., & Sillanpää, M. (2020). A critical review on application of photocatalysis for toxicity reduction of real



- wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120694.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120694>
- Saad, A. M., Abukhadra, M. R., Abdel-Kader Ahmed, S., Elzanaty, A. M., Mady, A. H., Betiha, M. A., Shim, J.-J., & Rabie, A. M. (2020). Photocatalytic degradation of malachite green dye using chitosan supported ZnO and Ce–ZnO nano-flowers under visible light. *Journal of Environmental Management*, 258, 110043.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110043>
- Sahnoun, S., Boutahala, M., Tiar, C., & Kahoul, A. (2018). Adsorption of tartrazine from an aqueous solution by octadecyltrimethylammonium bromide-modified bentonite: Kinetics and isotherm modeling. *Comptes Rendus Chimie*, 21(3–4), 391–398.  
<https://doi.org/10.1016/J.CRCI.2018.01.008>
- Sahu, S., Pahi, S., Tripathy, S., Singh, S. K., Behera, A., Sahu, U. K., & Patel, R. K. (2020). Adsorption of methylene blue on chemically modified lychee seed biochar: Dynamic, equilibrium, and thermodynamic study. *Journal of Molecular Liquids*, 315, 113743. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2020.113743>
- Salama, A. (2017). New sustainable hybrid material as adsorbent for dye removal from aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 487, 348–353.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2016.10.034>
- Sarkar, S., Ponce, N. T., Banerjee, A., Bandopadhyay, R., Rajendran, S., & Lichtfouse, E. (2020). Green polymeric nanomaterials for the photocatalytic degradation of dyes: a review. *Environmental Chemistry Letters* 2020 18:5, 18(5), 1569–1580.  
<https://doi.org/10.1007/S10311-020-01021-W>
- Selim, Y. A., Azb, M. A., Ragab, I., & H. M. Abd El-Azim, M. (2020). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Deverra tortuosa* and their Cytotoxic Activities. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–9.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60541-1>
- Siuleiman, S., Kaneva, N., Bojinova, A., Papazova, K., Apostolov, A., & Dimitrov, D. (2014). Photodegradation of Orange II by ZnO and TiO<sub>2</sub> powders and nanowire ZnO and ZnO/TiO<sub>2</sub> thin films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 460, 408–413.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.010>

- Sohn, J. R., & Shin, D. C. (2008). Environmentally friendly solid acid catalyst prepared by modifying TiO<sub>2</sub> with cerium sulfate for the removal of volatile organic chemicals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 77(3–4), 386–394. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2007.08.015>
- Sriram, G., Uthappa, U. T., Kigga, M., Jung, H.-Y., Altalhi, T., Brahmkhatri, V., & Kurkuri, M. D. (2019). Xerogel activated diatoms as an effective hybrid adsorbent for the efficient removal of malachite green. *New Journal of Chemistry*, 43(9), 3810–3820. <https://doi.org/10.1039/C9NJ00015A>
- Tiron, V., Velicu, I.-L., Stanescu, D., Magnan, H., & Sirghi, L. (2017). High visible light photocatalytic activity of nitrogen-doped ZnO thin films deposited by HiPIMS. *Surface and Coatings Technology*, 324, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.087>
- Turriago, J., & Gutierrez, A. (2011). *Evaluación de la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos presentes en aguas de lavado de cartuchos de impresión por medio de TiO<sub>2</sub> soportado en carbón activado*. Universidad de los Andes.
- Uthappa, U. T., Sriram, G., Arvind, O. R., Kumar, S., Ho-Young-Jung, Neelgund, G. M., Losic, D., & Kurkuri, M. D. (2020). Engineering MIL-100(Fe) on 3D porous natural diatoms as a versatile high performing platform for controlled isoniazid drug release, Fenton's catalysis for malachite green dye degradation and environmental adsorbents for Pb<sup>2+</sup> removal and dyes. *Applied Surface Science*, 528, 146974. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2020.146974>
- Valladares Cisneros, M. G., Aranda Figueroa, M. G., & Romero Domínguez, R. J. (2019). Adsorbentes de origen vegetal y su aplicación en la remoción amigable de colorantes presentes en agua. *Inventio*, 15(37). <https://doi.org/10.30973/inventio/2019.15.37/7>
- Vargas Urbano, M. A., Ochoa Muñoz, Y. H., Ortegón Fernández, Y., Mosquera, P., Rodríguez Páez, J. E., & Camargo Amado, R. J. (2011). Nanopartículas de tio<sub>2</sub>, fase anatasa, sintetizadas por métodos químicos. *Ingeniería y Desarrollo*, 29, 17.

