



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

DEGRADACION DE COLORANTES DIRECTOS Y REACTIVOS UTILIZADOS EN
LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE LA FOTOCATALISIS SOLAR HETEROGENEA

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor:

Díaz Bravo, Pablo Belizario

Asesor:

Galarza Zapata, Edwin Jaime
(ORCID: 0000-0003-4490-0740)

Jurado:

Zambrano Cabanillas, Abel Walter
Mayhuasca Guerra, Jorge Víctor
Castañeda Pérez, Luz Genara

Lima - Perú

2023



Reporte de Análisis de Similitud

Archivo:

Fecha del Análisis:

Analizado por:

Correo del analista:

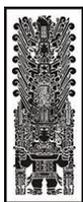
Porcentaje:

Título:

Enlace:



DRA. MIRIAM LILIANA FLORES CORONADO
JEFA DE GRADOS Y GESTIÓN DEL EGRESADO



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**“DEGRADACION DE COLORANTES DIRECTOS Y REACTIVOS
UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE LA
FOTOCATALISIS SOLAR HETEROGENEA”**

Línea de Investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el grado académico de doctor en Ingeniería Ambiental

Autor

Díaz Bravo, Pablo Belizario

Asesor

Galarza Zapata, Edwin Jaime

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Mayhuasca Guerra, Jorge Víctor

Castañeda Pérez, Luz Genara

LIMA - PERU

2023

DEDICATORIA

A nuestro divino creador por darme la fortaleza de seguir adelante y a mis padres por haberme dado la vida. A mi esposa Guadalupe y mis hijos Eric, Marco y Pablo, por su comprensión y motivación constante para concluir esta tesis

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a todos los colegas y docentes del doctorado en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Federico Villareal, con quienes compartimos el aula de clase adquiriendo amistad y conocimiento científico. A mi familia por su apoyo constante, consejo y ánimo para continuar esta tesis. Hago extensivo también al doctor Edwin Jaime Galarza Zapata (QEPD) por sus consejos y asesoramiento durante el desarrollo de la tesis. A la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao por la disposición de los materiales, equipos, instrumentos y ambiente de laboratorios que permitieron hacer realidad los experimentos.

INDICE

INDICE DE TABLAS.....	5
INDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
I. INTRODUCCION.....	10
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Descripción del problema.....	13
1.3 Formulación del problema.....	15
1.3.1 Problema general.....	15
1.3.2 Problemas específicos.....	15
1.4 Antecedentes.....	15
1.5 Justificación de la investigación.....	19
1.5.1 Justificación filosófica.....	19
1.5.2 Justificación técnica.....	20
1.5.3 Justificación ambiental.....	21
1.5.4 Importancia de la investigación.....	22
1.6 Limitaciones de la investigación.....	23
1.7 Objetivos.....	24
1.7.1 Objetivo general.....	24
1.7.2 Objetivos específicos.....	24
1.8 Hipótesis.....	24
1.8.1 Hipótesis general.....	24
1.8.2 Hipótesis específica.....	25
II. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1 Marco conceptual.....	26
2.2 Bases teóricas.....	27
2.2.1 Colorantes.....	27
2.2.2 Tratamiento de aguas residuales.....	37
2.2.3 Normativas legales.....	38
2.2.4 Procesos de oxidación avanzada.....	39
2.2.5 Fotocatalisis.....	40
2.2.6 Variables que afectan el proceso fotocatalítico.....	43

2.2.7 Radiación solar.....	45
2.2.8 Mecanismos de reacción.....	46
2.2.9 Estudio cinético de la reacción fotocatalítica.....	51
III. METODO.....	53
3.1 Tipo de investigación.....	53
3.2 Población y muestra.....	53
3.3 Operacionalización de variables.....	54
3.4 Instrumentos.....	55
3.5 Procedimiento.....	56
3.6 Análisis de datos.....	57
IV. RESULTADOS.....	59
4.1 Contrastación de hipótesis.....	59
4.2 Análisis e interpretación.....	63
4.2.1 Caracterización fisicoquímica del catalizador.....	63
4.2.2 Determinación de la longitud de onda de absorción del colorante.....	66
4.2.3 Obtención de la curva de calibración de los colorantes.....	67
4.2.4 Cinética de reacción con fotocatalizador.....	71
4.2.5 Cinética de reacción sin fotocatalizador.....	78
4.2.6 Efecto de la concentración del catalizador.....	78
V. DISCUSION DE RESULTADOS.....	87
5.1 Caracterización fisicoquímica del catalizador.....	87
5.2 Determinación de la longitud de onda de absorción del colorante.....	87
5.3 Obtención de la curva de calibración de los colorantes.....	88
5.4 Cinética de reacción con fotocatalizador.....	88
5.5 Cinética de reacción sin fotocatalizador.....	91
5.6 Efecto de la concentración del catalizador.....	92
VI. CONCLUSIONES.....	95
VII. RECOMENDACIONES.....	97
VIII. REFERENCIAS.....	98
IX. ANEXOS.....	114

