



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Ambiental

**Evaluación de un sistema de recirculación para fotodegradación de colorantes en
aguas residuales del proceso de teñido de paja toquilla.**

Trabajo previo a la obtención del grado académico de Ingeniero Ambiental

Ximena Catalina Chilloalli Quezada

Víctor Paúl Suárez Puente

Director: Ing. Bolívar Andrés Pérez González

Cuenca-Ecuador

2025

I. Dedicatoria

A Dios, quien en su infinita misericordia me permitió llegar hasta este momento y hacer realidad este anhelado sueño. Su fortaleza, guía y sabiduría fueron fundamentales en cada paso del camino; sin Él, nada de esto habría sido posible. A mis padres, Carlos Chillogalli y Yolanda Quezada, por acompañarme siempre, incluso en los momentos más difíciles. Sus consejos, palabras de aliento y firme apoyo fueron la fuerza que me impulsó a avanzar año tras año. A mis hermanos, Steven, Daysi y Benjamín, por su respaldo incondicional durante este proceso. Con ellos aprendí que rendirse sería olvidar de lo que soy capaz. A mi novio, Jonnathan Guamán, quien llegó a mi vida en el momento oportuno y se convirtió en un pilar esencial. Gracias por tu compañía en los días más complejos, por tu ayuda constante y por aquella promesa que siempre cumpliste: “Tú estudia, que yo estaré para ti siempre.” Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Finalmente, me lo dedico a mí misma. Este esfuerzo, sacrificio y perseverancia son evidencia de que Dios cumple sus promesas. Reconozco cada paso dado, cada noche de estudio y cada desafío superado. Este logro es también un recordatorio de lo lejos que puedo llegar cuando Él es el centro de mi vida.

Ximena Catalina Chillogalli Quezada

Esta tesis va dedicada a mi familia, quienes han sido mi fuerza, mi refugio y el motivo por el cual hoy culmino esta etapa. Principalmente a mi mamá, Susana Puente, por su lucha incansable para sacarme adelante y por enseñarme, con amor y sacrificio, que los sueños se alcanzan con esfuerzo y fe. A mi abuelita, mi querida mami Elisita, por ser una segunda madre, por su ternura y por ese apoyo que me sostiene incluso en los días más difíciles. Y a mi abuelito Victorcito, quien, aunque no pude conocer, sé que me acompaña desde el cielo y guía cada uno de mis pasos. A mis amigos, en especial a Mauricio Toledo, mi hermano de la vida, gracias por tu lealtad, por tu ánimo constante y por estar presente en cada etapa de este camino. Con todo mi agradecimiento y cariño, este logro también es de ustedes.

Víctor Paul Suárez Puente

II. Agradecimientos

A Dios, por haberme sostenido a lo largo de este camino, por concederme la sabiduría necesaria para tomar decisiones acertadas y por brindarme su amor incondicional en cada etapa del proceso. Su guía constante fortaleció mi espíritu y me permitió culminar con éxito esta meta académica que hoy se materializa. A mis padres y hermanos, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por confiar en mí incluso cuando las dificultades parecían mayores que mis fuerzas, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por motivarme a seguir adelante sin importar los desafíos. A mi novio, por su paciencia, comprensión y acompañamiento permanente. Su apoyo emocional y su capacidad para brindarme ánimo en los momentos de mayor presión fueron clave para mantenerme enfocada y perseverar hasta el final. Extiendo mi profundo agradecimiento a mi tutor, el Ing. Andrés Pérez Gonzales, por su guía oportuna, su disposición para atender cada duda y su orientación profesional. Asimismo, agradezco al Ing. Gustavo Álvarez por su enseñanza, acompañamiento y valiosos aportes durante la escritura y estructuración de este documento. Finalmente, expreso mi gratitud a mi compañero Víctor Suárez, por su esfuerzo, dedicación y compromiso para culminar este proyecto de manera satisfactoria.

Ximena Catalina Chillogalli Quezada

A Dios, por Su guía, fortaleza y bendiciones en cada etapa de este camino. Gracias por darme la paciencia, la claridad y la perseverancia necesarias para culminar este proyecto.

Al Ing. Andrés Pérez, mi tutor de tesis, por su constante apoyo desde el inicio del proceso. Su acompañamiento, orientación y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Agradezco profundamente su tiempo, su dedicación y la confianza que depositó en nuestro trabajo. A mi compañera de tesis, Ximena Chillogalli, por su compromiso, esfuerzo y constancia durante todo este proceso. Gracias por su apoyo, su responsabilidad y por trabajar siempre con dedicación para alcanzar juntos este objetivo académico.

Víctor Paul Suárez Puente

III. Resumen

La tesis evalúa un sistema continuo de fotodegradación para eliminar colorantes en aguas residuales del proceso de tejido de paja toquilla, un producto artesanal emblemático de Ecuador. Se desarrolló un sistema de recirculación fotocatalítica con dióxido de titanio (TiO_2) para degradar los colorantes sintéticos azul, rojo y amarillo presentes en las aguas residuales. Se analizaron las longitudes de onda específicas para cada colorante y se diseñaron experimentos con diferentes concentraciones y mezclas. El tratamiento con radiación UV y luz solar natural se evaluó mediante mediciones espectrofotométricas y parámetros de calidad del agua como pH, conductividad y demanda química de oxígeno (DQO). Los resultados mostraron que el colorante azul tuvo la mayor degradación (hasta 87%), mientras que el rojo y amarillo presentaron menor eficiencia. El sistema cumplió con la normativa vigente y demostró ser una alternativa sostenible para el tratamiento de efluentes en comunidades artesanales que ambientalmente producen sombreros de paja toquilla.

IV. Palabras clave

Fotodegradación, Dióxido de titanio (TiO_2), Colorantes sintéticos, Paja toquilla, Fotocatálisis, Degradación de colorantes.

V. Abstract

The thesis evaluates a continuous photodegradation system for removing dyes from wastewater generated by the weaving of toquilla straw, an iconic Ecuadorian handicraft product. A photocatalytic recirculation system using titanium dioxide (TiO_2) was developed to degrade the synthetic blue, red, and yellow dyes present in the wastewater. The specific wavelengths for each dye were analyzed, and experiments were designed with different concentrations and mixtures. Treatment with UV

radiation and natural sunlight was evaluated using spectrophotometric measurements and water quality parameters such as pH, conductivity, and chemical oxygen demand (COD). The results showed that the blue dye had the highest degradation (up to 87%), while red and yellow had lower efficiency. The system complied with current regulations and proved to be a sustainable alternative for the treatment of effluents in artisanal communities that produce toquilla straw hats in an environmentally friendly manner.

VI. Keywords

Photodegradation, Titanium dioxide (TiO₂), Synthetic dyes, Toquilla straw, Photocatalysis, Dye degradation.

Índices de contenido

I. Dedicatoria	2
II. Agradecimientos	3
III. Resumen	4
IV. Palabras clave	4 V.
Abstract	5
VI. Keywords	5
VII. Glosario	11
1 Introducción	12
1.1 Contexto	12
1.1.1 Problemática	12
1.1.2 Justificación	13
1.1.3 Marco teórico	13
1.1.4 Objetivos	14
1.1.5 Alcance	15
2 Materiales y métodos	5
2.1 Materiales	5
2.2 Metodología	9
2.2.1 Preparación y cuantificación de soluciones patrón	9
2.2.2 Determinación de la longitud de onda (λ_{\max}) para cada colorante	9
2.2.3 Diseño experimental	10
2.2.4 Realizar las muestras sintéticas	11
2.2.5 Tratamiento con radiación UV y recirculación	11
2.2.6 Efecto de la luz solar	11
2.2.7 Parámetros de control de calidad de agua	12
3 Resultados	13
3.1 Degradación del color Azul	13
3.2 Degradación del colorante Amarillo	14
3.3 Degradación del colorante Rojo	15
3.4 Diseño experimental	17

3.5 Degradación del colorante azul y la combinación (-1,-1,-1) a radiación solar	19
3.6 Parámetros de calidad de agua	20
4 Conclusiones	21
5 Referencias	22
6 Anexos	25

Índice de tablas

Tabla 1 Materiales utilizados en el sistema de recirculación fotocatalítica	1
Tabla 2. Longitudes de Onda de los colorantes.	
1 Tabla 3. Tabla del diseño experimental con las combinaciones de los niveles de las variables.....	
2	
Tabla 4. Concentraciones de las variables del diseño experimental para cada nivel.	2
Tabla 5. Diferentes concentraciones de los colorantes.	
3 Tabla 6. Resultados del diseño experimental a diferentes concentraciones de cada colorante.	
9	
Tabla 7. Resultados del colorante Azul y la combinación a radiación solar.	11
Tabla 8. Resultados obtenidos de laboratorio de pH, DQO y conductividad eléctrica.	12
Tabla 9. Límites máximos permisibles de pH y DQO.	12

Índice de figuras

Figura 1. Materiales utilizados en el laboratorio.	3
Figura 2. Preparación de muestras sintéticas.	1
Figura 3. Degradación del colorante Azul a diferentes longitudes de Onda.	5
Figura 4. Degradación del colorante Amarillo a diferentes longitudes de Onda.	6
Figura 5. Degradación del colorante Rojo a diferentes longitudes de Onda.	8

Índice de anexos

Anexo 1. Tabla de degradación del colorante Azul.	17
Anexo 2. Tabla de degradación del colorante Amarillo.	17
Anexo 3. Tabla de degradación del colorante Rojo.	18
Anexo 4. Graficas de la combinación Az25-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	19
Anexo 5. Graficas de la combinación Az25-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	19
Anexo 6. Graficas de la combinación Az25-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.	20
Anexo 7. Graficas de la combinación Az75-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	21
Anexo 8. Graficas de la combinación Az75-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	22
Anexo 9. Graficas de la combinación Az75-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.	23
Anexo 10. Graficas de la combinación Az25-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	23
Anexo 11. Graficas de la combinación Az25-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	24
Anexo 12. Graficas de la combinación Az25-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.	25
Anexo 13. Graficas de la combinación Az75-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	26
Anexo 14. Graficas de la combinación Az75-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	26
Anexo 15. Graficas de la combinación Az75-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.	27
Anexo 16. Graficas de la combinación Az25-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	28
Anexo 17. Graficas de la combinación Az25-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	29
Anexo 18. Graficas de la combinación Az25-Am25-75 de las longitudes de onda del	

colorante Azul.	30
Anexo 19. Graficas de la combinación Az75-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	30
Anexo 20. Graficas de la combinación Az75-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	31
Anexo 21. Graficas de la combinación Az75-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Azul.	32
Anexo 22. Graficas de la combinación Az25-Am75-R75 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	33
Anexo 23. Graficas de la combinación Az25-Am75-R75 de las longitudes de onda del colorante Rojo.....	33
Anexo 24. Graficas de la combinación Az25-Am75-R75 de las longitudes de onda del colorante Azul.	34
Anexo 25. Graficas de la primera combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	35
Anexo 26. Graficas de la primera combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Rojo.	36
Anexo 27. Graficas de la primera combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Azul.	37
Anexo 28. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	37
Anexo 29. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Rojo.	38
Anexo 30. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Azul.	39
Anexo 31. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	40
Anexo 32. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Rojo.	40
Anexo 33. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Azul.	41
Anexo 34. Graficas de la combinación Az50-Am50-R25 a radiación solar de las longitudes de onda del colorante Amarillo.	42

Anexo 35. Graficas de la combinación Az50-Am50-R25 a radiación solar de las longitudes de onda del colorante Rojo.	43
Anexo 36. Graficas de la combinación Az50-Am50-R25 a radiación solar de las longitudes de onda del colorante Azul.	44
Anexo 37. Tabla de las longitudes de onda del colorante azul a radiación solar.	44
Anexo 38. Degradación de diferentes longitudes de onda a radiación solar del colorante Azul.	45

VII. Glosario

Término	Definición
Az	Colorante Azul
Am	Colorante Amarillo
Ro	Colorante Rojo
DQO	Demanda Química De Oxígeno
λ_{max}	Longitud de Onda Máxima
Uv	Radiación Ultravioleta
TiO ₂	Dióxido De Titanio
PPM	Partes Por Millón
Nm	Nanómetros
Min	Minutos

1 Introducción

1.1 Contexto

El uso de colorantes en la fabricación de diversos productos registra una gran demanda a nivel global, pues no solo realza su apariencia y atractivo visual, sino que también fortalece las estrategias de marketing y promoción comercial. En este sentido, diferentes industrias, como la alimentaria, la papelera y la textil, entre otras, incorporan una amplia variedad de colorantes en sus procesos productivos (Echeverría-Paredes et al., 2023).

En este contexto la elaboración de sombreros de paja toquilla es una tradición ancestral en Ecuador, reconocida internacionalmente por su valor cultural y económico (Macías et al., 2023). Sin embargo, en su proceso de teñido, especialmente cuando se emplean colorantes sintéticos, se generan efluentes altamente contaminantes. Estos efluentes contienen compuestos tóxicos como colorantes azoicos y aminas aromáticas, por ejemplo, 1,4-diaminobenceno, un compuesto clasificado como potencialmente carcinogénico para humanos (Dutta et al., 2022). La descarga de estos residuos sin tratamiento previo implica riesgos considerables para la salud humana, los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad, debido a su persistencia en el ambiente y su capacidad de inhibir la fotosíntesis en organismos acuáticos (Echeverría-Paredes et al., 2023).

1.1.1 Problemática

A nivel global, la industria textil es uno de los principales responsables de la contaminación hídrica, generando aproximadamente 280,000 toneladas anuales de colorantes que terminan en los ríos y lagos, con impactos duraderos en la calidad del agua y la salud de los ecosistemas (Sudarshan et al., 2023). Estudios recientes indican que algunos colorantes, como el azul reactivo 19, tienen una vida media ambiental de hasta 46 años bajo condiciones neutras, evidenciando su carácter persistente y su potencial de bioacumulación (Sudarshan et al., 2023).

Dentro de este marco de la producción artesanal con paja toquilla, la falta de tratamiento de aguas residuales resulta en la liberación de efluentes con altos niveles de color, que reducen la penetración de la luz y alteran los ecosistemas acuáticos cercanos, afectando tanto flora como fauna (Echeverría-Paredes et al., 2023). Además, durante el teñido, se emplean colorantes azoicos cuya absorción puede liberar aminas aromáticas

tóxicas, como el 1,4-diaminobenceno, que tienen efectos nocivos para la salud de los trabajadores y las comunidades cercanas (Dutta et al., 2022).

1.1.2 Justificación

Ante este escenario, la búsqueda de tecnologías efectivas y sostenibles para el tratamiento de estas aguas residuales es prioritaria. La fotocatalisis heterogénea con nanopartículas de óxidos semiconductores, en particular dióxido de titanio (TiO_2), ha demostrado ser prometedora en la eliminación de colorantes y compuestos orgánicos peligrosos. Estudios como los de Cui et al. (2020) evidencian que el TiO_2 puede promover la degradación de contaminantes a través de reacciones fotoquímicas activadas por la luz, generando productos menos tóxicos. Sin embargo, su aplicación práctica aún enfrenta limitaciones, como la rápida recombinación de pares electrón-hueco y la baja sensibilidad a la luz visible (Chen et al., 2019).

Por ello, la presente investigación busca evaluar la efectividad del dióxido de titanio en la reducción de la carga contaminante en aguas residuales generadas en la producción de sombreros de paja toquilla, mediante la técnica de oxidación avanzada. La implementación de esta tecnología podría contribuir a disminuir la concentración de compuestos tóxicos, mejorando la calidad del agua y protegiendo los ecosistemas acuáticos circundantes. Además, se pretende evaluar si este método puede ser una solución factible y sostenible para comunidades artesanales, promoviendo una producción más responsable y amigable con el ambiente.

1.1.3 Marco teórico

La industria textil emerge como un agente contaminante relevante, incluido el uso de colorantes en sus procesos de producción. Estos colorantes, definidos como sustancias orgánicas, a menudo fluorescentes o de intensa coloración, confieren propiedades cromáticas a sustratos incoloros mediante la absorción selectiva de la luz (Salazar Ramírez, 2023). A nivel global, se reconoce que el sector textil es un gran consumidor de agua y un importante generador de efluentes contaminados con colorantes y otros productos químicos (Azanaw et al., 2022).

Las aguas residuales generadas en el proceso de teñido de la industria textil presentan una complejidad considerable. En comparación con la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en estas descargas, las moléculas de tinte son particularmente difíciles de tratar. Su intrincada y pesada estructura molecular,

caracterizada por la presencia de múltiples anillos aromáticos como el benceno o el naftaleno, les confiere una notable termo estabilidad y foto estabilidad. Esta característica les permite persistir en el medio ambiente durante períodos prolongados (Azanaw et al., 2022; Benjelloun et al., 2021), exacerbando el desafío de su eliminación. Diversos estudios recientes continúan resaltando la complejidad de los efluentes textiles debido a su alta carga orgánica, color y presencia de xenobióticos (Benjelloun et al., 2021; Kothari et al., 2023).

El proceso de teñido del sombrero de paja toquilla, una artesanía emblemática de Ecuador, ilustra claramente este problema, ya que el uso de colorantes de alta pigmentación dificulta el tratamiento del agua residual resultante, lo que ha impulsado investigaciones locales sobre soluciones sostenibles (Pérez González & Quezada Ortuño, 2024; Echeverría-Paredes et al., 2023). Para mitigar esta contaminación, se exploran diversas técnicas de degradación. La fotodegradación de colorantes, por ejemplo, es un fenómeno fotoquímico complejo influenciado por factores como la longitud de onda de la luz (UV), la estructura molecular del colorante, la presencia de oxígeno y la temperatura. Estas propiedades pueden ser aprovechadas para degradar colorantes en aguas residuales mediante la fotocatalisis (Martínez Reyes, 2020; Díaz Bravo, 2023).

En este sentido, la fotocatalisis heterogénea se destaca como una de las técnicas más prometedoras y empleadas para el tratamiento de aguas residuales textiles (Benjelloun et al., 2021; Kothari et al., 2023). Este proceso se basa en la excitación de un material semiconductor sólido que actúa como fotocatalizador, como el dióxido de titanio (TiO_2) o el óxido de zinc (ZnO). Al ser expuesto a luz (ultravioleta o visible), el fotocatalizador genera pares electrón-hueco. Estos electrones migran a la banda de conducción, donde inician reacciones de reducción que contribuyen a la degradación de los contaminantes (Díaz Bravo, 2023; Martínez Reyes, 2020). Investigaciones recientes han demostrado que la fotocatalisis es una técnica efectiva para la remoción de colorantes en aguas textiles, logrando altos porcentajes de remoción de color y degradación de compuestos orgánicos persistentes (Echeverría-Paredes et al., 2023; Kothari et al., 2023).

1.1.4 Objetivos

1.1.4.1 General

Evaluar un sistema de recirculación para la remoción de colorantes producidos en el proceso de teñido de paja toquilla.

1.1.4.2 Específicos

- Desarrollar un sistema de recirculación para degradación de colorantes.
- Evaluar el efecto de radiación UV en el proceso de degradación en soluciones simples de colorantes a diferentes concentraciones y mezclas de los mismos.
- Evaluar el efecto de la radiación natural en el proceso de degradación en el mejor experimento de degradación UV.

1.1.5 Alcance

El estudio se centra en evaluar un sistema de recirculación fotocatalítica con dióxido de titanio (TiO_2) para la remoción de tres colorantes sintéticos el amarillo, el rojo y el azul, presentes en las aguas residuales del teñido de paja toquilla. Se desarrollará un sistema de recirculación a escala de laboratorio que permita la exposición del efluente a radiación UV en presencia del catalizador TiO_2 , inmovilizado en un soporte sólido, determinando las condiciones óptimas de operación (tiempo, concentración, intensidad de radiación).

Posteriormente, se evaluará la eficacia del proceso bajo radiación solar natural, a partir de los mejores resultados obtenidos con radiación UV artificial, para analizar la viabilidad del uso de energía solar en contextos artesanales. El alcance se limita a la evaluación experimental del proceso fotocatalítico en condiciones controladas y con muestras sintéticas que serán similares a las del proceso de teñido a pequeña escala, sin incluir etapas posteriores de tratamiento ni el escalamiento industrial del sistema.

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales

En la Tabla 1 se listan los materiales y equipos empleados en el montaje del sistema de recirculación y en la ejecución de las mediciones experimentales, junto con una breve descripción técnica de cada componente.

Tabla 1 Materiales utilizados en el sistema de recirculación fotocatalítica

N.º	Nombre del material o equipo	Función	Descripción técnica
1	Espectrofotómetro	Medir la absorbancia de las soluciones antes y después del tratamiento.	Equipo de análisis óptico que determina la intensidad de luz absorbida por una muestra a diferentes longitudes de onda, permitiendo calcular el grado de decoloración.
2	Cubetas espectrofotométricas	Contener las muestras para las mediciones.	Celdas transparentes de material óptico (vidrio o cuarzo) con volumen estándar, adecuadas para lecturas precisas en el espectrofotómetro.
3	Alcohol etílico	Limpieza y desinfección del material de laboratorio.	Disolvente orgánico volátil empleado para eliminar residuos de colorante y evitar contaminación cruzada.
4	Agua destilada	Medio de disolución y preparación de las soluciones.	Agua purificada libre de impurezas iónicas, utilizada para evitar interferencias en las reacciones fotocatalíticas.
5	Colorantes sintéticos (amarillo, azul y rojo)	Simular los colorantes usados en el proceso de teñido de paja toquilla.	Sustancias orgánicas solubles en agua, representativas de los colorantes artesanales comunes; preparadas en distintas concentraciones.