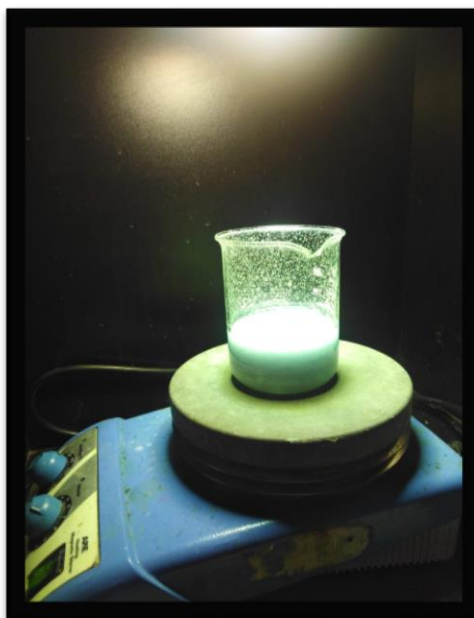
- Wardhani, S., Purwonugroho, D., Fitri, C. W., & Prananto, Y. P. (2018). Effect of pH and irradiation time on TiO<sub>2</sub>-chitosan activity for phenol photo-degradation. *AIP Conference Proceedings*, 2021, 50009. <https://doi.org/10.1063/1.5062759>
- Xu, C., Anusuyadevi, P. R., Aymonier, C., Luque, R., & Marre, S. (2019). Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews*, 48(14), 3868–3902. <https://doi.org/10.1039/C9CS00102F>
- Yamjala, K., Nainar, M. S., & Ramiseti, N. R. (2016). Methods for the analysis of azo dyes employed in food industry – A review. *Food Chemistry*, 192, 813–824. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.07.085>
- Zeidi, A., Health, F. M.-J. of, & 2020, undefined. (2020). Investigation on the Removal of Malachite Green from Aqueous Solutions Using Photocatalysis of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles. *Sid.Ir*, 11(2), 156–169. <https://doi.org/10.29252/j.health.11.2.156>
- Zhang, P., Hou, D., O'Connor, D., Li, X., Pehkonen, S., Varma, R. S., & Wang, X. (2018). Green and Size-Specific Synthesis of Stable Fe–Cu Oxides as Earth-Abundant Adsorbents for Malachite Green Removal. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(7), 9229–9236. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01547>
- Zhang, X. (2020). Estructura y actividad fotocatalítica de nanopartículas de tungstato de bismuto sintetizadas mediante el método solvotermal de un solo paso. *Revista India de Química-Sección A (IJCA)*.
- Zhang, Y., Zhang, H., Tian, S., Zhang, L., Li, W., Wang, W., Yan, X., Han, N., & Zhang, X. (2021). The Photocatalysis-Enhanced TiO<sub>2</sub>@HPAN Membrane with High TiO<sub>2</sub> Surface Content for Highly Effective Removal of Cationic Dyes. *Langmuir*, 37(31), 9415–9428. <https://doi.org/10.1021/ACS.LANGMUIR.1C01066>