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Valores máximos admisibles de las aguas residuales no domesticas.....	39
Tabla 2.	Indicadores de las variables	54
Tabla 3.	Operacionalizacion de variables.....	55
Tabla 4.	Matriz de diseño experimental	58
Tabla 5.	ANOVA para el modelo de primer orden del colorante rojo escarlata.....	59
Tabla 6.	Longitud de onda idónea de medición para distintos colorantes.....	67
Tabla 7.	Concentración y % de degradación del Rojo Escarlata en función del tiempo de reacción, utilizando 100 mg/100 mL de catalizador, para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de solución	72
Tabla 8.	Concentración y % de degradación del colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, utilizando 100 mg/100 mL de catalizador, para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante	74
Tabla 9.	Concentración y % de degradación del colorante amarillo synozol en función del tiempo de reacción, utilizando 100 mg/100 mL de catalizador, para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante	76
Tabla 10.	Concentración y % de degradación del colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante	79
Tabla 11.	Concentración y % de degradación del colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante	81
Tabla 12.	Concentración y % de degradación del colorante amarillo synozol en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante	83
Tabla 13.	Concentración y % de degradación del colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, utilizando 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador para muestras que contienen 50 ppm de colorante.	85
Tabla 14.	Parámetros cinéticos de la reacción fotocatalitica de los colorantes.	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de algunos colorantes utilizados en la industria textil....	29
Figura 2 . Reacción del colorante reactivo con el agente nucleofílico en la superficie de la tela	32
Figura 3 . Estructura química del colorante rojo escarlata 224, F2G.....	36
Figura 4. Estructura química del colorante amarillo reactivo.....	37
Figura 5 . Esquema del proceso foto catalítico	42
Figura 6 . Esquema de mecanismo de reacción de fotocatalisis heterogénea en TiO ₂ .	47
Figura 7 . Potencial redox de diversos semiconductores.....	48
Figura 8. Imágenes de microscopia electrónica en dos regiones aleatorias de la muestra (región 1 y región 2).....	64
Figura 9. Medición de tamaño de partículas en 4 regiones aleatorias de la muestra (imágenes a 6000X).....	65
Figura 10 . Espectro de absorción del colorante rojo escarlata a distintas concentraciones.....	66
Figura 11. Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración del colorante rojo escarlata a concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm.....	68
Figura 12 . Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración del colorante azul corazol RD a concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm.....	69
Figura 13. Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración del colorante amarillo synozol a concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm.....	70
Figura 14. Grafica de dispersion de concentracion del colorante rojo escarlata en funcion del tiempo de reaccion.....	73
Figura 15 . Grafica de Ln(Co/C) en función del tiempo de reacción del colorante rojo escarlata	73
Figura 16 . Grafica de dispersión de concentración del colorante azul corazol RD en función del tiempo (min.) de reacción.....	75

- Figura 17. Grafica de $\ln(C_0/C)$ del colorante azul corazol RD en función del tiempo de de reacción 75
- Figura 18. Grafica de dispersión de concentración del colorante amarillo synozol S-2 en función del tiempo (min.) de reacción..... 77
- Figura 19 . Grafica de $\ln(C_0/C)$ del colorante amarillo synozol S-22 en función del tiempo de reacción..... 77
- Figura 20. Grafica de dispersión de la concentración de colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm..... 80
- Figura 21. Fotografías del proceso fotocatalítico del rojo escarlata a concentraciones de 20, 30 40 50 ppm sin usar catalizar..... 80
- Figura 22. Grafica de dispersión de la concentración de colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm..... 82
- Figura 23. Fotografía de la concentración de colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, sin usar catalizador para muestras de 20 ppm..... 82
- Figura 24. Grafica de dispersión de concentración de colorante amarillo synozol en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm..... 84
- Figura 25. Fotografía de la concentración de colorante amarillo synozol transcurridos 15 minutos, sin catalizador para muestra de 20 ppm..... 84
- Figura 26. Grafica dispersión de concentración de colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, usando 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador en solución de 50 ppm..... 86
- Figura 27. Grafica de $\ln(C_0/C)$ de colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, y ajuste lineal, usando 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador en solución de 50 ppm. 86

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la cinética de degradación de los colorantes directos y reactivos utilizados en la industria textil aplicando la fotocatalisis solar heterogénea usando como catalizador el óxido de zinc en suspensión. El estudio fue experimental a nivel de laboratorio en un reactor químico tipo batch. Las muestras estuvieron conformadas por el colorante directo rojo escarlata 224-F2G y los reactivos: azul corazol RD y el amarillo synozol S-22, con concentraciones iniciales de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante. Las mediciones de la concentración de los colorantes fueron seguidas mediante un espectrofotómetro UV. Los resultados muestran una degradación del colorante directo cercano al 100 % al cabo de 20 minutos, mientras que los colorantes reactivos alcanzaron aproximadamente el 50% a las mismas condiciones de tiempo y concentración inicial. Todas las reacciones muestran una cinética de pseudo-primer orden con una constante de velocidad promedio de 40.8, 226.6 y 299.3 min^{-1} respectivamente. Asimismo, se observó que a medida que la concentración inicial de los colorantes aumenta o en soluciones de concentraciones elevadas de catalizador, la cinética de reacción disminuye. En conclusión, la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador es una técnica alternativa viable y ecológica para el tratamiento de efluentes líquidos coloreadas provenientes de la industria textil, pueden ser utilizadas con éxito en zonas de radiación solar o combinadas con otras tecnologías.