6	Balanza analítica de calibración	Medir con precisión las masas de reactivos.	Instrumento de alta sensibilidad (± 0.0001 g) utilizado para pesar el catalizador, los colorantes y otros insumos.
N.º	Nombre del material o equipo	Función	Descripción técnica
7	Espátula de laboratorio	Manipular los colorantes durante la preparación de mezclas.	Herramienta metálica utilizada para tomar, mezclar o distribuir pequeñas cantidades de colorantes.
8	Vaso de precipitación de 25 mL	Pesar y preparar pequeñas cantidades de colorantes antes de su disolución.	Recipiente de vidrio borosilicato resistente al calor y a productos químicos, con borde vertedor y capacidad de 25 mL.
9	Balón aforado de 1000 mL	Contener y medir el volumen de agua para alimentar la piscina de recirculación.	Recipiente de vidrio con base esférica y cuello largo calibrado a 1000 mL, usado para preparar volúmenes exactos de soluciones o agua destilada.
10	Piscina de recirculación (19 L)	Servir como reactor y reservorio de la solución de colorantes.	Contenedor plástico de 19 litros que aloja la solución tratada; conectado al sistema de bombeo para mantener un flujo continuo.
11	Sistema de recirculación	Permitir el movimiento constante del fluido durante el tratamiento.	Conjunto de bomba, mangueras y válvulas que aseguran la circulación del efluente a través del reactor bajo radiación UV.
12	Lámpara de luz ultravioleta (UV)	Proveer la energía necesaria para activar el catalizador TiO_2 .	Fuente emisora de radiación en el rango UV-A o UV-C; potencia y longitud de onda adecuadas para inducir la fotocatalisis.
13	Dióxido de titanio (TiO_2)	Actuar como catalizador en el proceso fotocatalítico.	Polvo semiconductor con alta estabilidad química y capacidad para generar radicales oxidantes bajo irradiación UV, promoviendo la degradación de colorantes.

14	Tubos Falcon de 15 mL	Almacenar y preparar pequeñas muestras de soluciones de colorantes o catalizador.	Tubos cónicos de polipropileno con tapa rosca hermética, capacidad de 15 mL, graduados y resistentes a la centrifugación y a variaciones térmicas.
15	Pipetas graduadas de plástico	Medir y transferir volúmenes específicos de soluciones.	Instrumentos volumétricos calibrados que permiten dosificar líquidos con precisión.

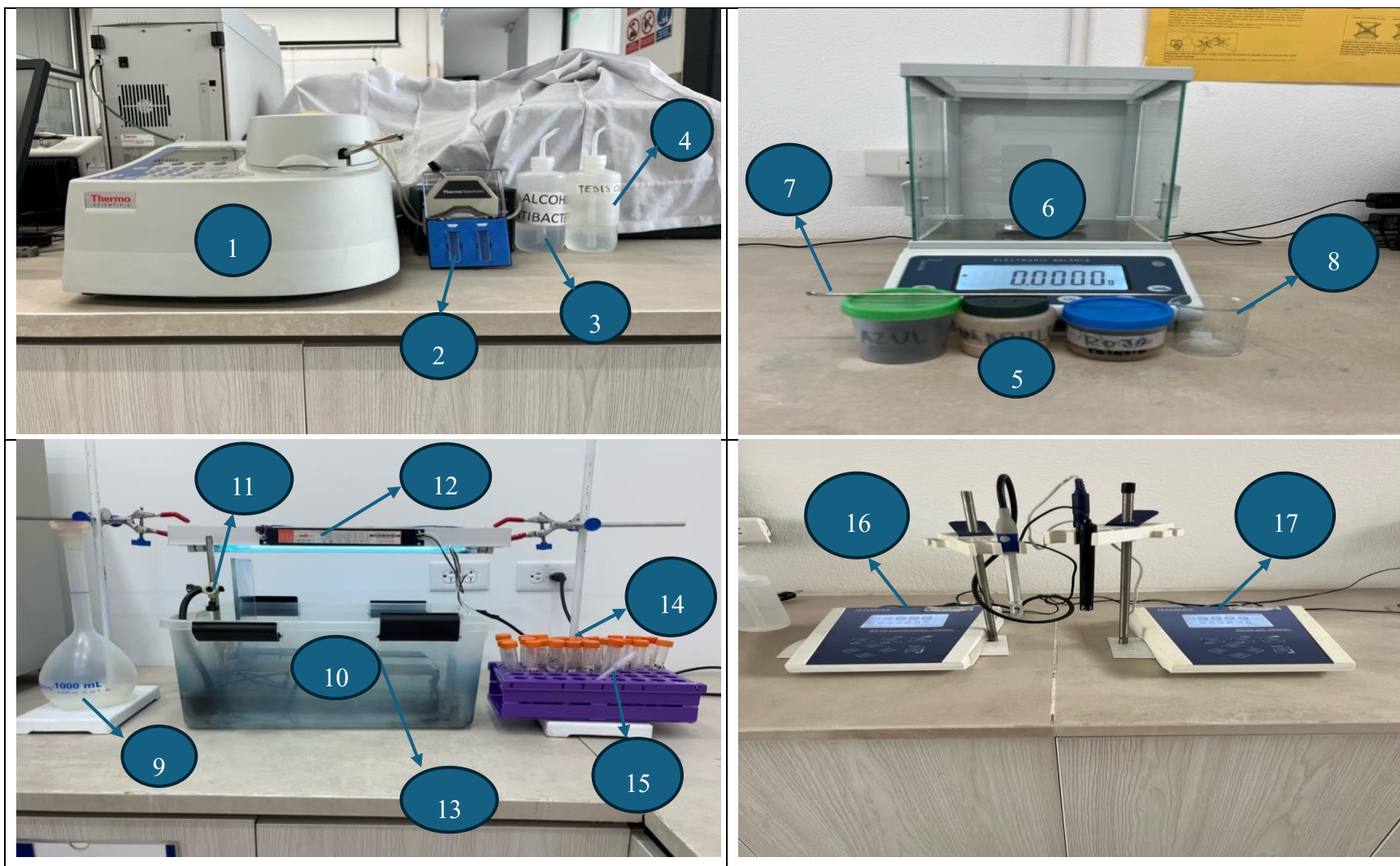


Figura 1. Materiales utilizados en el laboratorio.

2.2 Metodología

2.2.1 Preparación y cuantificación de soluciones patrón

Para cuantificar la concentración de colorantes sintéticos (azul, rojo, amarillo y verde), se preparó soluciones patrón a partir de una disolución madre obtenida disolviendo 0,1 gramos de colorante en 1000 ml de agua destilada, equivalente a 100 ppm (Jetón, s. f.). A partir de esta muestra madre, se realizan diluciones seriadas para obtener soluciones de 10 ppm.



Figura 2. Preparación de muestras sintéticas.

2.2.2 Determinación de la longitud de onda (λ_{\max}) para cada colorante

Para determinar las longitudes de onda de cada colorante, se realizó un barrido espectral de cada uno de ellos. Se utilizó una solución simple de 10 ppm de cada colorante (azul, rojo, amarillo) y se determinó las siguientes longitudes de onda de cada colorante descritas en la tabla 2. Con estas soluciones se construyó la curva de calibración, que es una representación gráfica de la relación entre la absorbancia (eje y) y la concentración conocida (eje x) de cada colorante (Fajardo et al., 2018). Las longitudes de onda que se determinaron, corresponden a diferentes especies químicas presentes en los colorantes, las cuales no se identificaron.

Tabla 2. Longitudes de Onda de los colorantes.

Colorantes	Longitudes de onda obtenidas
Azul	252nm - 309nm - 352nm – 620nm
Amarillo	250nm - 314nm - 370nm - 430nm
Rojo	256nm - 272nm - 362nm - 430nm - 514nm - 554nm

2.2.3 Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental factorial 2^k , donde los factores corresponden a la presencia o ausencia de cada colorante (nivel “+” o “-”). Este diseño permite evaluar los efectos principales y las posibles interacciones entre los tres colorantes, generando un total de 8 combinaciones experimentales, con tres réplicas en el punto central que se muestran en la Tabla 3 las cuales serán llevadas al sistema continuo de fotodegradación (Baycan Parilti & Akten, 2011; Broccoli et al., 2023). Las réplicas al blanco se utilizan para establecer los estadísticos correspondientes a la replicabilidad y confiabilidad estadística del diseño experimental. Para este trabajo no se hará el estudio del diseño experimental como tal, el diseño experimental se ha desarrollado para tener una ejecución ordenada de los experimentos mediante el control de las variables que los componen.

Tabla 3. Tabla del diseño experimental con las combinaciones de los niveles de las variables.

Orden Est	Orden Corrida	Punto Central	Bloques	Azul	Amarillo	Rojo
1	1	1	1	-1	-1	-1
2	2	1	1	1	-1	-1
3	3	1	1	-1	1	-1
4	4	1	1	1	1	-1
5	5	1	1	-1	-1	1
6	6	1	1	1	-1	1
7	7	1	1	-1	1	1
8	8	1	1	1	1	1
9	9	0	1	0	0	0
10	10	0	1	0	0	0
11	11	0	1	0	0	0

Tabla 4. Concentraciones de las variables del diseño experimental para cada nivel.

Valor	Factores		
	Azul	Amarillo	Rojo
-1	5 ppm	5 ppm	5 ppm
0	10 ppm	10 ppm	10 ppm
1	15 ppm	15 ppm	15 ppm

2.2.4 Realizar las muestras sintéticas

Se realizaron las debidas muestras de los diferentes colorantes a diferentes concentraciones como se puede ver la tabla 5, asegurándonos de que estas muestras sintéticas sean similares a las de las industrias textiles. Esto incluyó tanto muestras simples como compuestas, siguiendo los estándares de muestreo para aguas residuales (Pérez González & Quezada Ortuño, 2024). Antes de cualquier tratamiento, cada muestra se analizó con un espectrofotómetro UV-Vis. Este análisis nos permitió identificar las longitudes de onda donde los colorantes absorben más luz (λ_{max}), un paso crucial para monitorear su degradación (Echeverría-Paredes et al., 2023).

Tabla 5. Diferentes concentraciones de los colorantes.

OrdenEst	Azul	Amarillo	Rojo
1	25 mg	25 mg	25 mg
2	75 mg	25 mg	25 mg
3	25 mg	75 mg	25 mg
4	75 mg	75 mg	25 mg
5	25 mg	25 mg	75 mg
6	75 mg	25 mg	75 mg
7	25 mg	75 mg	75 mg
8	75 mg	75 mg	75 mg
9	50 mg	50 mg	50 mg
10	50 mg	50 mg	50 mg
11	50 mg	50 mg	50 mg

2.2.5 Tratamiento con radiación UV y recirculación

Las muestras caracterizadas se sometieron a un proceso de degradación con radiación UV en un sistema de recirculación. Este sistema estuvo equipado con una lámpara UV y una bomba que aseguró un flujo constante de la muestra a través del reactor. La irradiación UV se aplicó durante 6 horas, bajo condiciones controladas de flujo y temperatura (Martínez Reyes, 2020). Cada 15 minutos, se tomó 1 ml de la muestra para medir su absorbancia y su (λ_{max}) previamente identificadas. La disminución de la absorbancia nos indicará el porcentaje de degradación del colorante.

2.2.6 Efecto de la luz solar

Finalmente, después de la fase UV, se seleccionó la muestra que haya mostrado la mayor degradación y la expusimos directamente a la luz solar natural. Esta parte del experimento buscó evaluar la eficacia de una alternativa más sostenible (Echeverría-Paredes et al.,

2023). A intervalos regulares (por ejemplo, cada hora durante las horas de máxima insolación), se tomaron muestras para medir su absorbancia. Se comparó los resultados bajo radiación UV controlada medida, mediante el uso del espectrofotómetro UV-vis y para luego entender el potencial de la luz solar en la degradación de estos colorantes.

2.2.7 Parámetros de control de calidad de agua

Se seleccionaron tres parámetros básicos de calidad de agua que permiten evaluar cambios asociados a la presencia y degradación de contaminantes provenientes del proceso de teñido: pH, conductividad eléctrica y demanda química de oxígeno (DQO).

El pH se determinó utilizando un pH-metro previamente calibrado. El electrodo fue sumergido en un vaso de precipitación de 100 mL con la muestra, registrándose el valor una vez estabilizado.

La conductividad eléctrica se midió con un conductímetro calibrado antes de cada sesión de análisis. El sensor se introdujo en la muestra siguiendo los procedimientos estándar para asegurar la reproducibilidad.

La DQO se cuantificó mediante el método de digestión en viales cerrados. Para ello, se introdujeron 5 mL de muestra en un vial con reactivos de dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Los viales se calentaron durante dos horas en un termo reactor, permitiendo la oxidación de la materia orgánica. Tras el enfriamiento, la concentración de DQO se determinó por espectrofotometría.

3 Resultados

3.1 Degradación del color Azul

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos en este estudio experimental que permitió analizar cuán eficaz es aplicar este método y cómo fue su comportamiento con cada uno de los colorantes utilizados y sus diferentes mezclas compuestas presentes en las aguas residuales del proceso de teñido de paja toquilla.

Los efectos de la degradación se pueden observar en las diferentes gráficas, las cuales muestran la relación existente entre la concentración de los colorantes y el tiempo de exposición transcurrido.

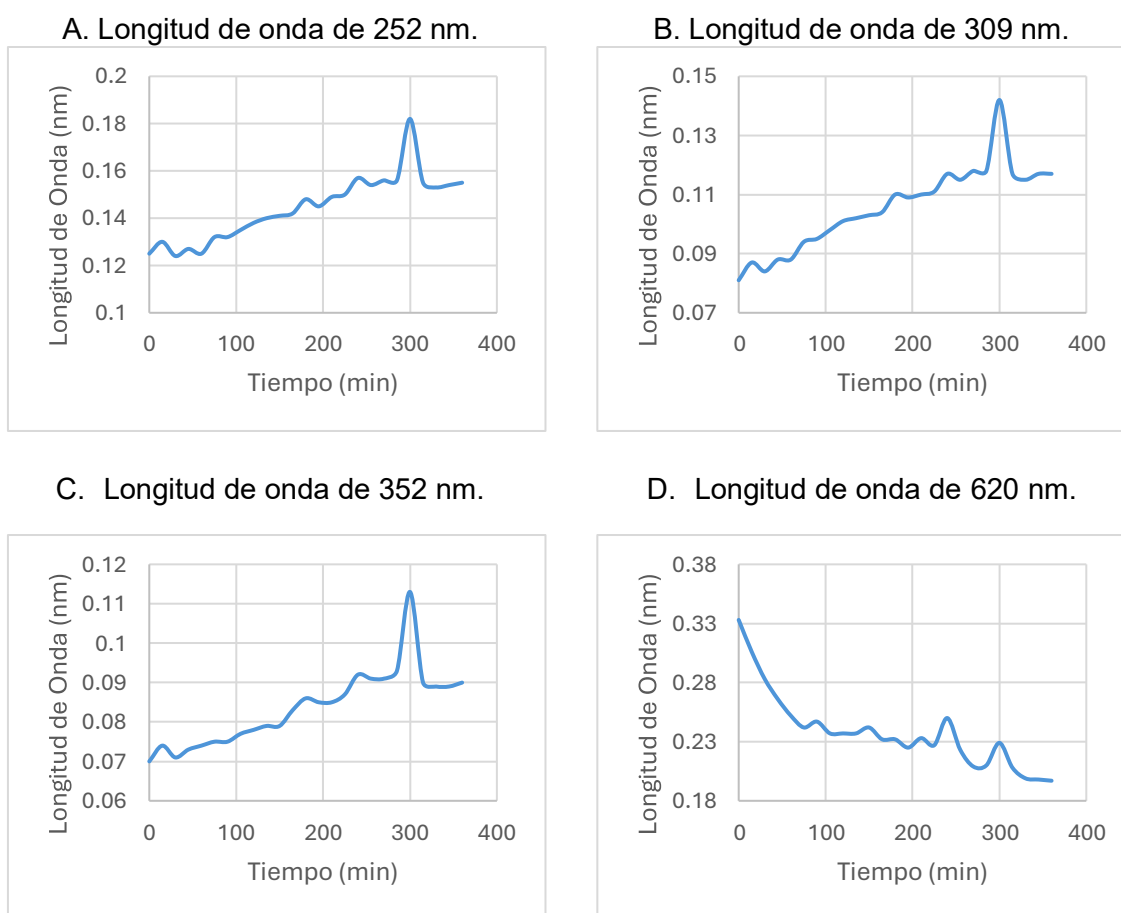


Figura 3. Degradación del colorante Azul a diferentes longitudes de Onda.

En la Figura 3, se muestran las variaciones de absorbancia del colorante azul en las diferentes longitudes de onda analizadas. Para las longitudes de onda de 252 nm, 309 nm y 352 nm, durante los primeros 255 minutos se observó un ligero incremento en la

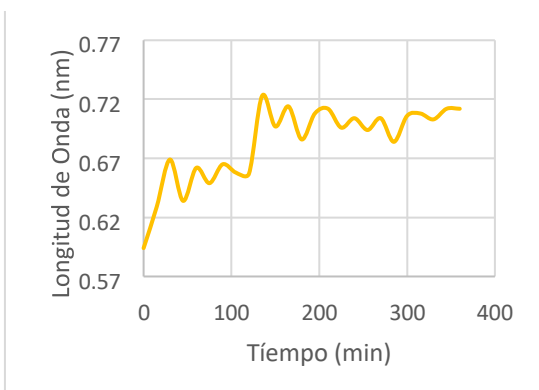
absorbancia, asociado a los procesos simultáneos de adsorción y desorción entre la superficie de la placa de TiO_2 y el colorante. A partir del minuto 285, presentó un aumento brusco, atribuible a un fenómeno marcado de desorción del material previamente retenido en la placa. Posteriormente, desde el minuto 300, se registró notoriamente la absorbancia del material, relacionado con la reanudación del proceso de adsorción. Desde el minuto 315 en adelante, la absorbancia es más lenta pero constante, indicando una estabilización del intercambio entre el colorante y la superficie del catalizador.

En contraste, el comportamiento registrado a 620 nm mostró una tendencia opuesta. Durante los primeros 60 minutos se evidenció una disminución pronunciada de la absorbancia, lo que sugiere una adsorción inicial efectiva del colorante sobre la placa de TiO_2 . Entre los minutos 75 y 225, la variación de la absorbancia fue lenta y acompañada de ligeras fluctuaciones en la concentración del colorante. Desde el minuto 240 hasta el minuto 300 se identificó un comportamiento inconstante, asociado tanto a procesos de adsorción como de desorción del material en la superficie del catalizador. A partir del minuto 315, la absorbancia volvió a disminuir, lo cual puede atribuirse al inicio del efecto fotocatalítico del TiO_2 sobre el colorante azul. Esto confirma que la longitud de onda de 620 nm está directamente relacionada con la tonalidad azul del compuesto evaluado y las tres longitudes de onda que presentan una subida, nos indica que se están creando nuevos compuestos durante la degradación del colorante azul.

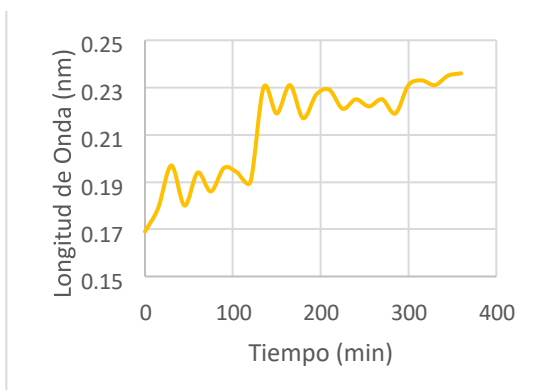
3.2 Degradación del colorante Amarillo

Los efectos de la degradación se pueden observar en las diferentes gráficas, las cuales muestran la relación existente entre la concentración de los colorantes y el tiempo de exposición transcurrido.

A. Longitud de onda de 250 nm.



B. Longitud de onda de 314 nm.



C. Longitud de onda de 370 nm.

D. Longitud de onda de 430 nm.

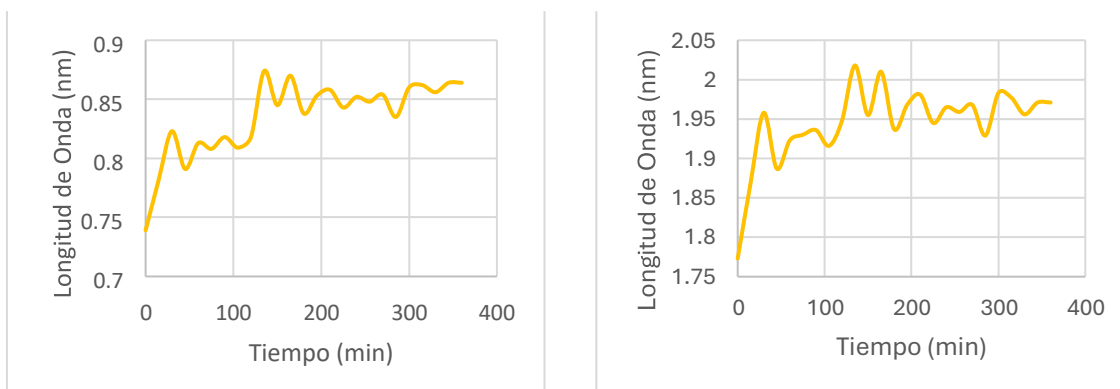


Figura 4. Degradación del colorante Amarillo a diferentes longitudes de Onda.