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Fotografías



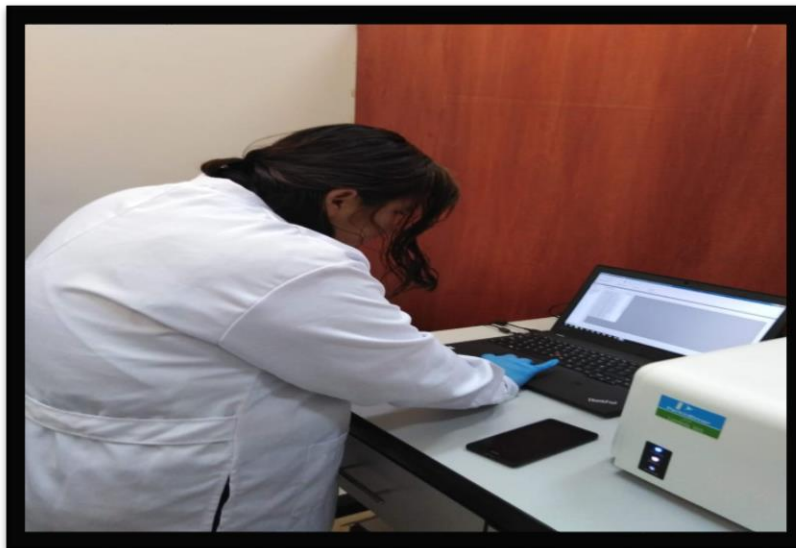
**Foto N° 01:** Preparación del ZnO en el laboratorio



**Foto N° 02:** Colocamos el vaso precipitado en la cámara fotocatalizadora, se activa la lámpara UV y se tomó la muestra cada 5 minutos por un periodo de 120 minutos



**Foto N° 03:** Culminando con todas las muestras se lleva al espectrofotómetro para hacer la lectura correspondiente



**Foto N° 04:** Finalmente se realizó la lectura en el espectrofotómetro en su longitud máxima

## Anexos 2: Tablas

Tiempo (minutos)	Tiempo (horas)	Concentración final (mol. L-1)
0	0,0	1,02 E <sup>-06</sup>
5	0,1	4,74 E <sup>-07</sup>
10	0,2	9,25 E <sup>-07</sup>
15	0,3	6,00 E <sup>-07</sup>
20	0,3	3,06 E <sup>-07</sup>
25	0,4	3,79 E <sup>-07</sup>
30	0,5	3,69 E <sup>-07</sup>
60	1,0	5,05 E <sup>-07</sup>
90	1,5	4,00 E <sup>-07</sup>
120	2,0	6,10 E <sup>-07</sup>

**Tabla 2.** Concentración final de azul de metileno, con respecto al tiempo de tratamiento y al 100% de TiO<sub>2</sub>

Tiempo (minutos)	Tiempo (horas)	Concentración final de Azul de Metileno (mol.L-1)						
		0,5% ZnO	1% ZnO	3% ZnO	5% ZnO	25% ZnO	50% ZnO	100% ZnO
0	0,0	4,74 E <sup>-07</sup>	6,21 E <sup>-07</sup>	7,26 E <sup>-07</sup>	9,57E <sup>-07</sup>	8,41 E <sup>-07</sup>	1,32 E <sup>-06</sup>	9,99 E <sup>-07</sup>
5	0,1	2,01 E <sup>-07</sup>	5,47 E <sup>-07</sup>	9,15 E <sup>-07</sup>	6,00 E <sup>-07</sup>	7,89 E <sup>-07</sup>	1,26 E <sup>-06</sup>	8,83 E <sup>-07</sup>
10	0,2	1,27 E <sup>-07</sup>	3,69 E <sup>-07</sup>	5,37 E <sup>-07</sup>	6,42 E <sup>-07</sup>	6,21 E <sup>-07</sup>	9,15 E <sup>-07</sup>	7,47 E <sup>-07</sup>
15	0,3	1,48 E <sup>-07</sup>	2,74 E <sup>-07</sup>	4,84 E <sup>-07</sup>	4,63 E <sup>-07</sup>	6,62 E <sup>-07</sup>	8,52 E <sup>-07</sup>	8,31 E <sup>-07</sup>
20	0,3	1,06 E <sup>-07</sup>	1,48 E <sup>-07</sup>	3,16 E <sup>-07</sup>	2,53 E <sup>-07</sup>	5,79 E <sup>-07</sup>	6,73 E <sup>-07</sup>	8,73 E <sup>-07</sup>
25	0,4	-	5,36 E <sup>-08</sup>	7,46 E <sup>-08</sup>	9,56 E <sup>-08</sup>	5,90 E <sup>-07</sup>	6,52 E <sup>-07</sup>	6,84 E <sup>-07</sup>
30	0,5	1,05 E <sup>-09</sup>	2,22 E <sup>-07</sup>	8,51 E <sup>-08</sup>	1,59 E <sup>-07</sup>	5,26 E <sup>-07</sup>	4,00 E <sup>-07</sup>	6,42 E <sup>-07</sup>
60	1,0	2,85 E <sup>-07</sup>	1,16 E <sup>-08</sup>	4,31 E <sup>-08</sup>	1,06 E <sup>-07</sup>	1,48 E <sup>-07</sup>	4,95 E <sup>-07</sup>	3,37 E <sup>-07</sup>
90	1,5	4,31 E <sup>-08</sup>	6,41 E <sup>-08</sup>	8,51 E <sup>-08</sup>	1,59 E <sup>-07</sup>	2,74 E <sup>-07</sup>	4,21 E <sup>-07</sup>	2,22 E <sup>-07</sup>
120	2,0	7,15 E <sup>-07</sup>	2,21 E <sup>-08</sup>	6,41 E <sup>-08</sup>	1,17 E <sup>-07</sup>	4,21 E <sup>-07</sup>	3,69 E <sup>-07</sup>	2,74 E <sup>-07</sup>