Palabras claves: Colorantes directos y reactivos, fotocatalisis solar heterogénea, óxido de zinc, textiles.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the degradation kinetics of direct and reactive dyes used in the textile industry by applying heterogeneous solar photocatalysis using suspended zinc oxide as a catalyst. The study was experimental at the laboratory level in a batch chemical reactor. The samples were made up of the direct scarlet red dye 224-F2G and the reagents: corazol blue RD and synozol yellow S-22 with initial concentrations of 20, 30, 40 and 50 ppm of dye. The concentration measurements of the dyes were followed by a UV spectrophotometer. The results show a degradation of the direct dye close to 100 % after 20 minutes, while the reactive dyes reached approximately 50% at the same conditions of time and initial concentration. All reactions show pseudo-first order kinetics with an average rate constant of 40.8, 226.6 and 299.3 min^{-1} respectively. Likewise, it was observed that as the initial concentration of the dyes increases or in solutions with high catalyst concentrations, the reaction kinetics decrease. In conclusion, heterogeneous solar photocatalysis using zinc oxide as a catalyst is a viable technique and ecological alternative for the treatment of colored liquid effluents from the textile industry, it can be successfully in areas of solar radiation or combined with other technologies.

Key words: Direct and reactive dyes, heterogeneous solar photocatalysis, zinc oxide, textiles.

I. INTRODUCCION

Tradicionalmente la industria textil peruana es reconocida por la calidad de sus fibras naturales. Especialmente, contar con algodón de fibras largas le ha permitido ingresar a mercados exigentes y competitivos a nivel mundial. No obstante, la variedad de tipos de colorantes que utiliza esta industria generan residuos contaminantes orgánicos e inorgánicos con altas concentraciones cuya remoción resulta difícil con los métodos de tratamiento convencionales debido a la complejidad de sus estructuras.

El tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes ha sido y es de interés para muchos investigadores, debido a que estas sustancias no son biodegradables y los subproductos que generan resultan ser tóxicos, que podría ocasionar algún tipo de conflicto medioambiental. Algunos son altamente contaminantes y que podrían afectar peligrosamente la salud de la fauna. Estos contaminantes, una vez liberados al medio ambiente pueden entrar en la cadena trófica y tener consecuencias en la salud humana. Esta problemática, motivó el uso de nuevas tecnologías para el tratamiento y/o purificación de aguas residuales fundamentadas en Procesos de Oxidación Avanzada (POAs). Entre estas, la fotocatalisis heterogénea usando como catalizador el dióxido de titanio (TiO_2), ha despertado mucho interés en la comunidad científica (Acosta, 2009). Este proceso, no es exclusivo y puede ser utilizado para el tratamiento de mezclas complejas de contaminantes (Blanco et al., 1997). Más aun, el uso de la energía solar como fuente energética le otorga un significativo sentido ambiental, y un ejemplo de tecnología limpia sostenible. De este modo, el proceso foto catalítico utilizando radiación solar y catalizador heterogéneo, resulta como una de las alternativas para el tratamiento de efluentes provenientes de la industria textil, puesto que es capaz de mineralizar completamente la materia orgánica contaminante en CO_2 .

Por otra parte, los colorantes utilizados en la industria textil son de diversos tipos según el acabado final que se persigue, uno de estos son los directos y reactivos que son muy solubles en agua, con alta resistencia a los agentes químicos y poco biodegradables. Sus estructuras químicas frecuentemente son complejas contienen grupos azo, antraquinona o ftalocianina y debidos a sus propiedades de solubilidad y estabilidad, las remociones de estos componentes no pueden ser realizadas por los métodos convencionales (Rodríguez et al., 2003).

El objetivo del presente trabajo fue realizar la degradación de la concentración de colorantes directos y reactivos frecuentemente utilizados en la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea utilizando el óxido de zinc (ZnO) como fotocatalizador. La elección de este catalizador fue debido a sus características de estabilidad y bandas de valencia (*band gap*) relativamente amplia de aproximadamente 3.3 eV a temperatura ambiente muy similar al TiO₂. En el experimento, se utilizaron los colorantes: Rojo escarlata (directo), el azul corazol R.D y el amarillo synozol (ambos reactivos) en un reactor tipo batch a nivel de laboratorio. El periodo de irradiación solar fue en los meses de diciembre a mayo en horas de fuerte intensidad desde las 11 am hasta las 15 horas. La medición de la concentración de los colorantes fue seguida mediante el espectrofotómetro UV (Varian-Cary 50 Bio, Australia) ubicada en el laboratorio de investigación de la FIQ-UNAC. La caracterización fisicoquímica del catalizador fue realizada en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