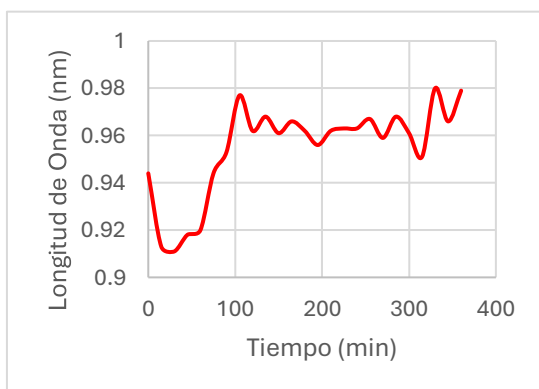
En la Figura 4, se muestran las variaciones de absorbancia del colorante amarillo en las longitudes de onda analizadas (250 nm, 314 nm, 370 nm y 430 nm). Durante los primeros 30 minutos se registró un incremento inicial, atribuible a la desorción del material retenido en la superficie de la placa. Entre los minutos 45 y 105, la absorbancia presentó un comportamiento no lineal, asociado a la interacción simultánea de procesos de adsorción y desorción entre el colorante y el TiO_2 .

Posteriormente, entre los minutos 120 y 165, se observaron fluctuaciones más acentuadas, evidenciando un intercambio continuo entre el compuesto y el material fotocatalítico. Finalmente, a partir del minuto 180, la señal mantuvo una tendencia inestable relacionada con la actividad fotocatalítica del TiO_2 , lo que sugiere que no se produjo una degradación del colorante, sino un incremento.

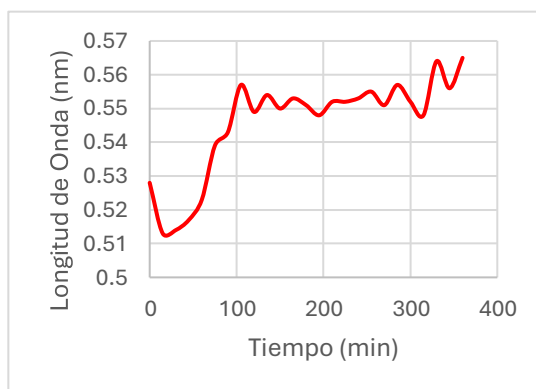
3.3 Degradación del colorante Rojo

Los efectos de la degradación se pueden observar en las diferentes gráficas, las cuales muestran la relación existente entre la concentración de los colorantes y el tiempo de exposición transcurrido.

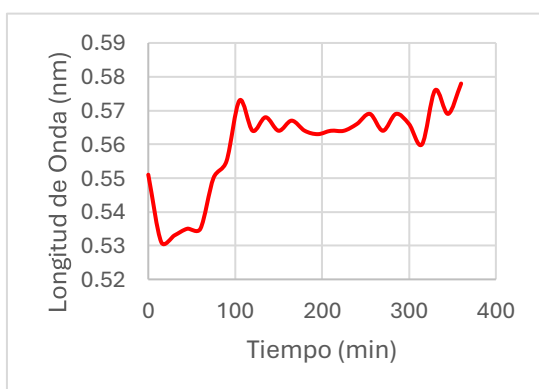
A. Longitud de onda de 256 nm.



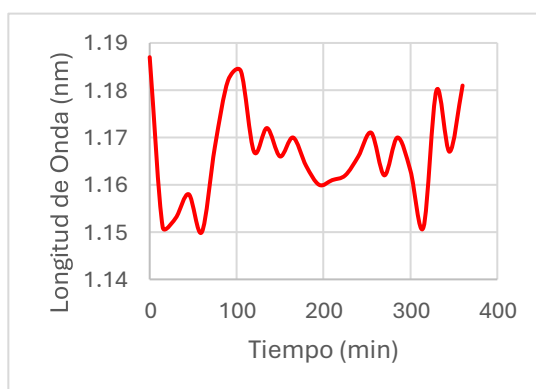
B. Longitud de onda de 272 nm.



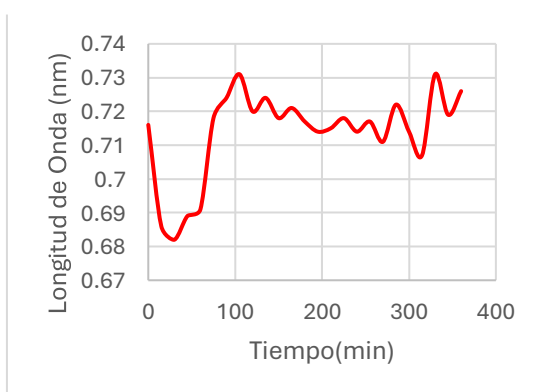
C. Longitud de onda de 362 nm.



D. Longitud de onda de 430 nm.



E. Longitud de onda de 514 nm.



F. Longitud de onda de 554 nm.

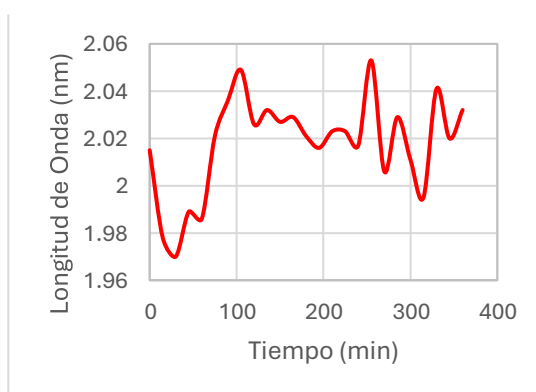


Figura 5. Degradación del colorante Rojo a diferentes longitudes de Onda.

En la Figura 5, se presentan las variaciones de absorbancia del colorante rojo en las longitudes de onda evaluadas (256 nm, 272 nm, 362 nm, 430 nm, 514 nm y 554 nm). Se evidencia que el componente de tonalidad roja presenta dificultades para degradarse.

Durante los primeros 30 minutos se observa una disminución inicial atribuible al proceso de adsorción del colorante sobre la superficie de la placa. Sin embargo, posteriormente se observó una pronunciada subida, lo que indica un fenómeno de desorción del material previamente retenido.

A partir del minuto 105, la señal muestra fluctuaciones constantes derivadas de la alternancia entre adsorción y desorción del colorante en la superficie del TiO_2 . Este comportamiento impide una reducción sostenida de la absorbancia, lo que sugiere que no se produce una degradación efectiva del compuesto. Esta respuesta podría relacionarse con la composición del pigmento rojo, ya que ciertos componentes no presentan una adecuada susceptibilidad a la fotodegradación.

3.4 Diseño experimental

Los resultados del diseño experimental se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del diseño experimental a diferentes concentraciones de cada colorante.

Orden	Azul	Amarillo	Rojo	Observaciones	Evidencia
	mg	mg	mg		Anexos
1	25	25	25	Durante los primeros 195 minutos se observa que los tres colorantes (amarillo, azul y rojo) presentan un comportamiento inicial de estabilización y, posteriormente, una fase de degradación continua. Luego se evidencia un periodo de variaciones atribuibles a procesos de adsorción y desorción sobre la placa, antes de que los colorantes retomen su tendencia de degradación. En cuanto a la reducción de la concentración, los porcentajes obtenidos fueron: 55.75 % para el azul, 17.15 % para el rojo y 6.39 % para el amarillo.	4, 5, 6
2	75	25	25	Los colorantes amarillo y rojo muestran una degradación progresiva hasta aproximadamente el minuto 240. A partir de ese punto, ambos experimentan ciclos de adsorción y desorción sobre la placa, para luego volver a degradarse de manera sostenida. El colorante azul, en cambio, presenta una degradación continua, con únicamente una leve variación asociada a fenómenos de desorción antes de retomar su degradación. Las reducciones de concentración fueron de 57.44 % para el azul, 11.63 % para el rojo y 5.38 % para el amarillo.	7, 8, 9

3	25	75	25	Los colorantes amarillo y rojo muestran una degradación lenta, seguida por un incremento abrupto alrededor del minuto 195 debido a un proceso de desorción. Posteriormente vuelven a degradarse lentamente. En el colorante azul, en cambio, se observa una degradación rápida inicial, con una leve adsorción posterior antes de retomar la disminución de absorbancia. Las reducciones finales fueron: 46.67 % para el azul, 12.36 % para el rojo y 5.51 % para el amarillo.	10, 11, 12
4	75	75	25	Los colorantes amarillo y rojo presentan un aumento de absorbancia debido a la desorción en la placa alrededor del minuto 210. Luego inicia una degradación lenta. El azul muestra una disminución continua hasta el minuto 195, seguida por un aumento por desorción y finalmente una nueva etapa de reducción. Las reducciones obtenidas fueron: 48 % para el azul, 14.04 % para el rojo y 9.14 % para el amarillo.	13, 14, 15
5	25	25	75	El amarillo y el rojo muestran un incremento en absorbancia asociado a desorción hasta el minuto 210; posteriormente comienzan una degradación lenta. El azul, por su parte, se degrada más rápidamente, con solo una leve adsorción y desorción alrededor del minuto 195. Las reducciones finales fueron: 32.63 % para el azul, 6.05 % para el rojo y 5.69 % para el amarillo.	16, 17, 18
6	75	25	75	Los primeros 210 minutos muestran procesos de adsorción y desorción en los colorantes amarillo y rojo. A partir del minuto 225, el amarillo comienza una degradación lenta, mientras que el rojo inicia una degradación más marcada. El azul muestra una degradación constante durante los primeros 225 minutos, seguida de una desorción y luego una degradación lenta. Las reducciones de concentración fueron: 79.62 % para el azul, 59.27 % para el rojo y 4.26 % para el amarillo.	19, 20, 21

7	25	75	75	Durante los primeros 135 minutos se observan fluctuaciones asociadas a adsorción y desorción en los tres colorantes. Después de este periodo, el azul presenta una degradación continua, mientras que el rojo y el amarillo experimentan variaciones asociadas a la interacción con la placa antes de degradarse. Las reducciones obtenidas fueron: 87.05 % para el azul, 20.48 % para el rojo y 16.72 % para el amarillo.	22, 23, 24
8	75	75	75	Este experimento no presentó resultados consistentes con las tendencias observadas en los demás ensayos, por lo que no se consideran representativos para el análisis comparativo.	–
9	50	50	50	Durante los primeros 240 minutos los colorantes amarillo y rojo presentan adsorción y desorción en la placa. En contraste, el azul muestra una degradación continua desde el inicio del ensayo. Las reducciones fueron: 63.33 % para el azul, 20.06 % para el rojo y 5.54 % para el amarillo.	25, 26, 27
10	50	50	50	Los primeros 150 minutos muestran procesos de adsorción y desorción en los colorantes amarillo y rojo. Posteriormente, el rojo inicia fluctuaciones más marcadas debido a desorción del material, lo que genera incrementos de absorbancia. Las reducciones obtenidas fueron: 59.52 % para el azul, 8.04 % para el rojo y 5.26 % para el amarillo.	28, 29, 30
11	50	50	50	Se presentan 255 minutos de oscilaciones entre adsorción y desorción en el rojo y el amarillo. El azul comienza una degradación continua desde el inicio, con solo pequeñas variaciones. Las reducciones finales fueron: 77.12 % para el azul, 10.71 % para el rojo y 0.41 % para el amarillo.	31, 32, 33

3.5 Degradación del colorante azul y la combinación (-1,-1,-1) a radiación solar

Los resultados del diseño experimental la combinación (-1, -1, -1) y del colorante azul sometidos a radiación solar se muestran en la tabla 7.

Las gráficas correspondientes a estos experimentos están en los anexos.

Tabla 7. Resultados del colorante Azul y la combinación a radiación solar.

Radiación Solar	%	Observaciones
-----------------	---	---------------

Colorante Solo	AZUL	10	Los primeros 150 minutos de estabilización entre adsorción y desorción en la placa, a partir del minuto 165 se dio una degradación lenta del colorante azul. Reducción de la concentración en 43.56% del azul a radiación solar intensa.
Combinación (-1, -1, -1)	AZUL	50	Durante los primeros 75 minutos se observa un proceso de desorción del material presente en la placa. A partir del minuto 90, el colorante amarillo y el rojo presentan una degradación lenta, mientras que en el colorante azul la disminución es más constante. Posteriormente, después del minuto 225, se registra una caída abrupta en la absorbancia de los tres colorantes, lo que evidencia una degradación más marcada. Reducción de la concentración en 92.33% del azul, 75.27 del rojo y 67.98 del amarillo a radiación solar intensa.
	ROJO	25	
	AMARILLO	50	

3.6 Parámetros de calidad de agua.

En las Tablas 8 y 9 se presentan los valores de pH, conductividad y DQO obtenidos en las muestras que mostraron la mayor eficiencia de degradación. Se incluyen los resultados correspondientes al colorante azul y a la combinación (-1, -1, -1), comparando sus valores antes y después del proceso.

Tabla 8. Resultados obtenidos de laboratorio de pH, DQO y conductividad eléctrica.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Azul		Combinación (Az50Am50-Ro25)	
			Inicial	Final	Inicial	Final
Potencial de hidrógeno	pH	-	6.78	7.44	5.61	6.56
Conductividad eléctrica	-	μS	70.2	86.9	51.2	53.7
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	107.23	17.57	140.68	51.02

Tabla 9. Límites máximos permisibles de pH y DQO.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Potencial de hidrógeno	pH	-	6-9
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200

Nota. Tomado de *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)*, Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015.

4 Conclusiones

A partir del desarrollo del presente estudio se determinó que el colorante azul fue el que presentó mejores resultados de degradación durante el sistema de recirculación y exposición a radiación solar. Este comportamiento también se evidenció en las mezclas evaluadas con diferentes proporciones de colorante azul, amarillo y rojo, donde la presencia del azul favoreció la eficiencia del proceso fotocatalítico.

Respecto a los parámetros de calidad del agua, se comprobó que los valores obtenidos cumplen con la normativa nacional vigente. La Demanda Química de Oxígeno (DQO) inicial fue de 107 mg/L para el colorante azul y 140 mg/L para la mezcla, mientras que los valores finales disminuyeron a 17 mg/L y 51 mg/L, respectivamente. Ambos resultados se encuentran por debajo del límite máximo permisible de 200 mg/L, lo que indica que el efluente tratado puede ser descargado sin generar afectaciones significativas al ambiente. En la evaluación individual de los colorantes, el azul mostró la mayor capacidad de degradación, atribuible a su composición química. Por el contrario, el colorante amarillo no logró degradarse de manera satisfactoria en todas sus longitudes de onda, y el rojo no presentó degradación apreciable. La ausencia de reducción en la absorbancia, acompañada de incrementos en algunas longitudes de onda, sugiere la posible formación de nuevos compuestos intermedios durante el proceso fotocatalítico.

En el caso de las combinaciones, se observaron fluctuaciones significativas en las longitudes de onda analizadas, producto de los procesos de adsorción y desorción sobre la superficie del TiO_2 . En una etapa inicial, el sistema tiende a estabilizarse, para posteriormente evidenciar la degradación progresiva de los colorantes presentes en la mezcla.

5 Referencias

- Agilent Technologies. (2024). *The Basics of UV-Vis Spectrophotometry*.
<https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397enagilent.p>
- Azanaw, A., Getahun, M., & Tebebu, H. (2022). Review on industrial textile wastewater treatment technologies. *Environmental Pollution and Climate Change*, 2(1), 1-10.
- Baycan Parilti, N., & Akten, D. (2011). Optimization of TiO₂/Fe(III)/solar UV conditions for the removal of organic contaminants in pulp mill effluents. *Desalination*, 265(1–3), 37–42. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2010.07.027>
- Benjelloun, M., El Ghaich, H., & El-Sayed, E. (2021). Current advances in the treatment of textile wastewater: A comprehensive review. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102379.
- Broccoli, F., Paparo, R., Iesce, M. R., Di Serio, M., & Russo, V. (2023). Heterogeneous photodegradation reaction of phenol promoted by TiO₂: A kinetic study. *ChemEngineering*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7020027>
- Camelino, S. O., Minchiotti, M., Bariles, R., Padilla, R. L., & Colazo, J. (2018). Optimización de un procedimiento para la determinación de oro mediante espectrofotometría UV/Vis. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(2), e12005.
<https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0342>
- Cui, J., Zhang, F., Li, H., Cui, J., Ren, Y., & Yu, X. (2020). Recent Progress in Biochar-Based Photocatalysts for Wastewater Treatment: Synthesis, Mechanisms, and Applications. *Applied Sciences*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app10031019>
- Díaz Bravo, P. (2023). Cinética de degradación de colorantes utilizados en la industria textil mediante la fotocatálisis solar heterogénea. *Revistas de Investigación - UNFV*, 14(2), 65-74. <https://revistas.unfv.edu.pe/RCV/article/download/1522/2270/7915>
- Donkadokula, N. Y., Kola, A. K., Naz, I., & Saroj, D. (2020). A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(3), 543-560. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09543-z>
- Dutta, P., Rabbi, M., Sufian, M., & Mahjebin, S. (2022). Effects of textile dyeing effluent on the environment and its treatment: A review. *Engineering and Applied Science Letters (EASL)*, 5, 1-17. <https://pisrt.org/psr-press/journals/easl/05-vol-5-2022-issue->

[1/effects-of-textile-dyeing-effluent-on-the-environment-and-its-treatment-a-review/](http://www.scielo.org/co/scielo.php?pid=S0121-74882023000100099&script=sci_arttext)

Echeverría-Paredes, P., Orellana-Iñiguez, J., Tonon, M. D., & Pinos-Vélez, V. (2023). Tratamiento de efluentes coloreados provenientes del teñido de Paja Toquilla mediante un proceso Fenton optimizado. *Ciencia en Desarrollo*, 14(1), 99-110.

http://www.scielo.org/co/scielo.php?pid=S0121-74882023000100099&script=sci_arttext

Fajardo, J. J., Caicedo, R., Pablo, J., & Preparado, P. (2018). Curva de calibración. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca (GADM Cuenca). (2023). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Cuenca 2020-2030 (Actualización)*. [Consulta este documento en el sitio web oficial del GADM Cuenca].

Kothari, R., Yadav, A., Garg, H., & Kaith, B. S. (2023). Advances in removal of dyes from textile industry wastewater using sustainable approaches: A review.

Environmental Science and Pollution Research, 30(20), 45869-45892.

Macías, T. M. D., Ruiz, J. G. G., & Pedraza, L. G. (2023). Producción del Sombrero de Paja Toquilla en el contexto del desarrollo local comunitario. *Revista de ciencias sociales*, 29(8), 408-420. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9219716>

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

Martínez Reyes, L. A. (2020). *Desarrollo de un fotocatalizador para la degradación de colorantes en aguas residuales textiles* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la UNAM.

Pérez González, B. A., & Quezada Ortuño, S. E. (2024). *Degradación de colorantes presentes en aguas residuales provenientes del proceso de teñido del sombrero de paja toquilla* [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. Dspace de la Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15275>

Salazar Ramírez, M. (2023). *Evaluación de la eficiencia de procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil* [Tesis de maestría, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio UMSS.

Sudarshan, S., Harikrishnan, S., RathiBhuvaneswari, G., Alamelu, V., Aanand, S., Rajasekar, A., & Govarthan, M. (2023). Impact of textile dyes on human health and bioremediation of textile industry effluent using microorganisms: Current status and future prospects. *Journal of applied microbiology*, 134(2),

lxac064. <https://academic.oup.com/jambio/article-abstract/134/2/lxac064/6918838>

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and

constituents of synthetic effluents: A critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1193-1226.
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>

6 Anexos

Anexo 1. Tabla de degradación del colorante Azul.

Tiempo		Longitud de onda		
min	252 nm	309 nm	352 nm	620 nm
0	0.125	0.081	0.07	0.333
15	0.13	0.087	0.074	0.306
30	0.124	0.084	0.071	0.283
45	0.127	0.088	0.073	0.266
60	0.125	0.088	0.074	0.252
75	0.132	0.094	0.075	0.242
90	0.132	0.095	0.075	0.247
105	0.135	0.098	0.077	0.237
120	0.138	0.101	0.078	0.237
135	0.14	0.102	0.079	0.237
150	0.141	0.103	0.079	0.242
165	0.142	0.104	0.083	0.232
180	0.148	0.11	0.086	0.232
195	0.145	0.109	0.085	0.225
210	0.149	0.11	0.085	0.233
225	0.15	0.111	0.087	0.227
240	0.157	0.117	0.092	0.25
255	0.154	0.115	0.091	0.223
270	0.156	0.118	0.091	0.209
285	0.156	0.118	0.093	0.21
300	0.182	0.142	0.113	0.229
315	0.155	0.117	0.09	0.208
330	0.153	0.115	0.089	0.199

345	0.154	0.117	0.089	0.198
360	0.155	0.117	0.09	0.197

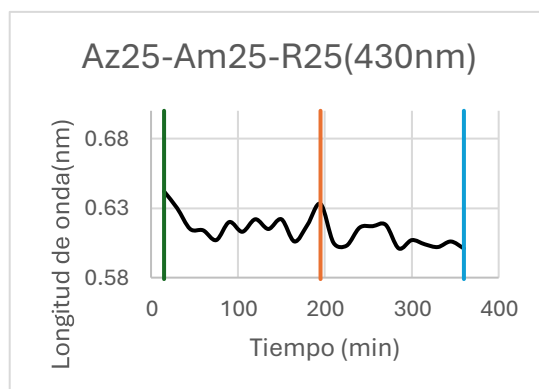
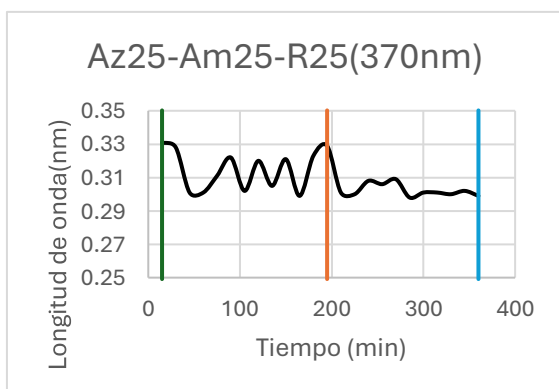
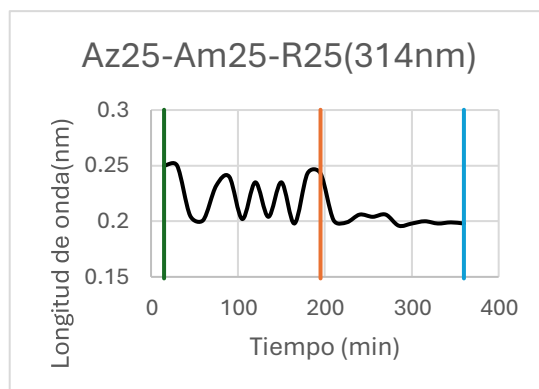
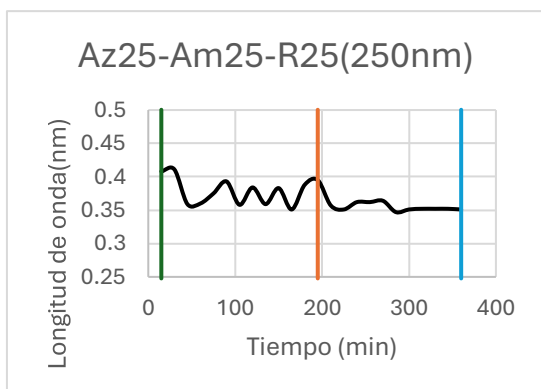
Anexo 2. Tabla de degradación del colorante Amarillo.