**Tabla 3.** Concentración final de azul de metileno, con respecto al tiempo de tratamiento y % de ZnO

Tiempo (minutos)	Tiempo (horas)	Concentración final verde de malaquita (mol. L-1) -100%TiO <sub>2</sub>
0	0,0	1,62 E <sup>-06</sup>
5	0,1	9,72 E <sup>-07</sup>
10	0,2	4,06 E <sup>-07</sup>
15	0,3	4,45 E <sup>-07</sup>
20	0,3	3,87 E <sup>-07</sup>
25	0,4	3,47 E <sup>-07</sup>
30	0,5	2,89 E <sup>-07</sup>
60	1,0	2,50 E <sup>-07</sup>
90	1,5	1,72 E <sup>-07</sup>
120	2,0	1,52 E <sup>-07</sup>

**Tabla 4.** Concentración final de verde malaquita, con respecto al tiempo de tratamiento y al 100% de TiO<sub>2</sub>

Tiempo (minutos)	Tiempo (horas)	Concentration final de Verde de Malaquita (mol.L-1)						
		0,5% ZnO	1% ZnO	3% ZnO	5% ZnO	25% ZnO	50% ZnO	100% ZnO
0	0,0	9,35 E <sup>-06</sup>	1,04 E <sup>-05</sup>	8,17 E <sup>-06</sup>	1,83 E <sup>-06</sup>	1,99 E <sup>-06</sup>	1,25 E <sup>-06</sup>	1,01 E <sup>-06</sup>
5	0,1	7,65 E <sup>-06</sup>	8,51 E <sup>-06</sup>	7,35 E <sup>-06</sup>	2,03 E <sup>-06</sup>	1,66 E <sup>-06</sup>	9,92 E <sup>-07</sup>	7,18 E <sup>-07</sup>
10	0,2	5,95 E <sup>-06</sup>	8,43 E <sup>-06</sup>	6,83 E <sup>-06</sup>	1,62 E <sup>-06</sup>	1,60 E <sup>-06</sup>	6,99 E <sup>-07</sup>	7,57 E <sup>-07</sup>
15	0,3	6,77 E <sup>-06</sup>	7,12 E <sup>-06</sup>	4,56 E <sup>-06</sup>	1,09 E <sup>-06</sup>	1,44 E <sup>-06</sup>	6,40 E <sup>-07</sup>	7,18 E <sup>-07</sup>
20	0,3	4,23 E <sup>-06</sup>	6,40 E <sup>-06</sup>	4,56 E <sup>-06</sup>	6,79 E <sup>-07</sup>	1,26 E <sup>-06</sup>	6,79 E <sup>-07</sup>	5,62 E <sup>-07</sup>
25	0,4	4,33 E <sup>-06</sup>	5,50 E <sup>-06</sup>	5,34 E <sup>-06</sup>	4,45 E <sup>-07</sup>	1,34 E <sup>-06</sup>	4,84 E <sup>-07</sup>	5,62 E <sup>-07</sup>
30	0,5	4,76 E <sup>-06</sup>	5,05 E <sup>-06</sup>	3,78 E <sup>-06</sup>	3,67 E <sup>-07</sup>	1,26 E <sup>-06</sup>	4,45 E <sup>-07</sup>	3,86 E <sup>-07</sup>
60	1,0	2,85 E <sup>-06</sup>	3,04 E <sup>-06</sup>	2,59 E <sup>-06</sup>	1,13 E <sup>-07</sup>	5,62 E <sup>-07</sup>	9,37 E <sup>-08</sup>	1,91 E <sup>-07</sup>
90	1,5	2,16 E <sup>-06</sup>	2,32 E <sup>-06</sup>	2,65 E <sup>-06</sup>	5,47 E <sup>-08</sup>	5,43 E <sup>-07</sup>	5,47 E <sup>-08</sup>	1,72 E <sup>-07</sup>
120	2,0	1,87 E <sup>-06</sup>	1,97 E <sup>-06</sup>	1,73 E <sup>-06</sup>	-	5,82 E <sup>-07</sup>	3,51 E <sup>-08</sup>	7,42 E <sup>-08</sup>