1.1 Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas de la industria textil, es la generación de aguas contaminadas con colorantes con alta carga química que requieren ser tratadas antes de ser vertidas al ambiente. Se estima que alrededor de 100 litros de aguas residuales son descargadas por kg de tela teñida (Couto, 2009). Una fracción considerable de estos contaminantes liberados al ambiente por los efluentes de esta industria son los residuos colorantes. Estos efluentes, se caracterizan por ser altamente coloreados debido a la presencia de colorantes que no se fijan a la fibra en el proceso de teñido, además contienen altos valores de pH, demanda biológica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), turbidez y otros compuestos químicos tóxicos, que presentan efectos cancerígenos y/ o mutagénicos (Souza et al., 2016). La fuerte coloración que presenta constituye un peligro potencial para la salud de todas las formas de vida que podría llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en plantas acuáticas y la contaminación de suelos, por lo que su presencia necesariamente debe ser controlada.

Los efluentes descargados de las industrias textiles son una mezcla de colorantes, metales y otros contaminantes. Los colorantes se pueden dividir en colorantes naturales y sintéticos. Los colorantes sintéticos se producen fácilmente, en diferentes colores, y se caracterizan por su solidez, lo que los hace más ampliamente utilizados que los colorantes naturales. Los colorantes sintéticos se clasifican en diferentes grupos de acuerdo con su estructura química (por ejemplo, azo, antraquinona, azufre, ftalocianina y triarilmetano) y de acuerdo con su modo de aplicación (por ejemplo, reactivo, directo, disperso, básico y tintura). (Yaseen & Scholz, 2018).

La degradación de colorantes provenientes en efluentes de la industria textil ha sido el objetivo de muchos investigadores quienes mostraron interés a este problema de contaminación. En particular, las tecnologías basadas en los procesos de oxidación avanzada (POAs) han demostrado ser altamente efectivas en la degradación de compuestos orgánicos,

que incluso pueden convertir contaminantes refractarios en subproductos con menor peso molecular que podrían alcanzar una mineralización completa (Garcés, 2010; Morales, 2018 y Fernández, 2020). Los POAs se dividen generalmente en dos grupos: sistemas homogéneos y heterogéneos, adicionalmente, la tasa de degradación de la sustancia orgánica también está influenciada por la intensidad de la luz, para iniciar la propagación de radicales hidroxilos (Rodríguez, 2003). En sistemas homogéneos, el uso de radiación UV combinada con oxidantes fuertes como el ozono y el peróxido de hidrógeno muestra mejores resultados en comparación con el uso de estos agentes solos, lo que resulta en una mayor eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) y el color (Toribio, 2021). Los sistemas heterogéneos utilizan semiconductores sólidos producidos a partir de óxidos metálicos (óxidos de metales de transición, dióxido de titanio y óxido de zinc) para mejorar las reacciones fotoquímicas involucradas en la formación de radical hidroxilo. En estos procesos, la radiación UV activa el catalizador promoviendo la degradación de los contaminantes recalcitrantes (Marcelino, 2014).

1.2 Descripción del problema

El uso de una amplia variedad de colorantes químicos, da origen a efluentes extremadamente variados en su composición, que requieren de un tratamiento de aguas muy complejos (Kandelbauer et al., 2005 y Días et al., 2007). En el caso de los colorantes tipos azo sus subproductos son metabolitos como aminas aromáticas, algunas de las cuales son carcinógenas y muta génicos (Brown & DeVito, 1993; Ramsay & Nguyen, 2002; Gavril & Hodson, 2007; Tomasini & Moller, 2010).

Actualmente, existen muchas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales con colorantes que pueden aplicarse eficientemente y están disponibles en el mercado. Algunas, son altamente específicas y de costos muy elevados, por lo que no resulta practica su aplicación para una amplia variedad de colorantes y no resuelven completamente el problema de la

decoloración (Kuhad et al., 2004 y Anjaneyulu et al., 2005). Algunos métodos efectivos que se están utilizando para remover colorantes son: la adsorción, la transformación química, la incineración, la ozonación y la fotocatalisis, aunque estas tecnologías resultan costosas (De Moraes et al., 2000).