Tiempo	Longitud de onda			
min	250 nm	314 nm	370 nm	430 nm
0	0.594	0.169	0.739	1.773
15	0.629	0.179	0.782	1.87
30	0.669	0.197	0.823	1.958
45	0.634	0.18	0.791	1.887
60	0.662	0.194	0.813	1.923
75	0.649	0.186	0.808	1.93
90	0.665	0.196	0.818	1.936
105	0.658	0.194	0.809	1.916
120	0.657	0.19	0.818	1.948
135	0.723	0.23	0.874	2.018
150	0.697	0.219	0.845	1.955
165	0.714	0.231	0.87	2.01
180	0.686	0.217	0.838	1.937
195	0.708	0.227	0.853	1.968
210	0.712	0.229	0.858	1.981
225	0.696	0.221	0.843	1.945
240	0.704	0.225	0.852	1.965
255	0.694	0.222	0.848	1.959
270	0.704	0.225	0.854	1.968
285	0.684	0.219	0.835	1.929
300	0.706	0.231	0.86	1.983
315	0.708	0.233	0.862	1.977
330	0.703	0.231	0.856	1.956
345	0.712	0.235	0.864	1.971
360	0.712	0.236	0.864	1.971

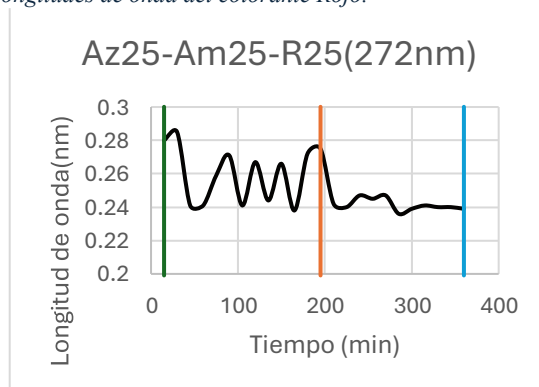
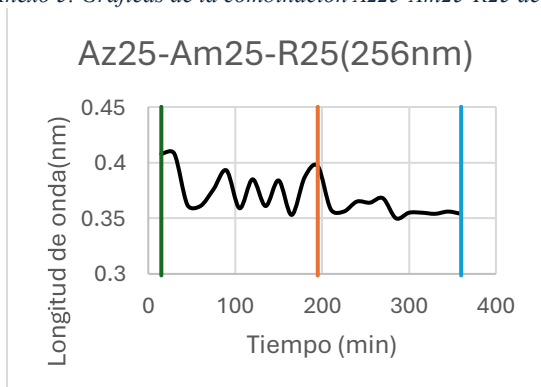
Anexo 3. Tabla de degradación del colorante Rojo.

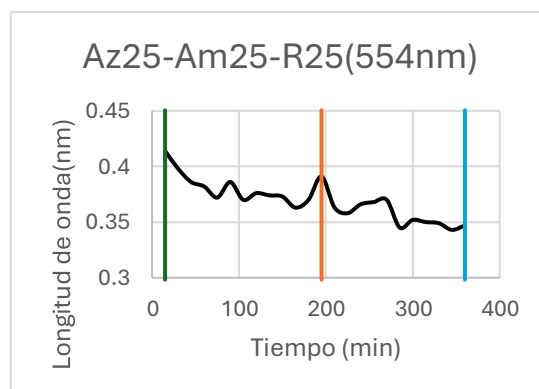
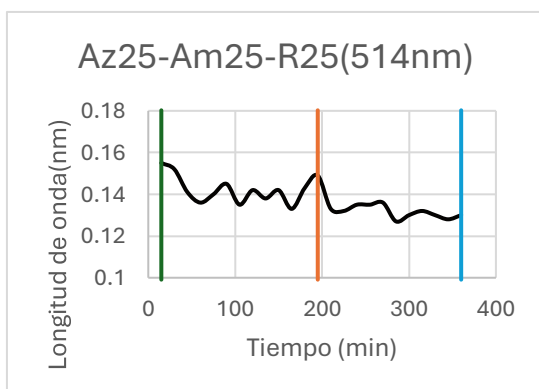
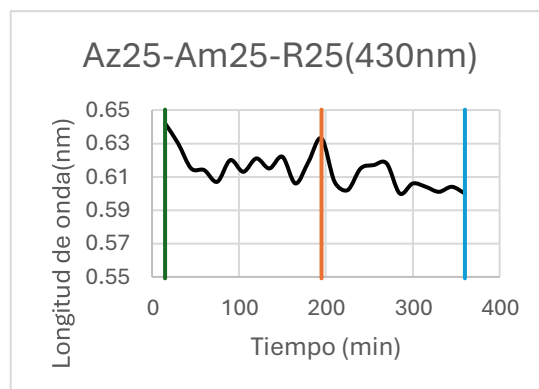
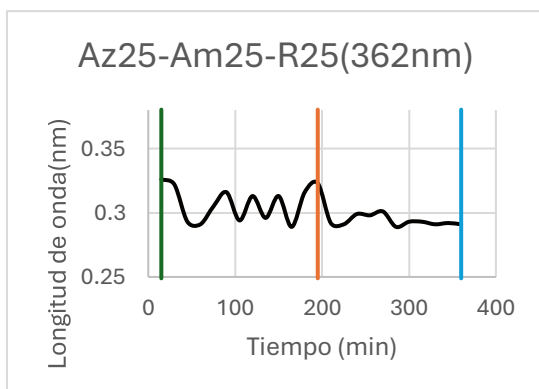
Tiempo		Longitud de onda				
min	256 nm	272 nm	362 nm	430 nm	514 nm	554 nm
0	0.944	0.528	0.551	1.187	0.716	2.015
15	0.913	0.513	0.531	1.151	0.686	1.978
30	0.911	0.514	0.533	1.153	0.682	1.97
45	0.918	0.517	0.535	1.158	0.689	1.989
60	0.92	0.523	0.535	1.15	0.691	1.986
75	0.944	0.539	0.55	1.168	0.718	2.021
90	0.953	0.543	0.555	1.182	0.724	2.036
105	0.977	0.557	0.573	1.184	0.731	2.049
120	0.962	0.549	0.564	1.167	0.72	2.026
135	0.968	0.554	0.568	1.172	0.724	2.032
150	0.961	0.55	0.564	1.166	0.718	2.027
165	0.966	0.553	0.567	1.17	0.721	2.029
180	0.962	0.551	0.564	1.164	0.717	2.021
195	0.956	0.548	0.563	1.16	0.714	2.016
210	0.962	0.552	0.564	1.161	0.715	2.023
225	0.963	0.552	0.564	1.162	0.718	2.023
240	0.963	0.553	0.566	1.166	0.714	2.017
255	0.967	0.555	0.569	1.171	0.717	2.053
270	0.959	0.551	0.564	1.162	0.711	2.006
285	0.968	0.557	0.569	1.17	0.722	2.029
300	0.961	0.552	0.566	1.163	0.714	2.011
315	0.951	0.548	0.56	1.151	0.707	1.995
330	0.98	0.564	0.576	1.18	0.731	2.041
345	0.966	0.556	0.569	1.167	0.719	2.02
360	0.979	0.565	0.578	1.181	0.726	2.032

Anexo 4. Graficas de la combinación Az25-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.

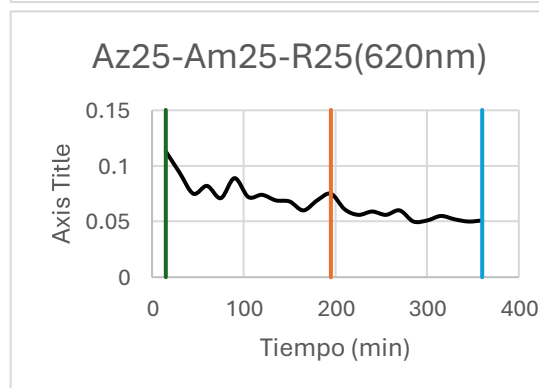
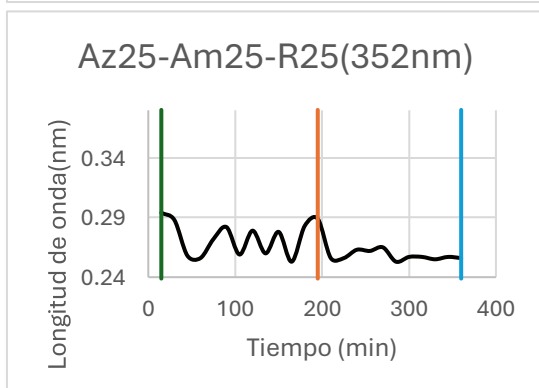
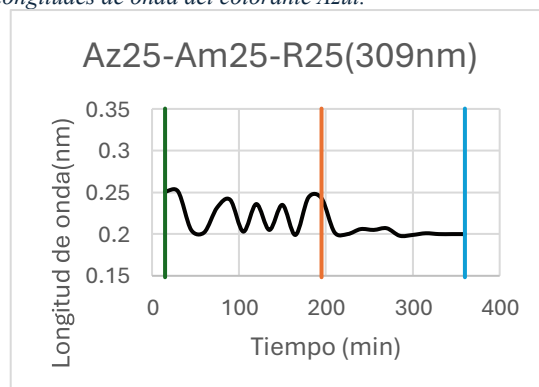
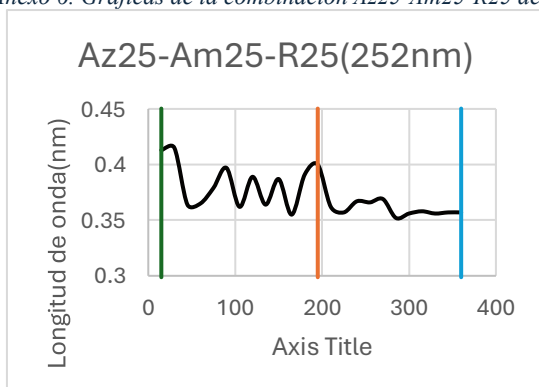


Anexo 5. Graficas de la combinación Az25-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.

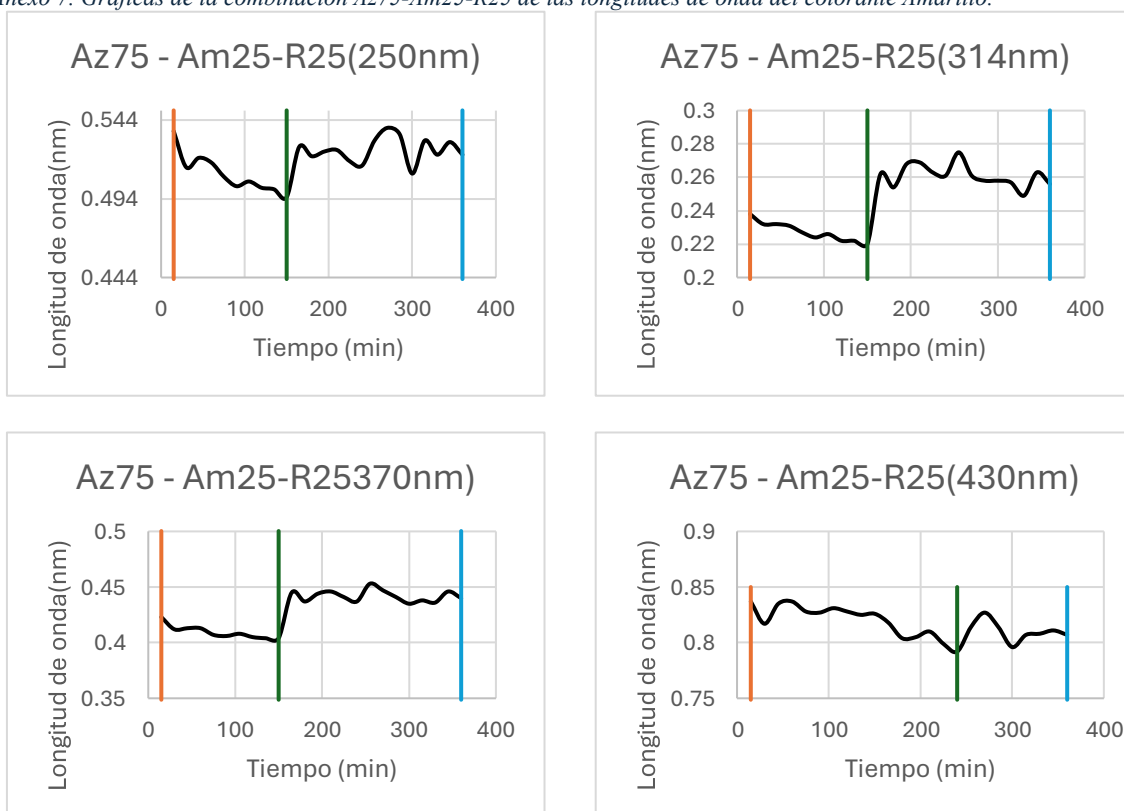




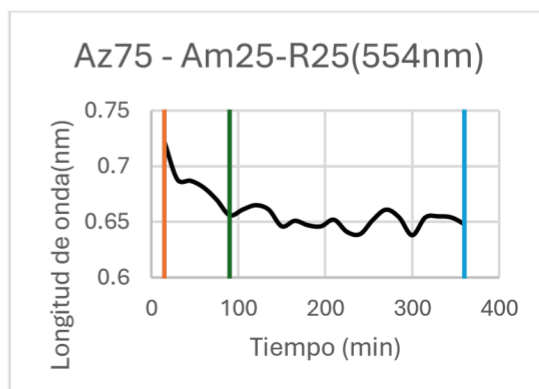
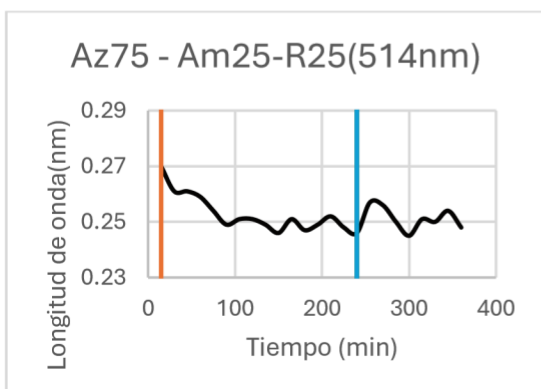
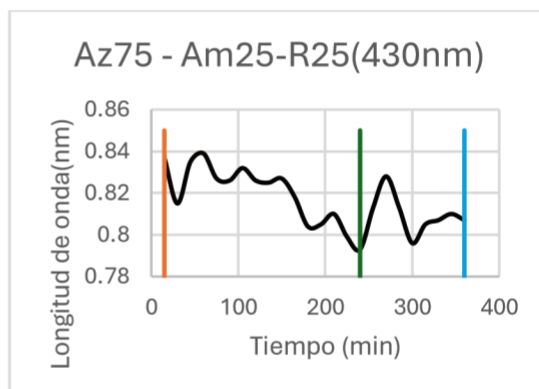
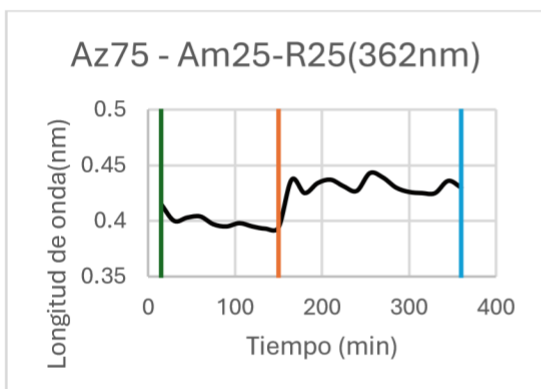
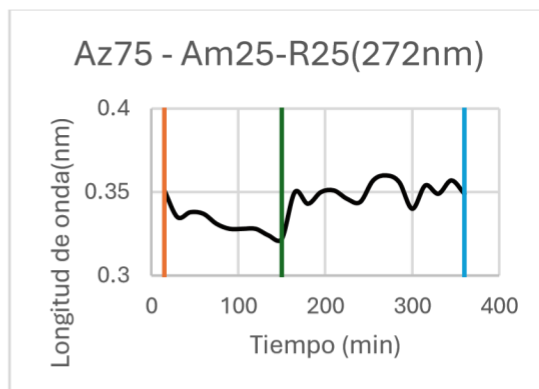
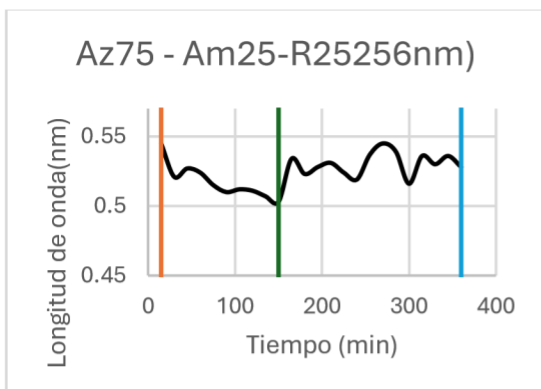
Anexo 6. Graficas de la combinación Az25-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.