**Tabla 5.** Concentración final de verde de malaquita, con respecto al tiempo de tratamiento y % de ZnO

Tiempo (minutos)	Tiempo (horas)	Concentración final de Tartracina (mol. L-1)						
		0,5% ZnO	1% ZnO	3% ZnO	5% ZnO	25% ZnO	50% ZnO	100% ZnO
0	0,0	1,00 E <sup>-06</sup>	3,58 E <sup>-06</sup>	1,39 E <sup>-06</sup>	1,95 E <sup>-06</sup>	3,33 E <sup>-06</sup>	6,12 E <sup>-07</sup>	2,21 E <sup>-06</sup>
5	0,1	1,26 E <sup>-06</sup>	2,90 E <sup>-06</sup>	1,13 E <sup>-06</sup>	1,47 E <sup>-06</sup>	3,15 E <sup>-06</sup>	5,26 E <sup>-07</sup>	2,08 E <sup>-06</sup>
10	0,2	-	2,68 E <sup>-06</sup>	5,26 E <sup>-07</sup>	1,39 E <sup>-06</sup>	2,85 E <sup>-06</sup>	4,39 E <sup>-07</sup>	1,69 E <sup>-06</sup>
15	0,3	-	2,38 E <sup>-06</sup>	1,38 E <sup>-07</sup>	8,27 E <sup>-07</sup>	1,86 E <sup>-06</sup>	-	1,52 E <sup>-06</sup>
20	0,3	-	1,95 E <sup>-06</sup>	2,24 E <sup>-07</sup>	6,55 E <sup>-07</sup>	2,29 E <sup>-06</sup>	-	1,47 E <sup>-06</sup>
25	0,4	-	1,00 E <sup>-06</sup>	1,81 E <sup>-07</sup>	3,53 E <sup>-07</sup>	1,99 E <sup>-06</sup>	3,53 E <sup>-07</sup>	1,60 E <sup>-06</sup>
30	0,5	-	5,69 E <sup>-07</sup>	-	3,53 E <sup>-07</sup>	2,29 E <sup>-06</sup>	-	1,39 E <sup>-06</sup>
60	1,0	-	5,26 E <sup>-07</sup>	-	-	1,09 E <sup>-06</sup>	-	8,70 E <sup>-07</sup>
90	1,5	-	1,38 E <sup>-07</sup>	-	-	8,27 E <sup>-07</sup>	-	7,84 E <sup>-07</sup>
120	2,0	-	-	-	-	9,48 E <sup>-08</sup>	-	6,55 E <sup>-07</sup>

**Tabla 6.** Concentración final de tartrazina, con respecto al tiempo de tratamiento y % de ZnO