Por otro lado, la mayoría de los estudios foto catalíticos utilizan lámparas ultravioletas como fuente energética, siendo las más empleadas: las de mercurio, de xenón y los denominados simuladores solares. Estos procesos, se fundamentan en la irradiación de suspensiones de óxidos semiconductores (SC) generalmente dióxido de titanio u otros catalizadores, en muestras que contienen sustancias orgánicas que necesitan ser degradadas. Si los fotones que irradian al sistema tienen la energía apropiada, se genera en el catalizador o semiconductor una separación de cargas (pares electrón e^- /hueco h^+). Entre otros procesos, los huecos pueden dar lugar a la formación de radicales hidroxilos (OH^\bullet), especies de alto poder oxidante capaces de reaccionar con una gran variedad de compuestos orgánicos conduciendo en último término a su completa mineralización (Rodríguez, 2003). Cuando la fuente energética es la radiación solar, esta interactúa con la materia en un amplio intervalo de longitud de onda generando cambios en la estructura de las moléculas. La radiación en la región visible o ultravioleta (240-700 nm) interactúan con los electrones de las moléculas ocasionando distintas reacciones de descomposición (Marín, 2002). Por otro lado, la energía solar es directa, económica y ecológica por lo que se utiliza en la fotocatalisis (Prieto-Rodríguez et al., 2012). Además, la energía solar tiene varias ventajas; está disponible en muchas regiones del mundo y es una energía limpia que no causa contaminación ambiental (Kalogirou, 2004).

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Los colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil podrán ser degradados mediante la fotocatalisis solar heterogénea?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Cuál será la cinética de reacción de degradación de los colorantes directos y de reactivos en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea usando el óxido de zinc como catalizador?
- ¿La concentración inicial del colorante influye en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea?
- ¿La concentración del fotocatalizador óxido de zinc, influye en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea?

1.4 Antecedentes

Anjaneyulu et al. (2005). Decolourization of industrial effluents – available methods and emerging technologies, indican que la principal fuente emisora de colorantes es la industria textil dentro de las muchas actividades industriales.

Dias et al. (2007). Environmental applications of fungal and plant systems: decolourisation of textile wastewaters, indican que uno de los problemas de la industria textil es la emisión de grandes cantidades de efluentes líquidos.

Cortázar-Martínez et al. (2012). Contaminación generada por colorantes de la industria textil, encontraron que los efluentes de la industria textil contenían elevadas concentraciones de colorantes, contaminantes inorgánicos, compuestos químicos sintéticos, materia en suspensión, orgánicos refractarios, tenso activos y componentes clorados. Aun cuando los

colorantes se encuentran presentes en bajas concentraciones, estos son visibles y hacen evidente la contaminación ambiental.

Pérez-Estrada et al. (2002). Degradación de desechos de laboratorio mediante fotocatalisis solar, realizaron la degradación del colorante azul de metileno residual usando el proceso foto-Fenton con energía solar. Sus resultados indican una degradación de hasta el 90% del colorante al cabo de 30 minutos de irradiación utilizando muestras de 40 mg/L de Fe (II). Al utilizar 100 mg/L de catalizador, la reacción de degradación fue tan rápida que no posibilito su seguimiento y aproximadamente en 15 minutos se degrado todo el colorante. Los autores, sugieren la posibilidad del acoplamiento de la tecnología de fotocatalisis solar con otras metodologías de tratamiento, como el tratamiento biológico, que podría significar una reducción considerable de los costos del proceso.

Arroyave et al. (2009). Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante tartrazina, utilizaron la técnica de fotocatalisis heterogénea empleando lámparas de luz ultravioleta obteniendo una remoción de 100% del colorante con 50 mg/L de catalizador TiO₂ y 0,2 % volumétrico de H₂O₂; asimismo con 50 mg/L de TiO₂ y 0,4 % volumétrico de H₂O₂.

Manrique et al. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocatalisis con TiO₂ usando luz artificial y solar, evaluaron una mezcla de colorantes azoicos por fotocatalisis con TiO₂ en suspensión, utilizando luz solar y artificial. Sus resultados muestran que, en el sistema con luz artificial, la concentración de colorantes y de TiO₂ fueron los factores que influyeron significativamente sobre la remoción del color y en la DQO. El sistema con luz solar, después de 3 horas de tratamiento, removió 100 % del color y 80 % de la DQO.

Hernández et al. (2012). Estudio cinético de la foto degradación del naranja de metilo en presencia de TiO₂, estudiaron la degradación foto catalítica de soluciones del colorante naranja de metilo utilizando óxido de titanio, iluminado con luz ultravioleta artificial y/o solar;

con la finalidad de conocer el efecto de las variables operacionales tales como fuente de radiación UV, concentración inicial de colorante y cantidad de fotocatalizador. Sus resultados muestran que la concentración inicial del colorante y la concentración de catalizador tiene un efecto importante sobre la velocidad de reacción, observando que la cinética de reacción corresponde a orden 0,5 usando como fuente de radiación una lámpara de 150 Watts de radiación, y de orden cero al utilizar radiación solar. En todos los casos la degradación alcanzo el 100%.

Corzo y Vega (2012). Estudio cinético de la degradación foto catalítica oxidativa de colorantes empleados en la industria textilera, realizaron la degradación foto inducida de colorante rodamina B empleando como foto catalizador óxido de cinc (ZnO) y usando luz solar como fuente de radiación fotónica, con agitación constante en sistemas abiertos expuestos al aire libre. La disminución en la concentración del colorante muestra una reacción cinética de pseudo–primer orden. Sus resultados demuestran que el proceso fotocatalítico es muy efectivo para la degradación de colorantes en efluentes provenientes de la industria textil, obteniendo un valor de la constante aparente de velocidad de 0.1 min^{-1} .