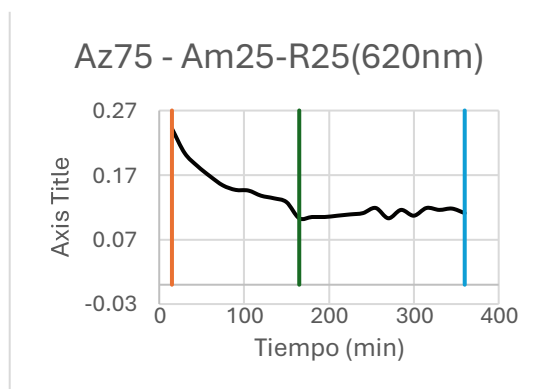
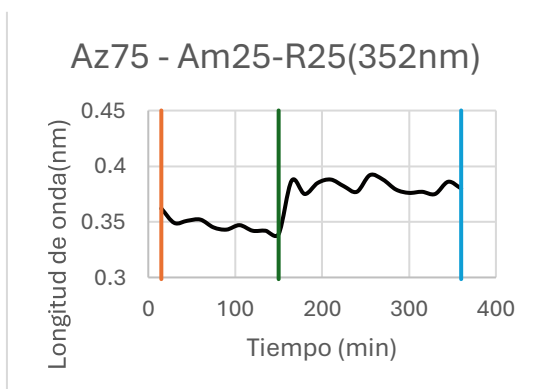
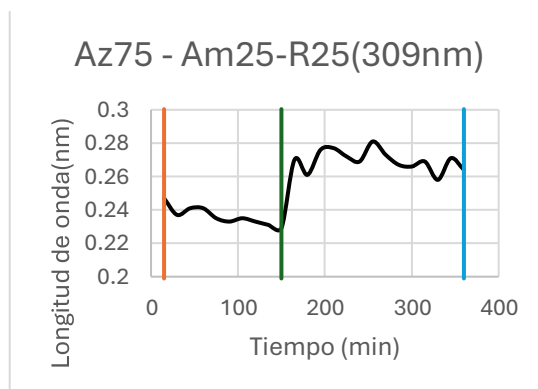
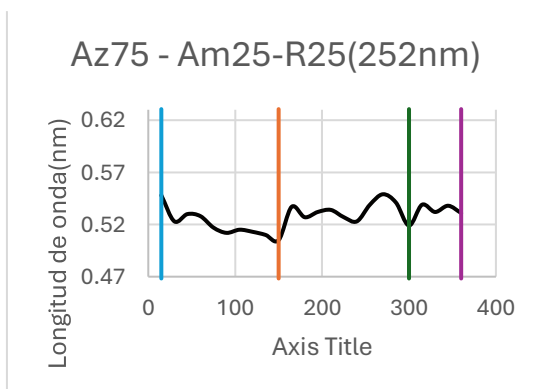
Anexo 7. Graficas de la combinación Az75-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



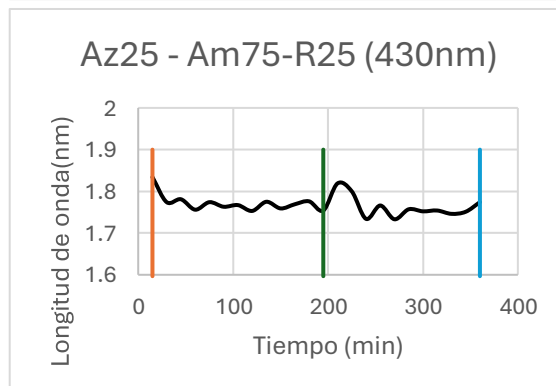
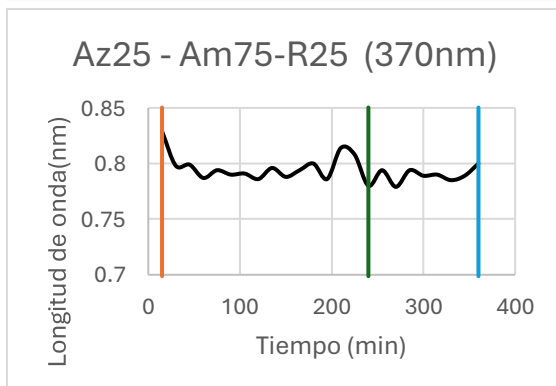
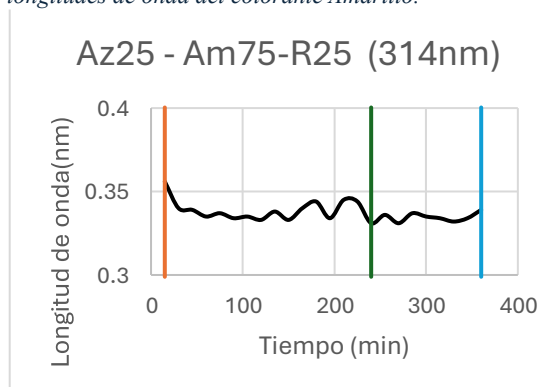
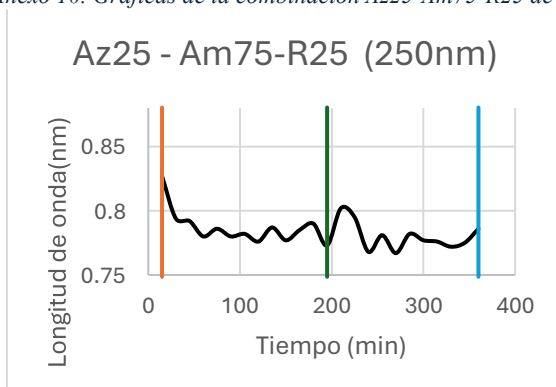
Anexo 8. Graficas de la combinación Az75-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



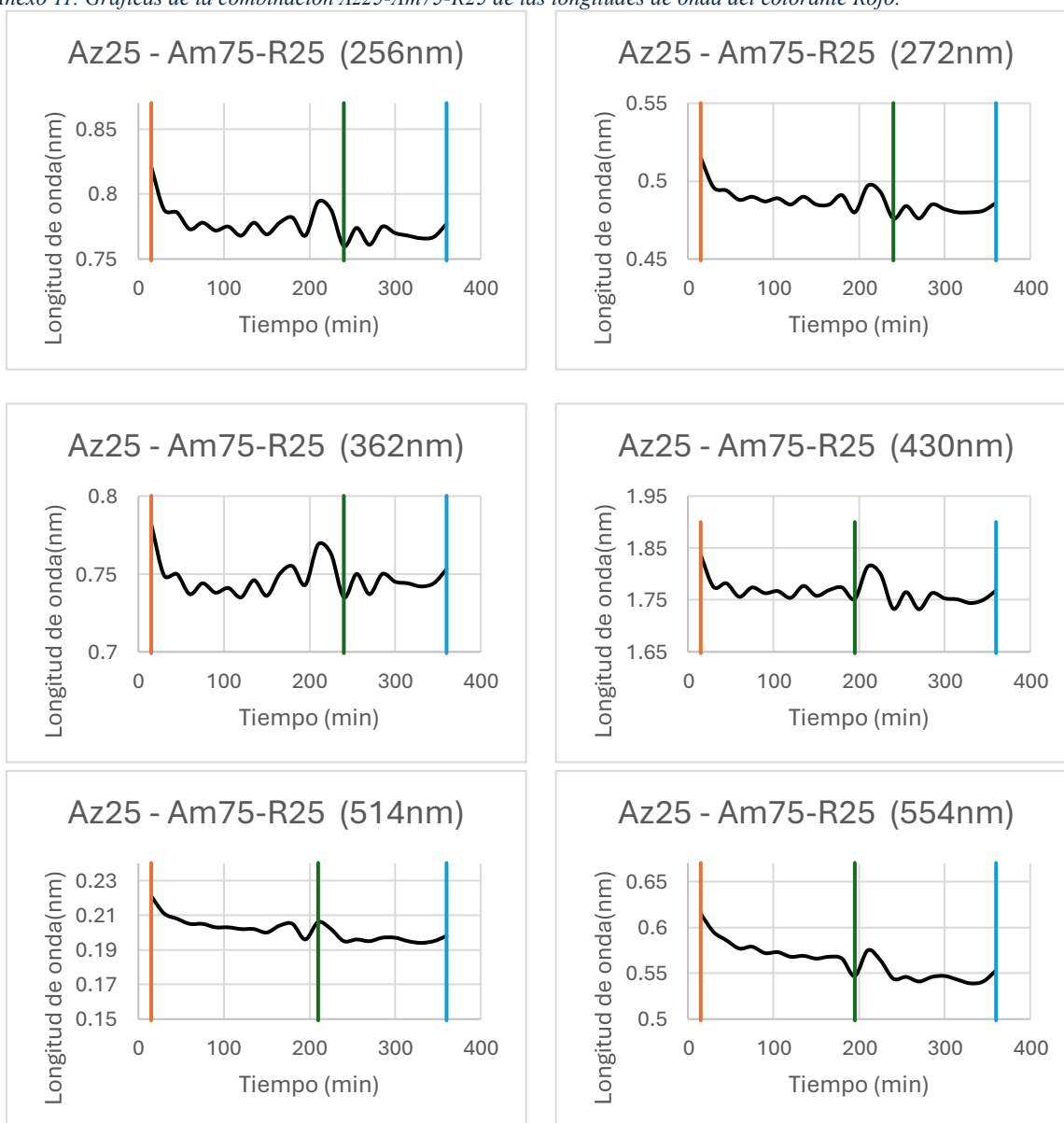
Anexo 9. Graficas de la combinación Az75-Am25-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.



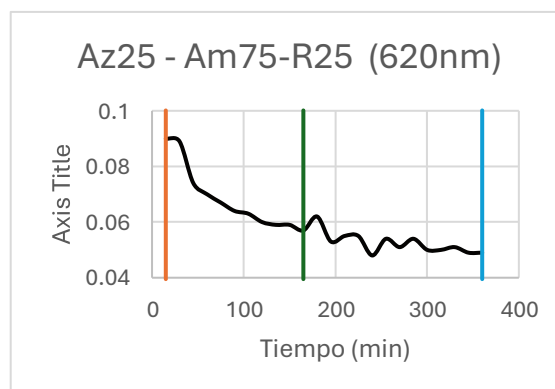
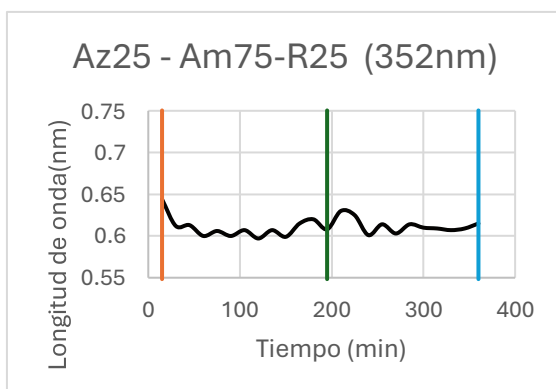
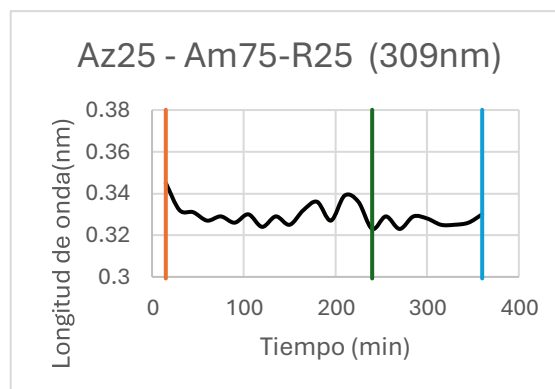
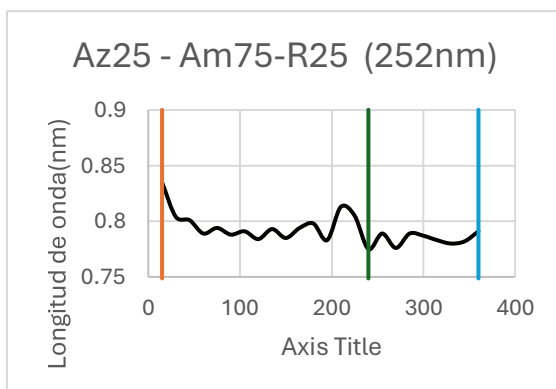
Anexo 10. Graficas de la combinación Az25-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



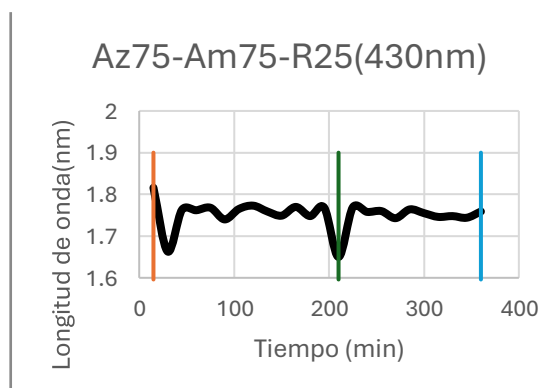
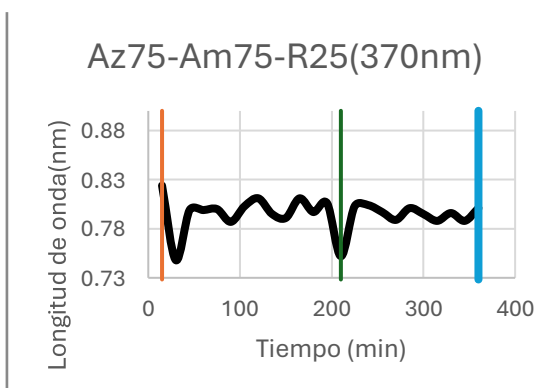
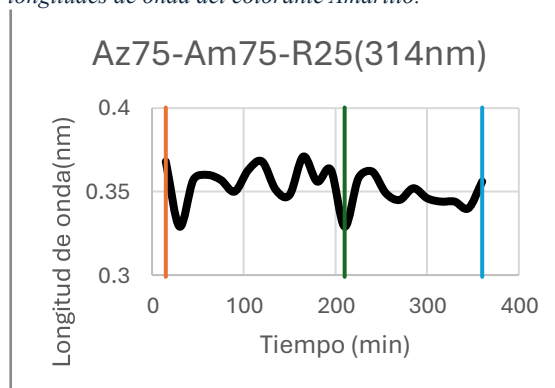
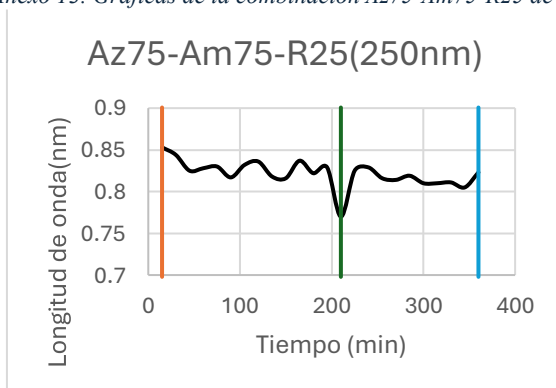
Anexo 11. Graficas de la combinación Az25-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



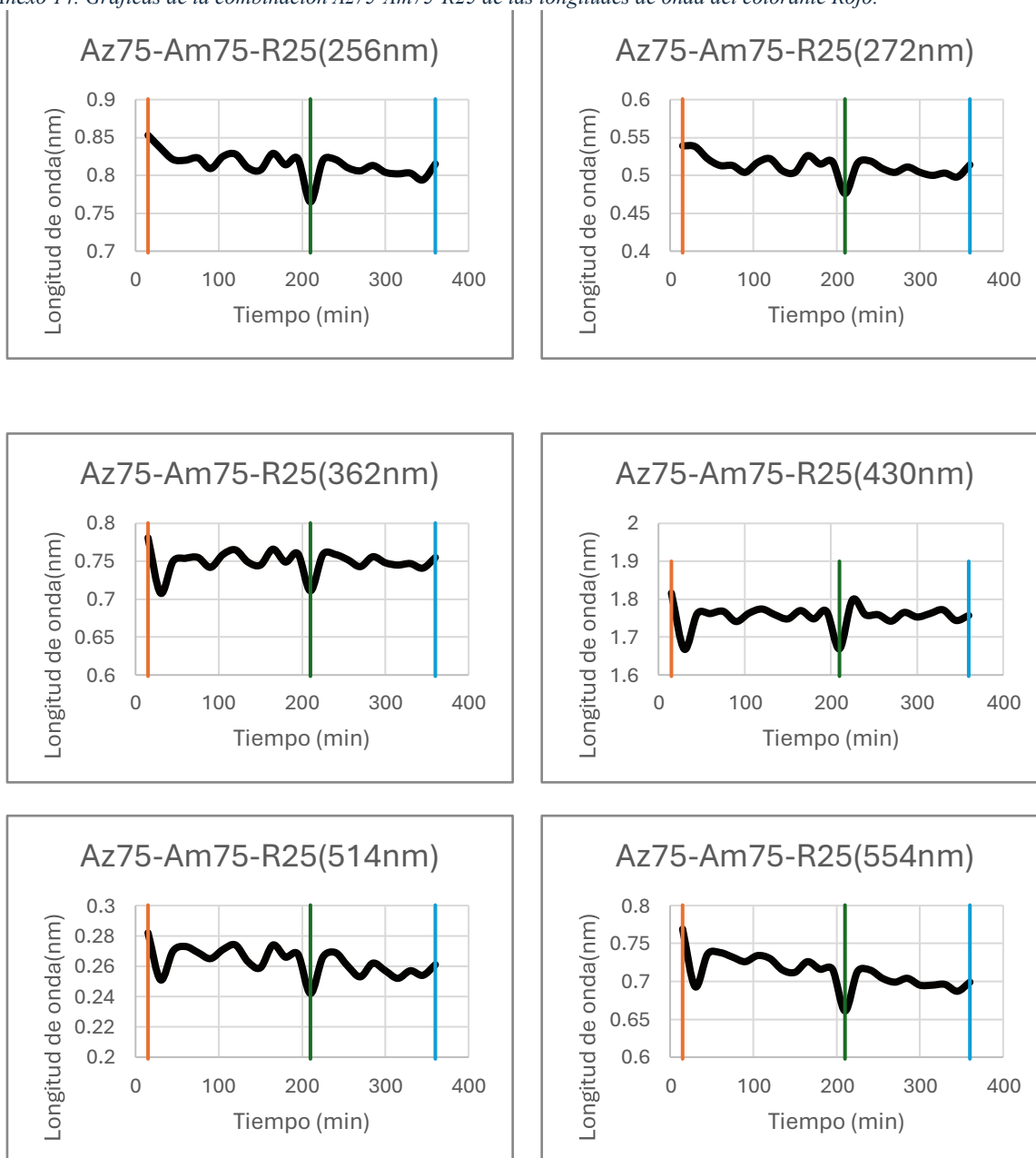
Anexo 12. Graficas de la combinación Az25-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.



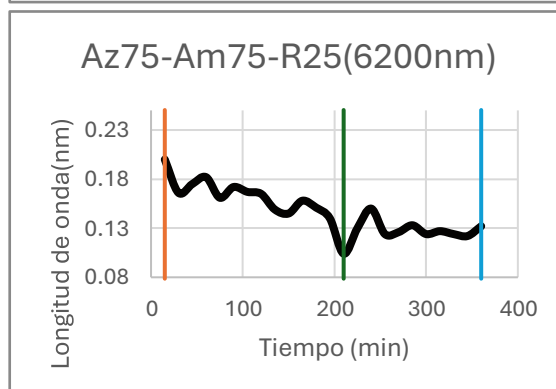
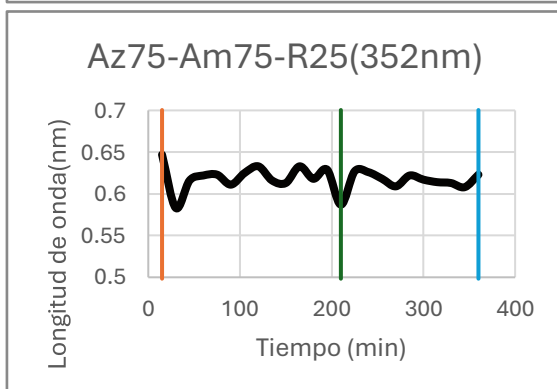
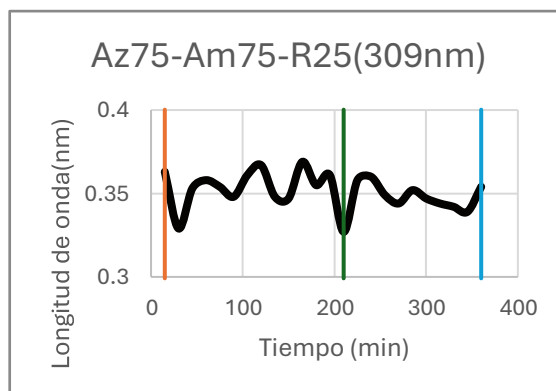
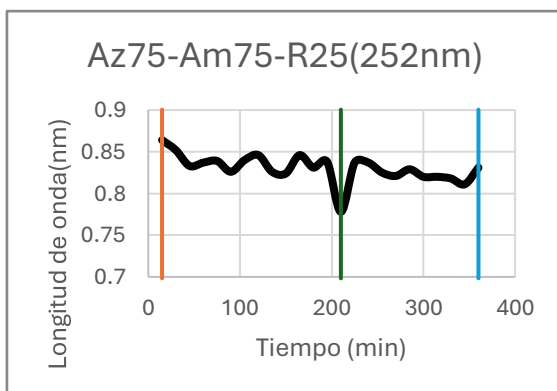
Anexo 13. Graficas de la combinación Az75-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



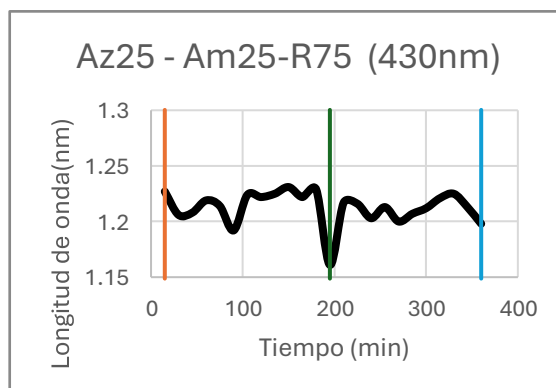
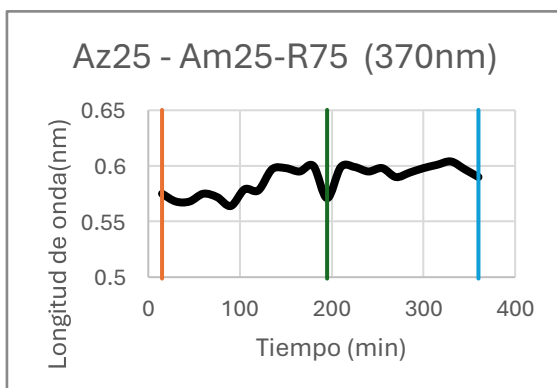
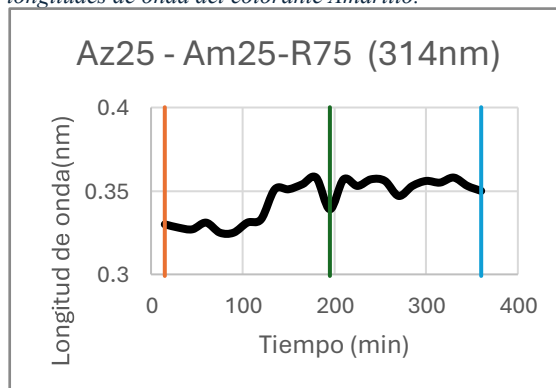
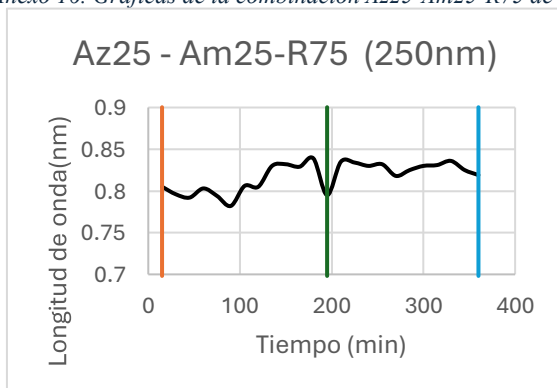
Anexo 14. Graficas de la combinación Az75-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