Alarcón (2014). Tratamiento de aguas residuales provenientes de la fase de teñido de la curtiembre mediante un sistema fisicoquímico basado en la oxidación avanzada con la ayuda de un semiconductor TiO_2 en presencia de luz UV, aplico el proceso de oxidación avanzada utilizando como semiconductor el dióxido de titanio TiO_2 en presencia de luz ultravioleta a escala laboratorio para el tratamiento de sus aguas residuales provenientes del proceso de teñido de curtiembres, encontrando una remoción de colorante hasta 83% para una concentración de 50 ppm de colorante.

Anaya (2019). Tratamiento de aguas residuales con colorantes reactivos mediante procesos de oxidación avanzada Fenton y variantes. El autor realizo el estudio comparativo del tratamiento del colorante reactivo sunfix Yellow S4GL (RAS) mediante proceso de oxidación

avanzada Fenton y $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, presente en aguas residuales de Tintorería en la Industria Textil. Sus resultados muestran valores óptimos aplicando el método $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$: $[\text{H}_2\text{O}_2] = 1292 \text{ mg/L}$; $\text{pH}=3$ y 3 lámparas UVC con las cuales consiguió una decoloración del 100% en 40 min de exposición a la luz. En el caso del método Foto-fenton, los valores óptimos fueron, $[\text{Fe}] = 3,52 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 300 \text{ mg/L}$, $\text{pH}=2,51$ y 2 lámparas UVC, con las cuales se consiguió una decoloración del 100% en 30 min de exposición a la luz. Concluye que el método Foto-fenton es más eficiente que el $\text{H}_2\text{O}_2 /\text{UV}$ pues emplea menor cantidad de H_2O_2 , menor potencia de radiación y logra la decoloración del 100% en menor tiempo.

Espinoza et al. (2022). Degradación fotocatalítica de azul de metileno utilizando TiO_2 impregnado en paredes de botellas de vidrio y de polietileno. Los autores utilizaron TiO_2 soportado en botellas de vidrio y tereftalato de polietileno (PET) recicladas como foto reactores irradiados con luz solar, con y sin adición de peróxido de hidrogeno. La degradación fue seguida mediante espectroscopia UV-Visible. Sus resultados muestran que sin adición de peróxido y luego de 4 horas se degrado un 98% en las botellas de vidrio, mientras que en las botellas de PET se requiere al menos 7 horas para degradar un 87%. Con la adición de peróxido favoreció el proceso fotocatalítico alcanzando 99,4% y 99,1% de degradación en botellas de vidrio y PET, respectivamente, luego de 4 horas de exposición a la radiación. En ambos casos la cinética de reacción fue de pseudo primer orden. Concluyen que la degradación del azul de metileno con la adición de peróxido es más efectiva, sin embargo, no se alcanzó la mineralización completa debido a la formación de productos intermedios altamente estables.

Tejada (2022). Degradación de colorantes utilizando radiación solar y visible mediante fotocatalizadores de $\text{Sr}_2\text{CeO}_4:\text{xNi}$. La autora plantea el desarrollo de un nuevo material fotocatalizador a partir de la modificación, por medio de dopaje con Ni, del material Sr_2CeO_4 , como una necesidad de contar con materiales alternativos para la remoción de colorantes contenidos en agua residual. Este nuevo material fue estudiado para fotodegradar azul de

metileno (AM) y rojo congo (RC) utilizando radiación solar y artificial. El dopaje (x) de Níquel incorporado en el sistema Sr_2CeO_4 fue en las concentraciones atómicas porcentuales de $x=0\%$, 1% , 3% y 5% at. Los fotocatalizadores de $\text{Sr}_2\text{CeO}_4:x\text{Ni}$ que presentaron mejor desempeño en la evaluación fotocatalítica fueron los de $x=0.5\%$ at. y 1% at. para la decoloración del AM y RC, respectivamente. Los análisis de actividad fotocatalítica mostraron una decoloración del 100% del AM y del 80% del RC en las soluciones de colorante. Concluye, que debido a la rápida decoloración de los colorantes AM y RC en soluciones acuosas, los fotocatalizadores de $\text{Sr}_2\text{CeO}_4:x\text{Ni}$ son potenciales candidatos para ser utilizados en procesos de limpieza de aguas residuales para el tratamiento de colorantes.

1.5 Justificación de la investigación

1.5.1 Justificación filosófica

En la década de 1970 surge un movimiento social denominado como filosofía ambiental o eco filosofía como un intento para conectar la humanidad y la alienación de la naturaleza de una forma continua a lo largo de la historia. Este movimiento ha destacado desde que punto el problema ambiental actual está asociada a valores, estilos culturales y pautas económicas de las sociedades o grupos más opulentos que deberían reconsiderarse seriamente. La eco filosofía exhibe múltiples tendencias: Ecología profunda, eco feminismo, ecología social, o distintas corrientes de ética ambiental. Todas asumen algún grado de crítica del antropocentrismo, con matices entre el biocentrismo y un antropocentrismo débil (Aboglio, 2015). Las ideas constructivistas o pos naturalistas (Weston, 1999) plantean preguntas cruciales sobre el significado de la naturaleza, el valor intrínseco y estético de lo natural, los retos medioambientales, como la degradación del medio ambiente, la contaminación y el cambio climático, y la relación entre el mundo natural, la tecnología y el desarrollo humano. La estética del medio ambiente, el diseño y la restauración se han convertido en las disciplinas de

intersección importantes que mantienen el desplazamiento de los límites del pensamiento ambiental, al igual que la ciencia del cambio climático y la biodiversidad y las cuestiones éticas, políticas y epistemológicas que plantean. Hoy en día, la filosofía medioambiental es un campo floreciente y cada vez más relevante. Los aspectos modernos dentro de la filosofía del medio ambiente incluyen temas relacionados con el agotamiento de los recursos no renovables y otros efectos dañinos y permanentes provocados al medio ambiente por los seres humanos, así como los problemas éticos y prácticos planteados por filosofías y prácticas de conservación del medio ambiente, la restauración y la política en general. Bajo este aspecto, la emisión de efluentes coloreados provenientes de la industria textil provoca efectos dañinos al medio ambiente por lo que conocer la cinética de degradación de colorantes resulta relevante para el diseño de equipos de tratamiento de efluentes que requieren ser tratadas antes de ser vertidos al ambiente.

1.5.2 Justificación técnica

Debido a que las estructuras químicas de los colorantes son demasiado complejas, estas no pueden eliminarse de los efluentes usando tecnologías convencionales (Shauld et al., 1991). En las últimas décadas, han surgido nuevas tecnologías denominados procesos de oxidación avanzada (POAs), que consiste en la producción de radicales hidroxilos (OH^\bullet) de alto potencial de oxidación mayor que el de otros oxidantes tradicionales (ozono, peróxido de hidrogeno, dióxido de cloro, y cloro). Estos radicales (OH^\bullet) son muy activos y pueden oxidar compuestos orgánicos principalmente por separación de hidrogeno o por adición electrofílica a dobles enlaces generando radicales orgánicos libres (R^\bullet) que a su vez reaccionan con moléculas de oxígeno formando un peróxido radical, dando inicio a un conjunto de reacciones de degradación oxidativa que podrían llevar a una completa mineralización de los componentes orgánicos (Garcés et al., 2004). Dentro de los POAs se tienen los procesos como la ozonización, radiación ultravioleta, H_2O_2 y la fotocatalisis homogénea y heterogénea. Estos

procesos resultan antieconómicos por el elevado costo de los reactivos (H_2O_2) y/o el alto consumo energético (uso de lámparas fluorescentes). Por otro lado, la fotocatalisis, consiste de una reacción fotoquímica que involucra la absorción de luz ultravioleta y un catalizador que actúa como un semiconductor. Durante este proceso se presentan reacciones de oxidación y reducción. Mediante esta tecnología se generan oxidantes (OH°) que en medio acuoso reaccionan con los contaminantes orgánicos degradándolos a dióxido de carbono y agua. Además, se genera desinfección superior al 99.9% de efectividad en eliminación de bacterias, virus y todo tipo de organismos patógenos sin utilizar ningún agente químico. Asimismo, no se producen ningún tipo de corrosión ni deterioro de las instalaciones al tratarse de un sistema de tratamiento físico que no modifica las propiedades organolépticas del agua. La fotocatalisis es, por tanto, adecuado para desinfección de agua residual o agua de un proceso industrial. Más aún si en vez de lámparas fluorescentes se recurre a la energía solar como fuente energética, los costos disminuyen significativamente y el proceso tecnológicamente es más viable que los métodos convencionales.

1.5.3 Justificación ambiental

En el Perú, la normatividad ambiental se da a través de la Ley del Medio Ambiente (Ley N° 28611). Esta ley reglamenta aspectos relacionados a la materia ambiental en el país, Asimismo, plantea a los ciudadanos una serie de derechos relacionados al tema ambiental, en tanto que se debe garantizar un ambiente saludable, equilibrado y apropiado para el desarrollo de la vida; y además fija deberes, en la medida en que todos estamos obligados a contribuir una efectiva gestión ambiental y a proteger al ambiente. Uno de los objetivos de la ley, es la regulación de los numerosos instrumentos que contribuyen a la gestión ambiental, y la consagración de la responsabilidad por daño ambiental. Esta ley informa sobre el Estándar de Calidad Ambiental (ECA), como un indicador de la calidad ambiental que mide la concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos que se

encuentran presentes en el aire, agua o suelo, pero que no representan peligro para los seres humanos ni para el ambiente.