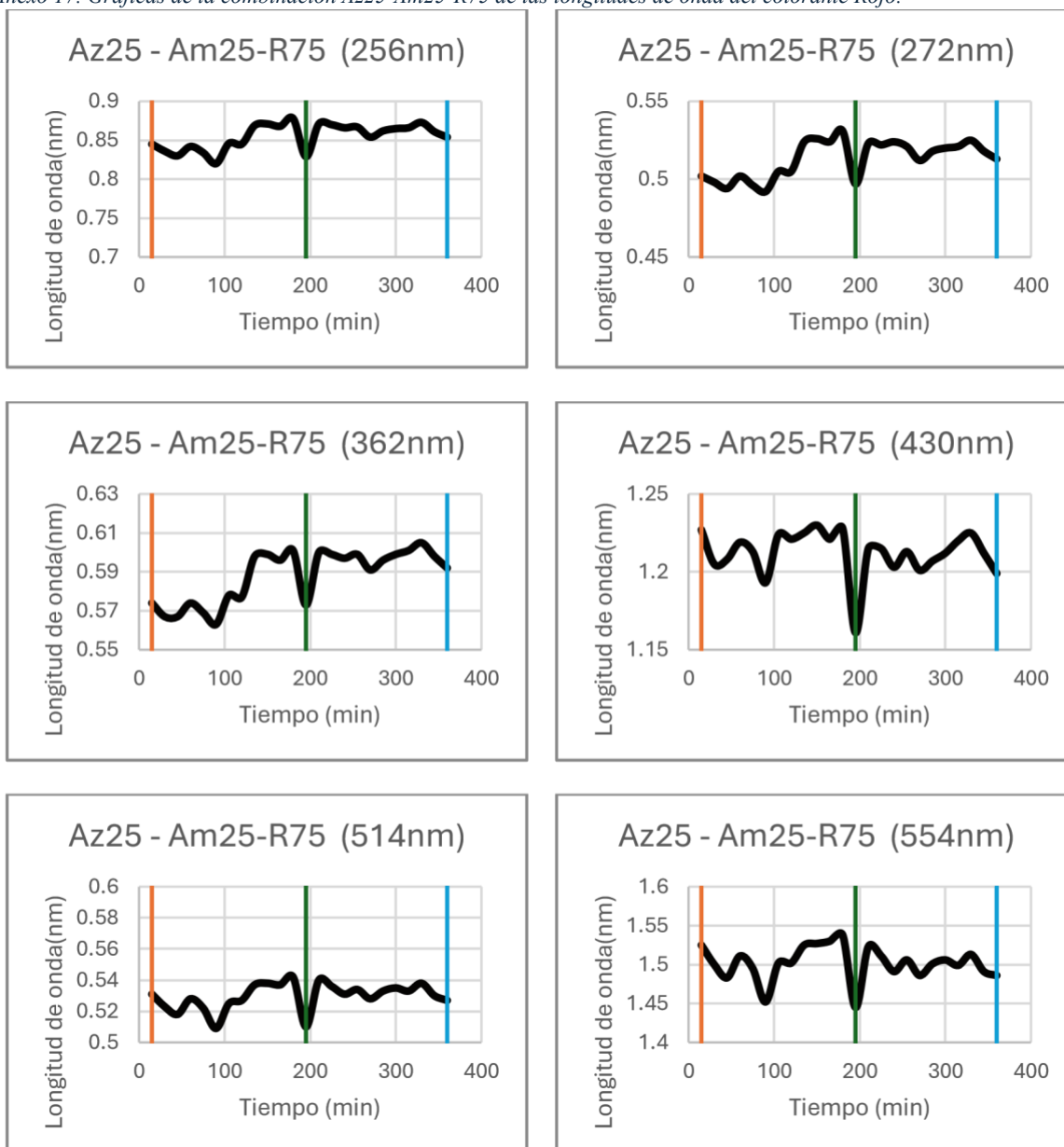
Anexo 15. Graficas de la combinación Az75-Am75-R25 de las longitudes de onda del colorante Azul.



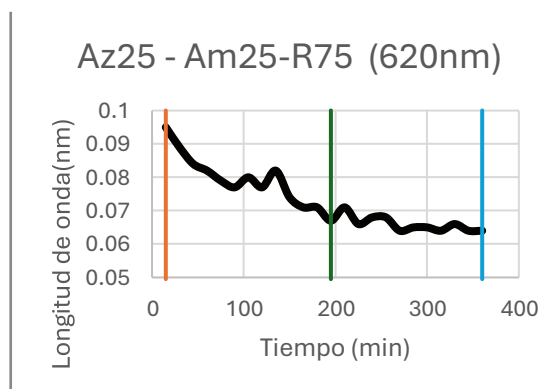
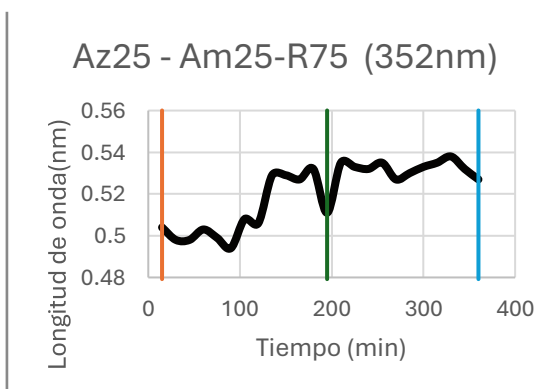
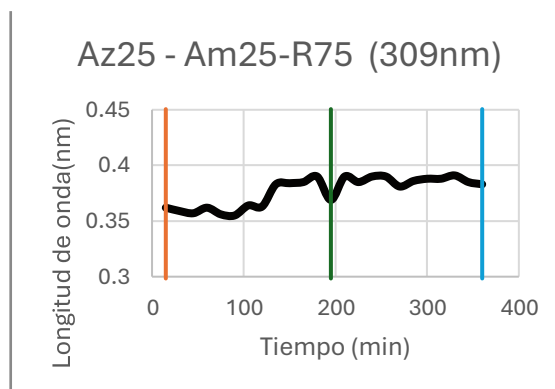
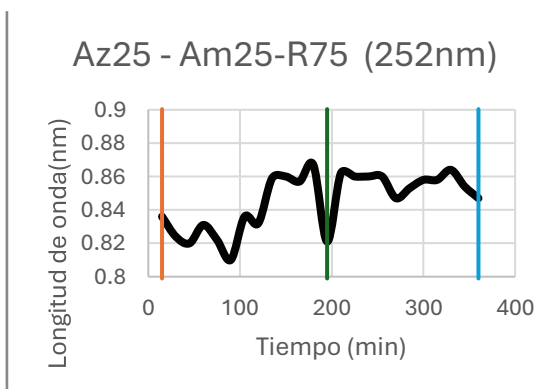
Anexo 16. Graficas de la combinación Az25-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



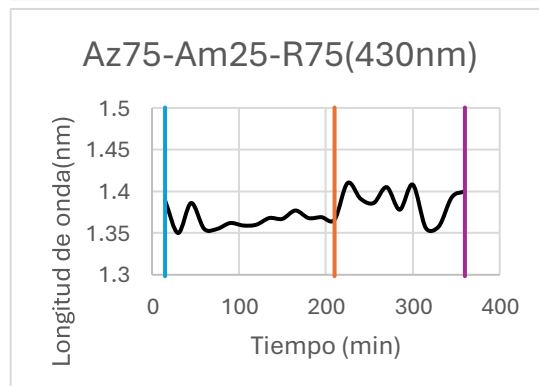
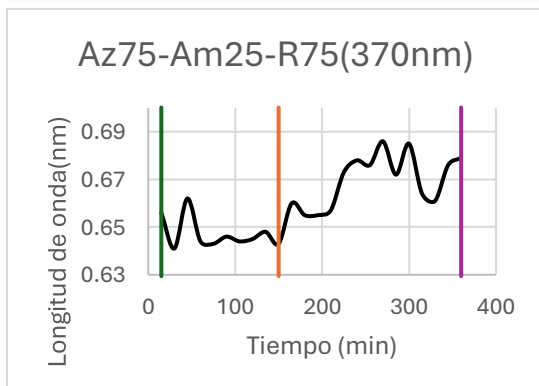
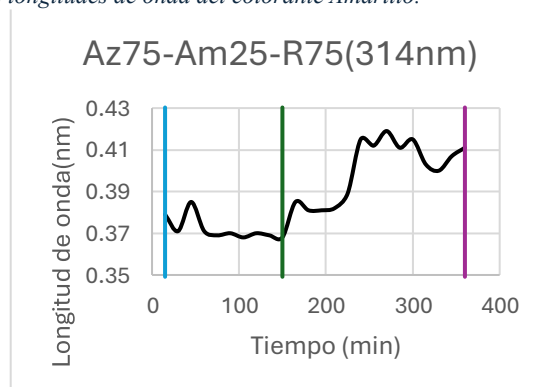
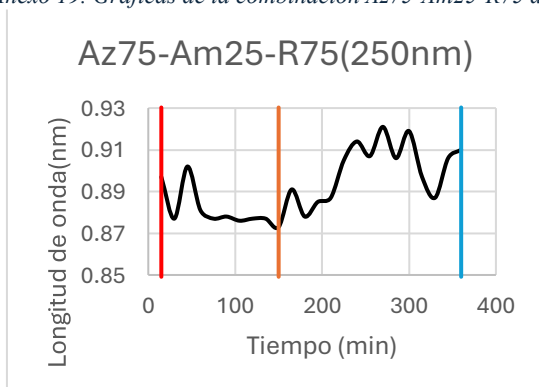
Anexo 17. Graficas de la combinación Az25-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



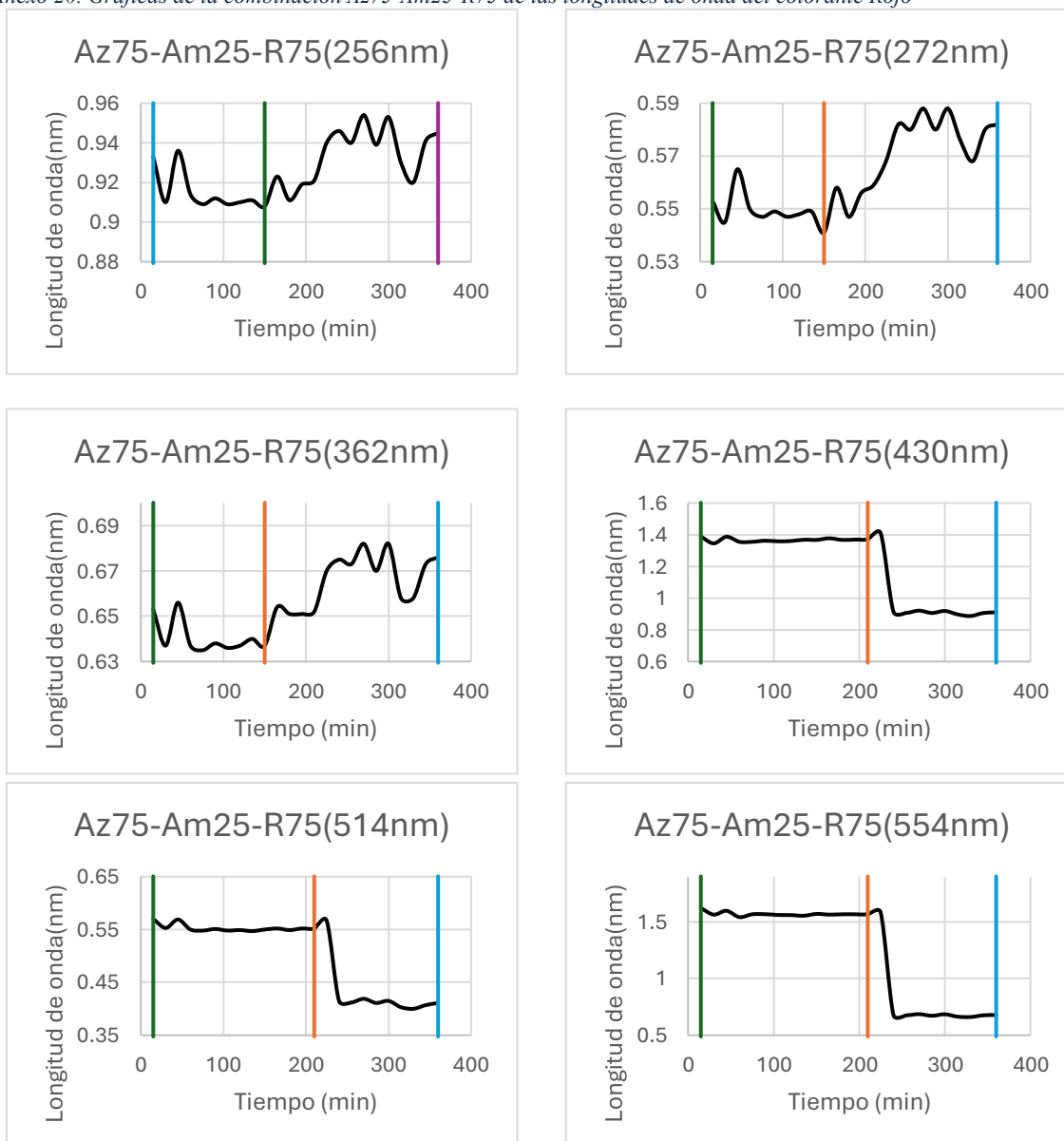
Anexo 18. Graficas de la combinación Az25-Am25-75 de las longitudes de onda del colorante Azul.



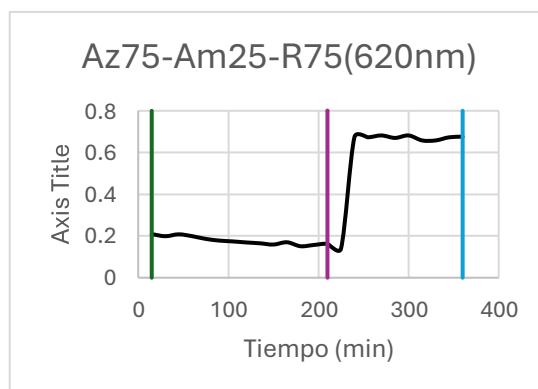
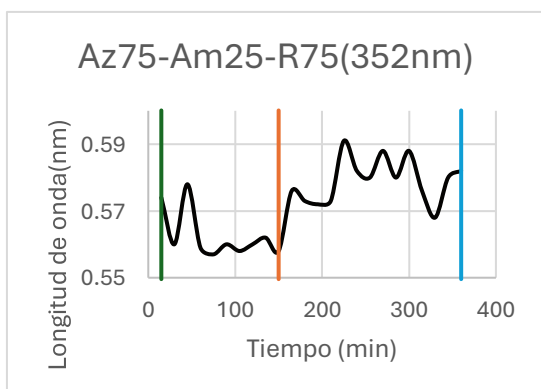
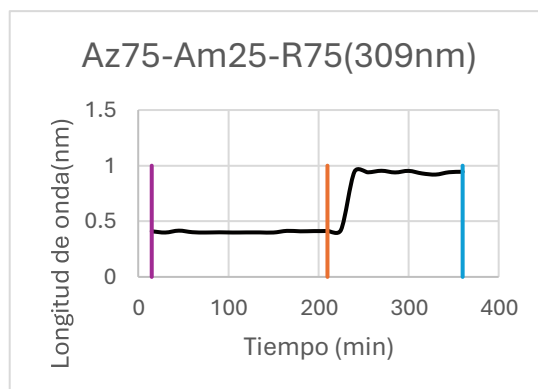
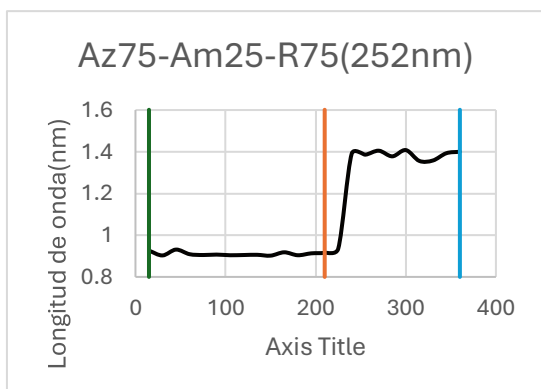
Anexo 19. Graficas de la combinación Az75-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



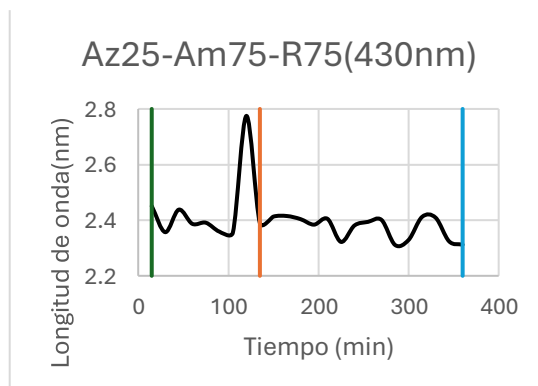
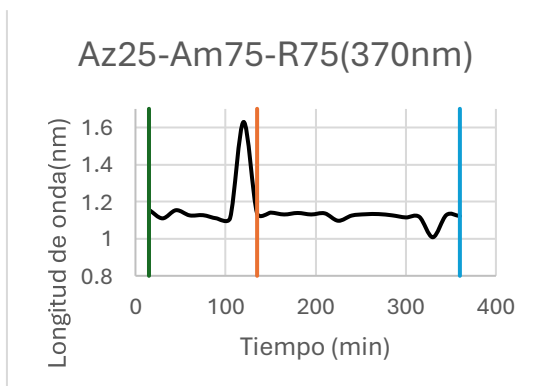
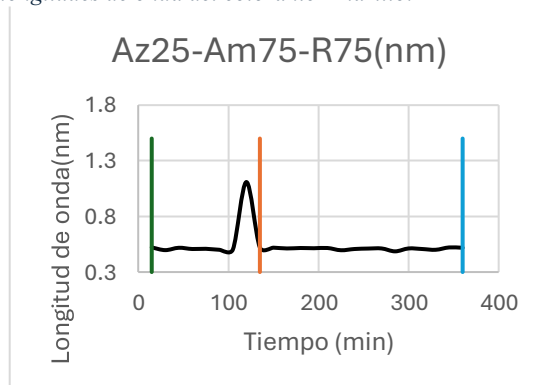
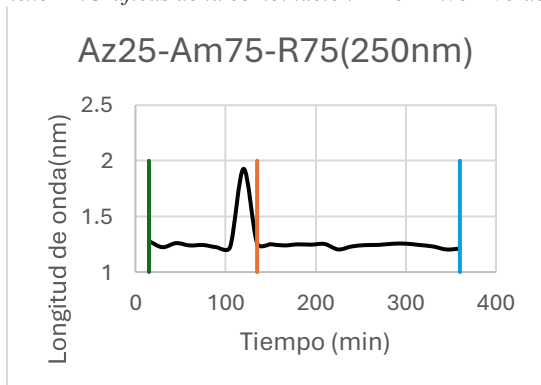
Anexo 20. Graficas de la combinación Az75-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Rojo



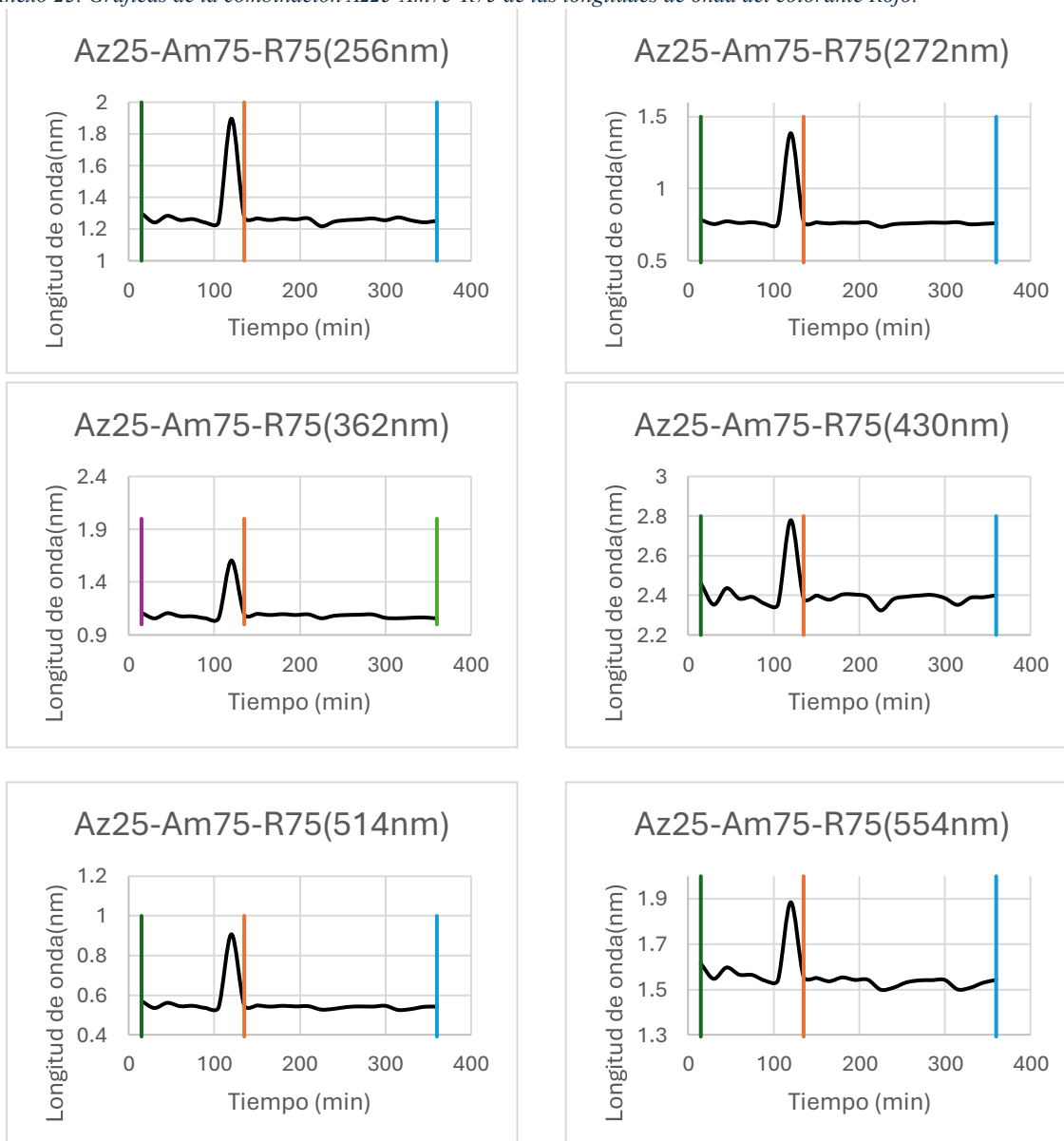
Anexo 21. Graficas de la combinación Az75-Am25-R75 de las longitudes de onda del colorante Azul.



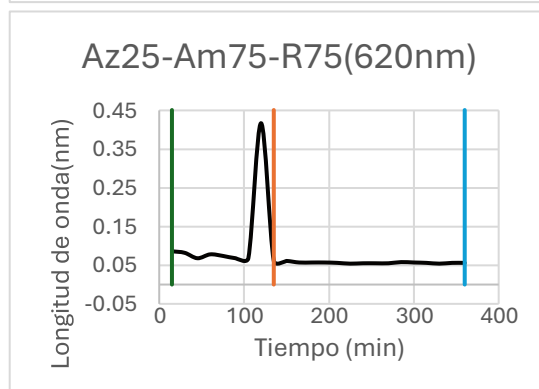
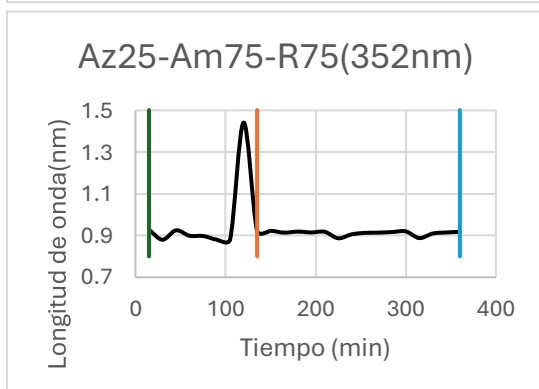
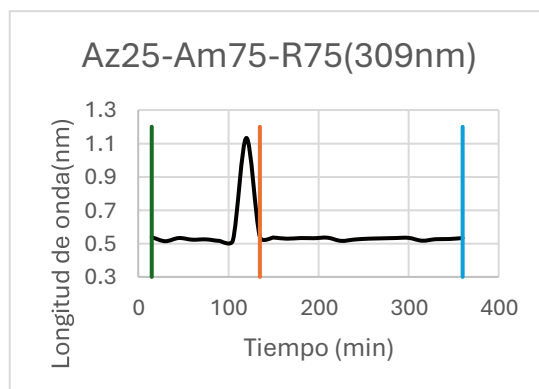
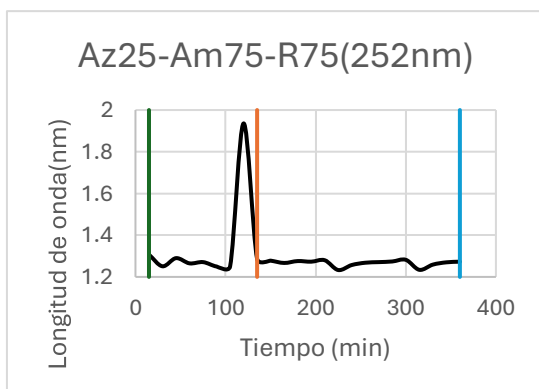
Anexo 22. Graficas de la combinación Az25-Am75-R75 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



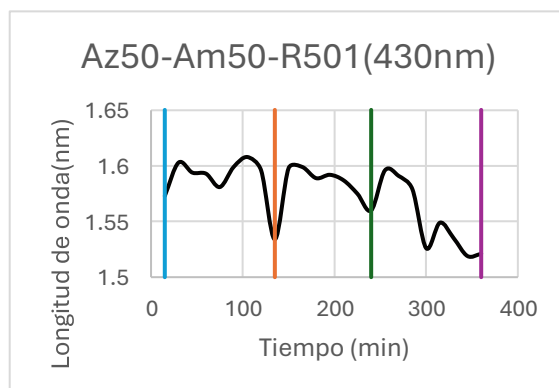
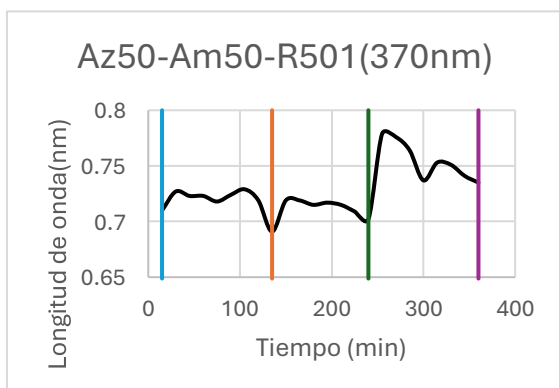
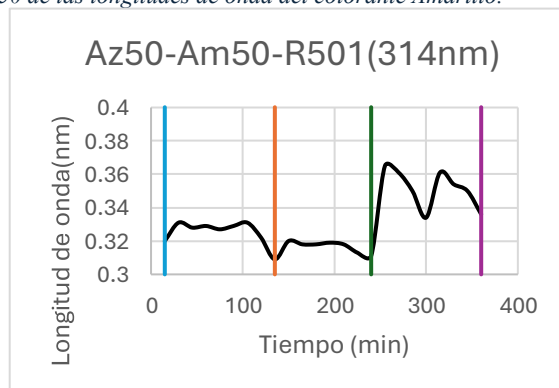
Anexo 23. Graficas de la combinación Az25-Am75-R75 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



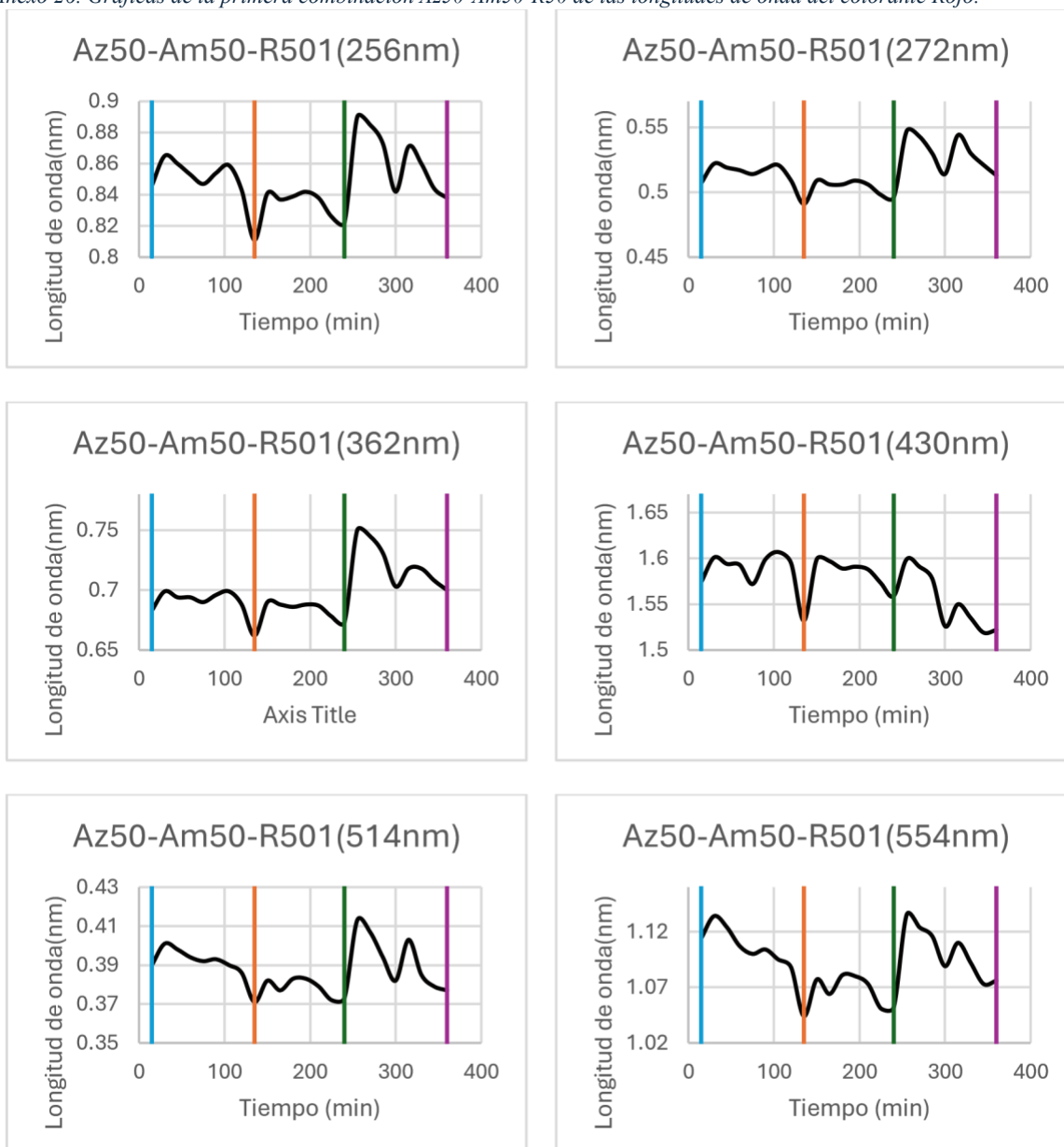
Anexo 24. Graficas de la combinación Az25-Am75-R75 de las longitudes de onda del colorante Azul.



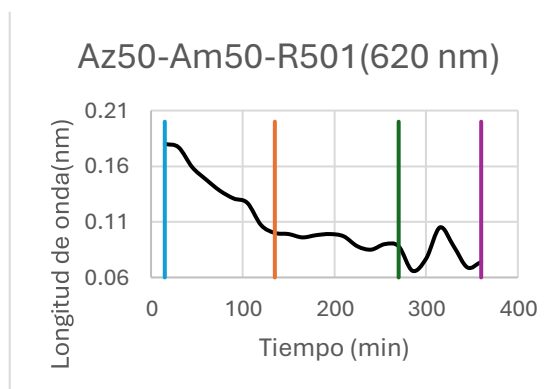
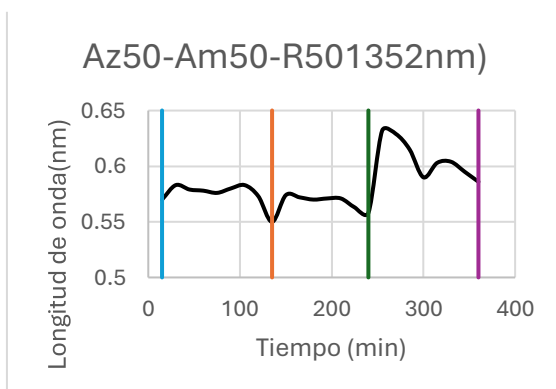
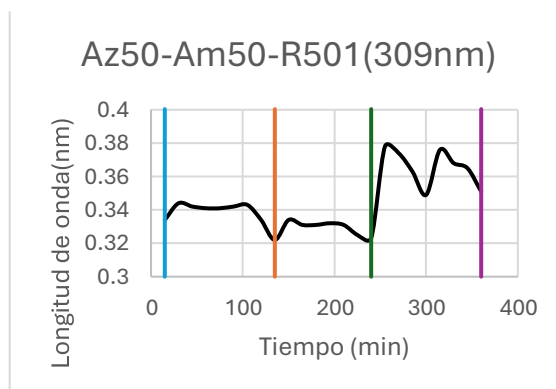
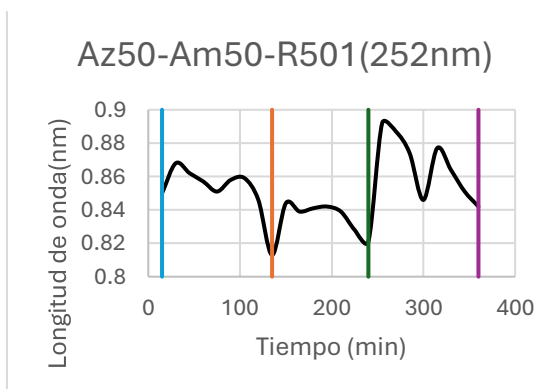
Anexo 25. Graficas de la primera combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



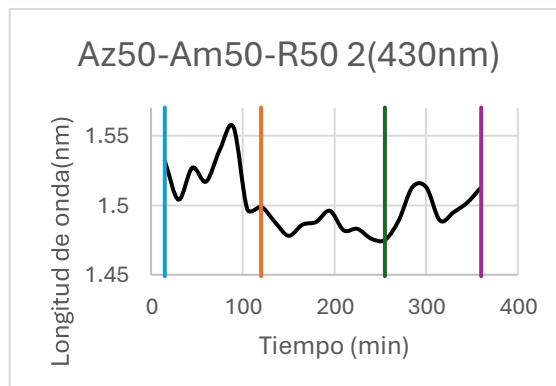
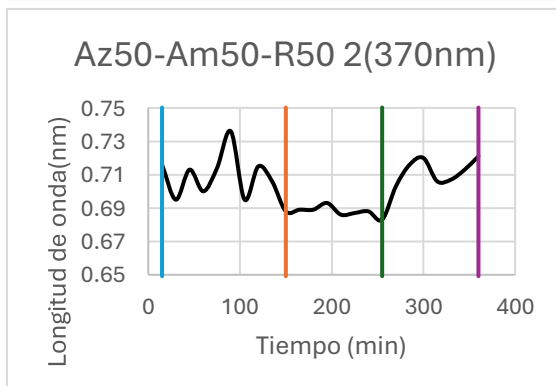
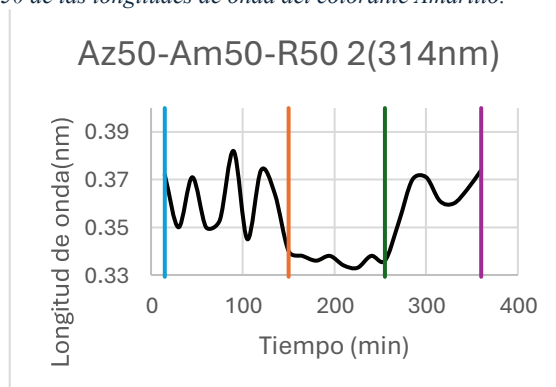
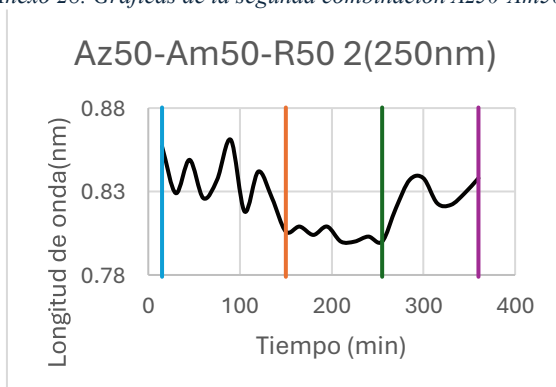
Anexo 26. Graficas de la primera combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



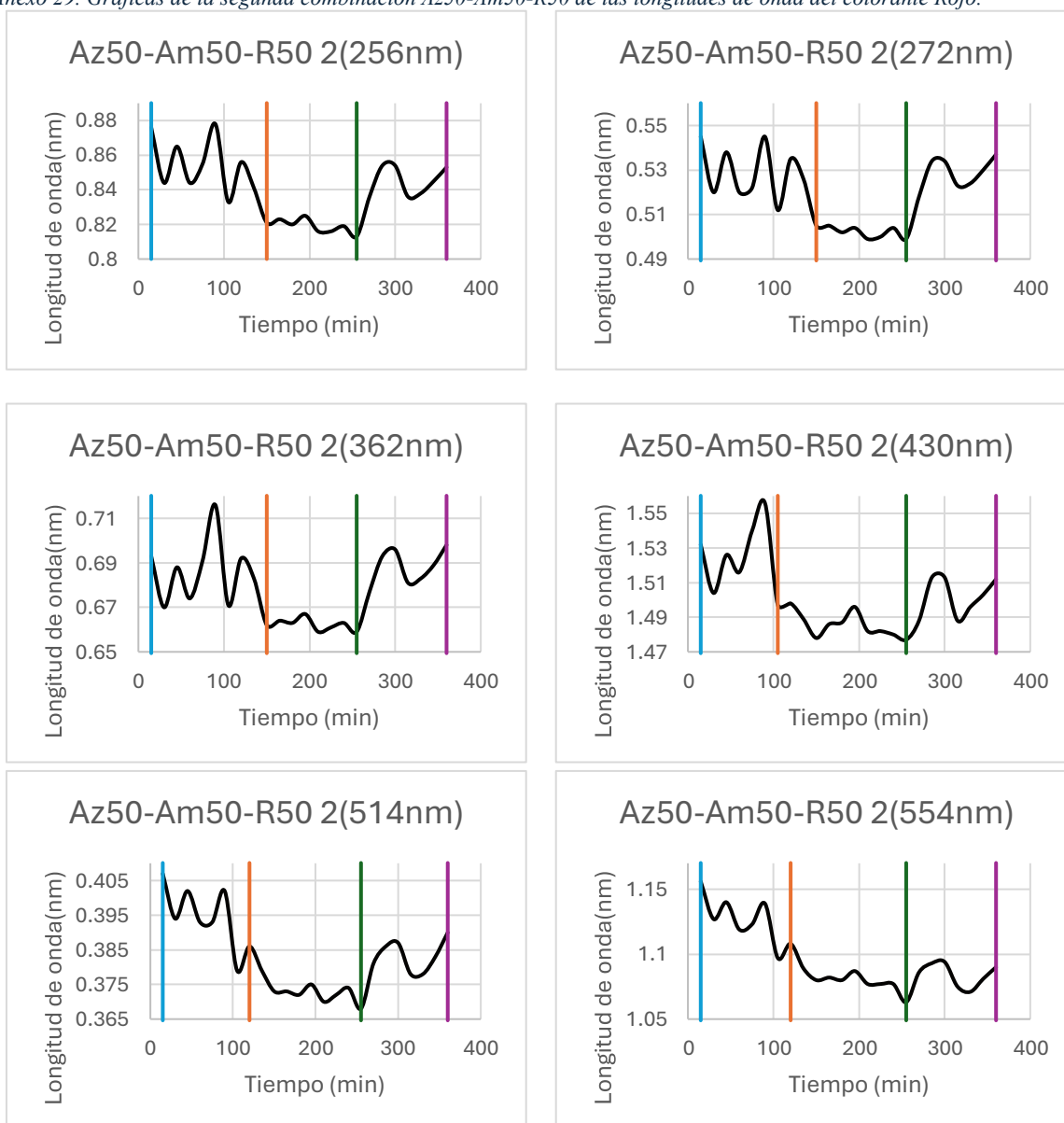
Anexo 27. Graficas de la primera combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Azul.



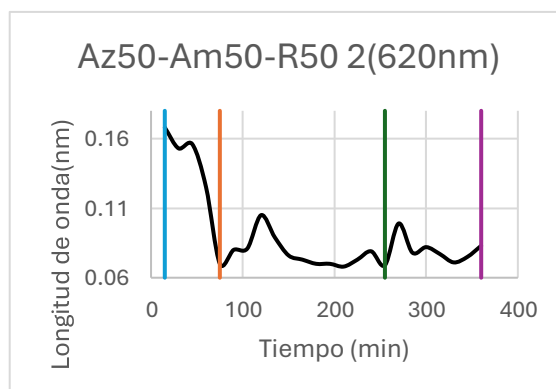
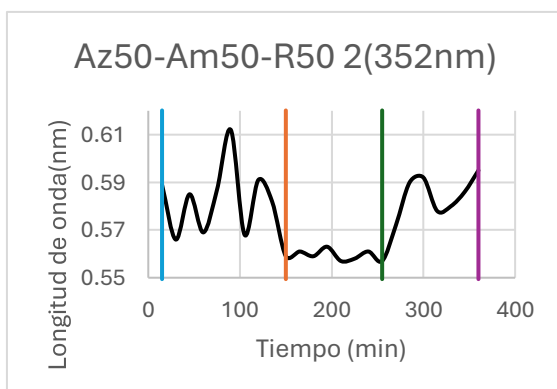
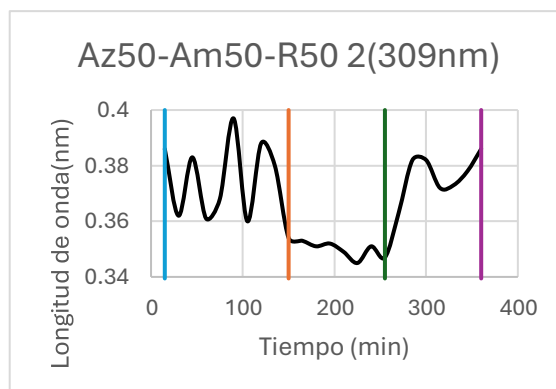
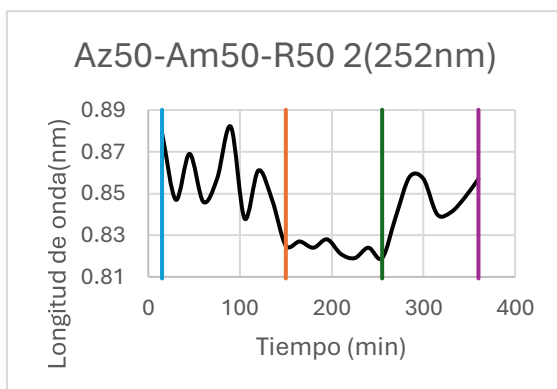
Anexo 28. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



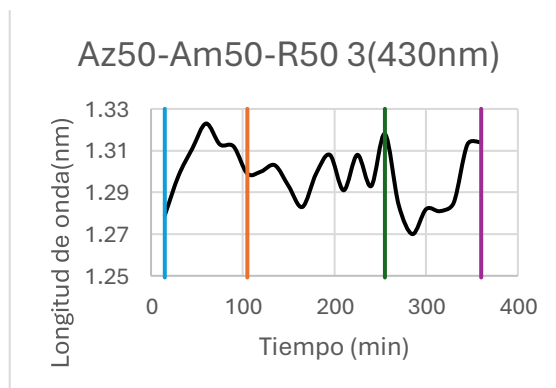
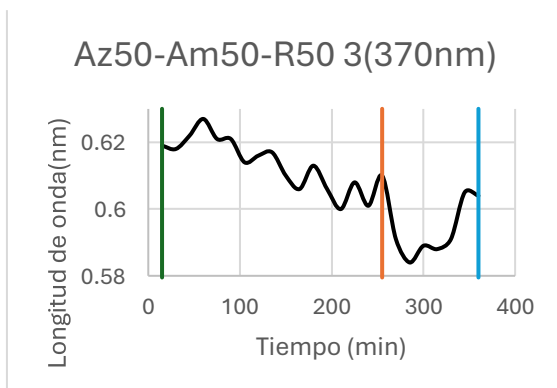
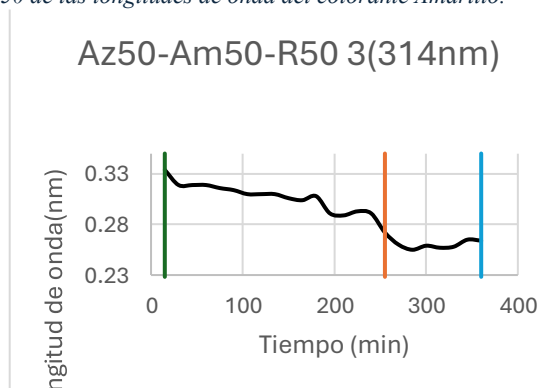
Anexo 29. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



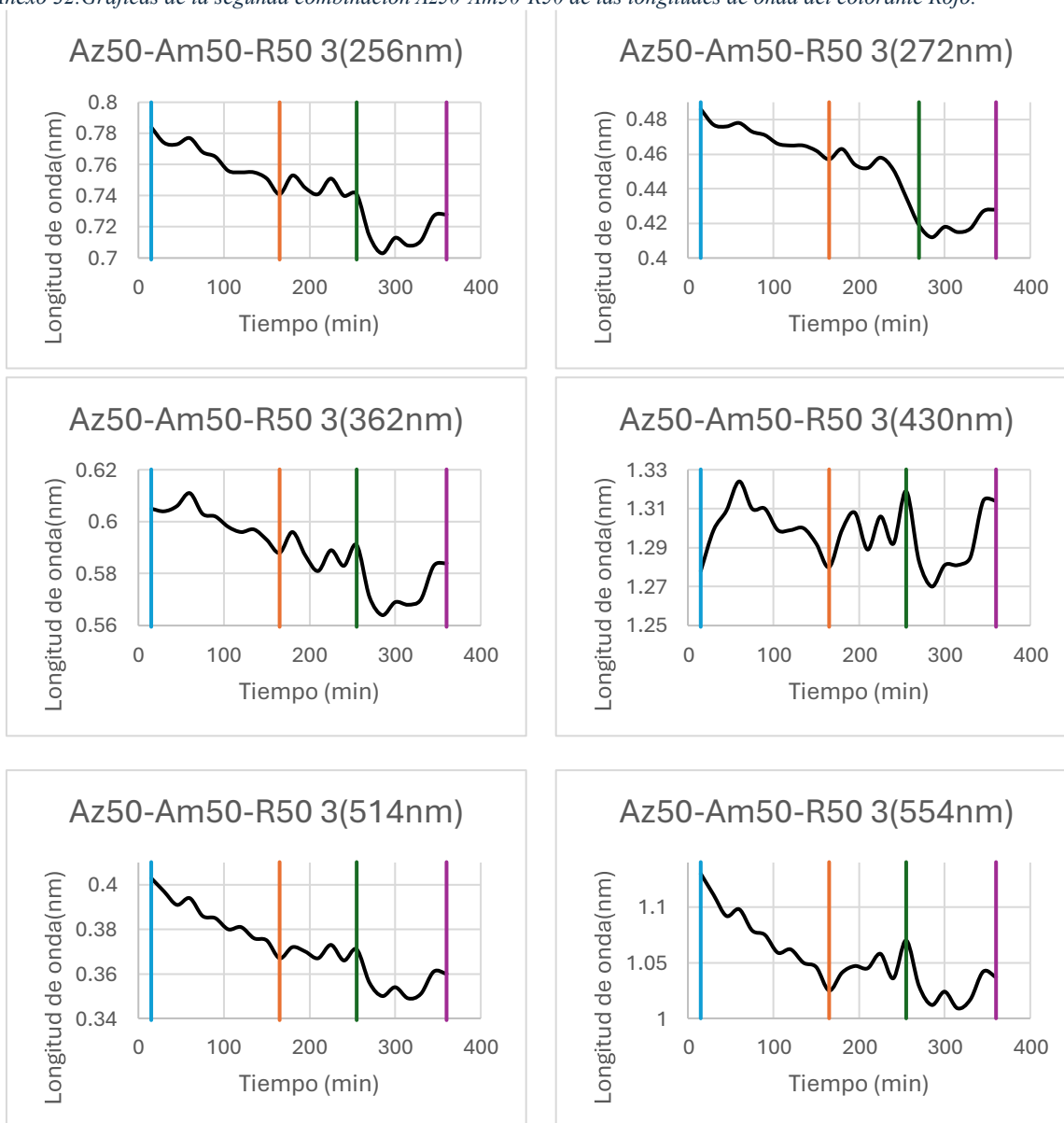
Anexo 30. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Azul.



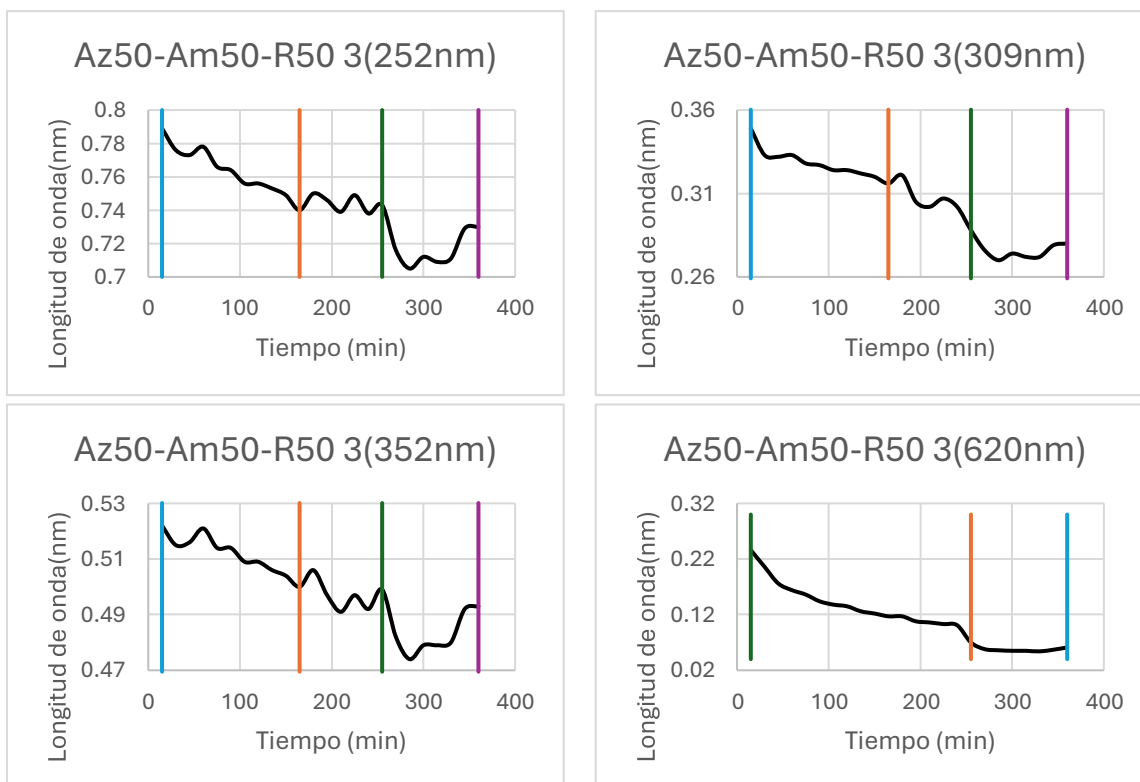
Anexo 31. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



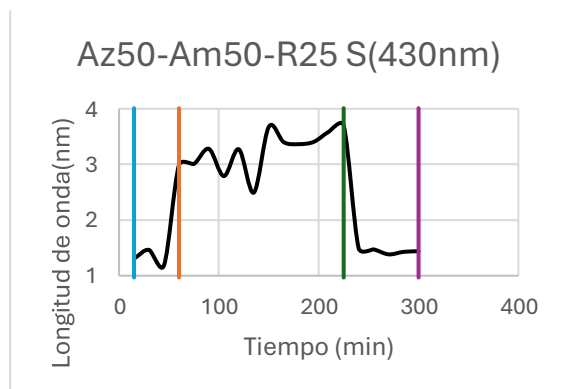
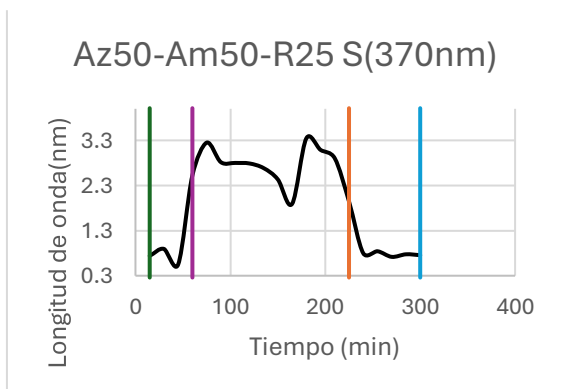
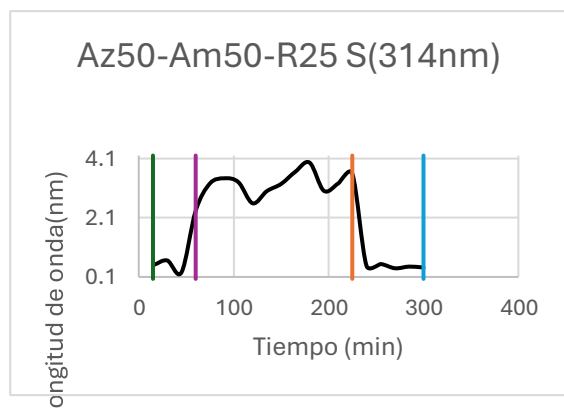
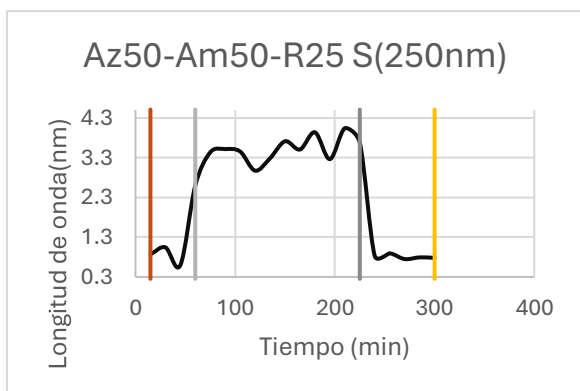
Anexo 32. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Rojo.



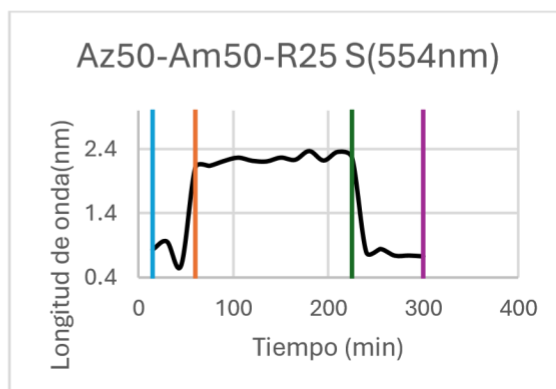
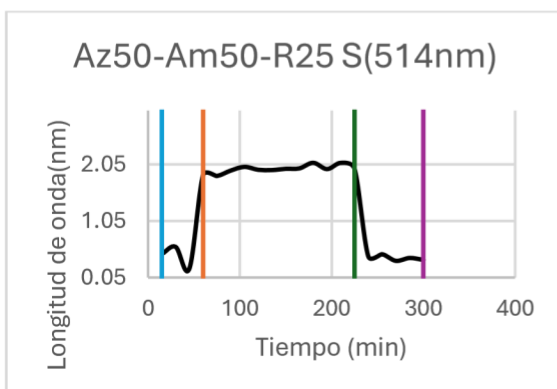
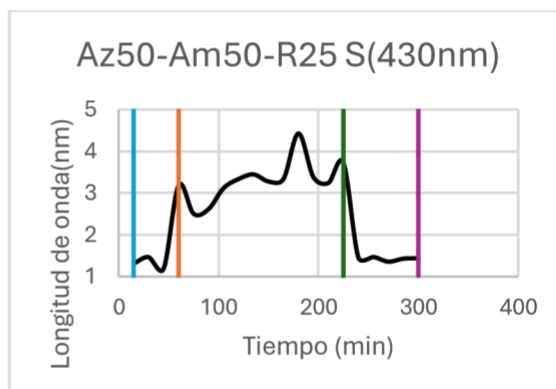
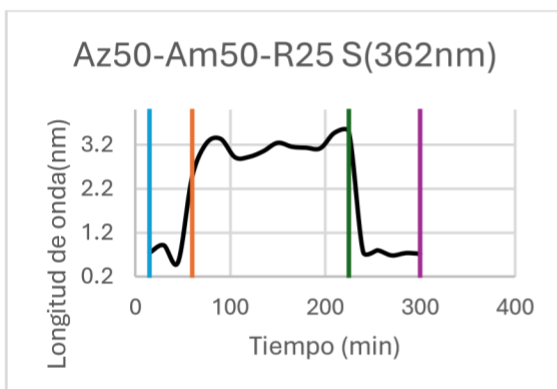
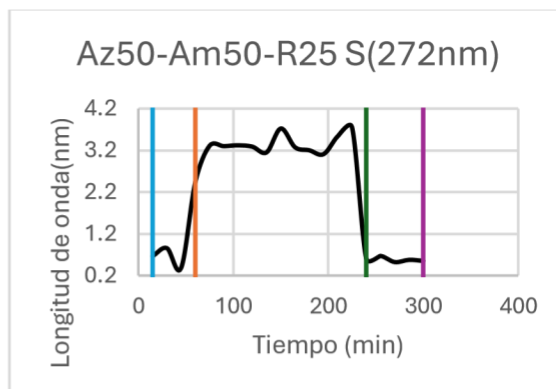
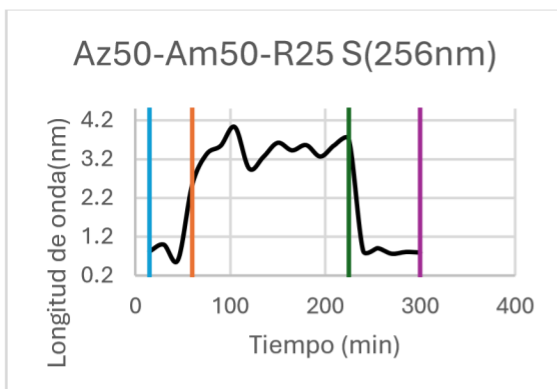
Anexo 33. Graficas de la segunda combinación Az50-Am50-R50 de las longitudes de onda del colorante Azul.



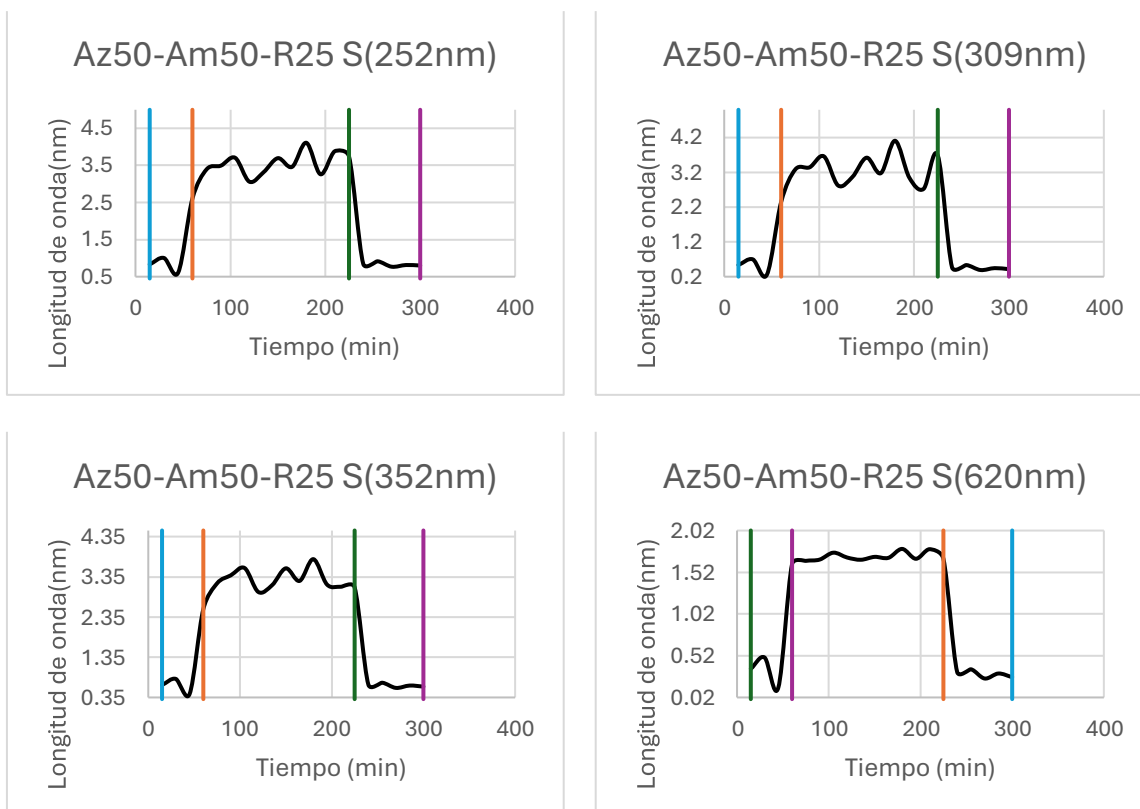
Anexo 34. Graficas de la combinación Az50-Am50-R25 a radiación solar de las longitudes de onda del colorante Amarillo.



Anexo 35. Graficas de la combinación Az50-Am50-R25 a radiación solar de las longitudes de onda del colorante Rojo.



Anexo 36. Graficas de la combinación Az50-Am50-R25 a radiación solar de las longitudes de onda del colorante Azul.



Anexo 37. Tabla de las longitudes de onda del colorante azul a radiación solar.

Tiempo		Longitud de onda		
min	252 nm	309 nm	352 nm	620 nm
15	0.846	0.361	0.569	0.125
30	0.858	0.342	0.58	0.131
45	0.778	0.333	0.521	0.163
60	0.541	0.267	0.379	0.116
75	0.857	0.341	0.578	0.142
90	0.846	0.361	0.569	0.114
105	0.838	0.361	0.629	0.141
120	0.532	0.258	0.375	0.116
135	0.858	0.342	0.58	0.131
150	0.505	0.229	0.339	0.129
165	0.753	0.322	0.506	0.125
180	0.846	0.334	0.573	0.107
195	0.749	0.32	0.504	0.122
210	0.892	0.378	0.632	0.092

225	0.844	0.334	0.574	0.099
240	0.749	0.32	0.504	0.122
255	0.739	0.302	0.491	0.106
270	0.76	0.326	0.503	0.123
285	0.74	0.316	0.5	0.116
300	0.523	0.269	0.377	0.11
315	0.75	0.321	0.506	0.118
330	0.846	0.334	0.573	0.107
345	0.746	0.305	0.497	0.108
360	0.752	0.287	0.512	0.122

Anexo 38. Degradación a radiación solar del colorante Azul.