La ley también establece, que el estado fomenta el tratamiento de las aguas residuales con fines de su reutilización, considerando la calidad requerida para su reuso, sin perjudicar la salud humana, el ambiente o las actividades en las que se reutilizaran.

Entre los principales aspectos medioambientales generados por la industria textil están los efluentes altamente contaminados con sustancias como colorantes, sales, metales, surfactantes, desinfectantes, insecticidas, grasas, solventes, entre otras, provenientes de cada uno de los procesos que lleva a cabo esta industria (Dos Santos et al., 2006 y Ramesh et al., 2007). Aun cuando los colorantes se encuentren presentes en bajas concentraciones, estos son visibles y hacen evidente la contaminación ambiental; por lo tanto, estas deben ser removidas antes de ser descargadas al ambiente receptor (mar, ríos, lagos, campo, etc.)

1.5.4 Importancia de la investigación

El mundo de las tinturas en la industria textil y el efecto que ellas tienen sobre el medio ambiente y las personas que trabajan manejándolas a diario se convierte en una problemática global en términos tanto ecológicos como laborales. Efectivamente, el subsector del tintado, se encuentran en la sexta posición de las industrias más contaminantes del planeta. Todo para abastecer al mercado de la moda de prendas coloridas cada temporada. Por ello, la degradación de colorantes de la industria textil ha sido objeto de estudio de muchos investigadores y medioambientalistas debido al interés que este problema de contaminación ha generado en todo el mundo. La gran variedad de tintes y colorantes empleados en el proceso de teñido, entre ellos los colorantes directos y reactivos que son difíciles de degradar por su alta solubilidad en agua, resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables, resulta relevante su

tratamiento antes de ser vertidos al ambiente. A pesar de que muchos de los colorantes no son tóxicos, los productos resultantes de su degradación pueden ser nocivos para la vida (Chung et al., 1992; Chung & Stevens, 1993; y Weisburger, 2002). Muchos de los colorantes son estables a la luz, temperatura y degradación microbiana, estas características hacen de las colorantes moléculas recalcitrantes. Además, algunos compuestos químicos orgánicos podrían ser absorbidos y utilizados por algunas plantas, tales como: el melón, el rábano y la papa. Los efluentes textiles pueden reducir la germinación de las semillas y el crecimiento temprano de algunos vegetales (Cortázar et al., 2012). Por otro lado, las estructuras químicas de los colorantes resultan, a menudo, demasiado complejas y no pueden eliminarse de los efluentes usando tecnologías convencionales. Por consiguiente, su eliminación en los efluentes de la industria textil representa un reto tecnológico en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

1.6 Limitaciones de la investigación

La presente investigación tiene carácter explicativo del fenómeno de degradación de colorantes (directo y reactivos) utilizados en la industria textil. Para el efecto, se recurre al método de la fotocatalisis solar heterogénea usando como catalizador el óxido de zinc. El objetivo de este proceso fue conocer la efectividad de este catalizador en la degradación de la concentración de los colorantes directos y reactivos en estudio. El enfoque cuantitativo permite establecer relación causal entre las distintas variables independientes (concentración inicial, cantidad de catalizador y tiempo de reacción) para la comprobación de las hipótesis planteadas. Asimismo, se trata de demostrar que sin catalizador la fotocatalisis no existe.

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se presentaron inicialmente cierta limitación en la disponibilidad de los colorantes directos y reactivos. Existe una gran variedad de este tipo de colorantes, por lo que se decidió utilizar el rojo escarlata (directo) y los

colorantes, azul corazol y el amarillo synozol (ambos reactivos) que utiliza la industria textil proveídos por la Colourtex the Dyestuff Company. Por otra parte, la disponibilidad de los equipos de agitación magnética (reactor) y el periodo de radiación solar hizo que las pruebas experimentales se llevaran a cabo en distintas fechas y en épocas de verano.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Determinar la degradación de los colorantes directos y reactivos utilizados en la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando el óxido de zinc como catalizador.

1.7.2 Objetivos específicos

- Determinar la cinética de degradación de los colorantes directos y reactivos en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea.
- Determinar el efecto de la concentración inicial de las muestras de colorante en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea.
- Determinar el efecto de la concentración del fotocatalizador, en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea.

1.8 Hipótesis

1.8.1 Hipótesis general

Si se degrada la concentración de los colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador, entonces el proceso fotocatalitico es una alternativa viable para el tratamiento de efluentes de esta industria.

1.8.2 Hipótesis específicas

- Si existe degradación de la concentración de los colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador, entonces se puede determinar la cinética de la reacción de degradación H1.
- Si al variar las concentraciones iniciales de los colorantes, el proceso de degradación fotocatalítica solar heterogénea también varía, entonces hay un efecto de la concentración inicial de los colorantes sobre el proceso H2.
- Si al variar las concentraciones del fotocatalizador, el proceso de degradación fotocatalítica solar heterogénea también varía, entonces hay un efecto de la cantidad de catalizador sobre el proceso H3.

II. MARCO TEORICO

2.1 Marco conceptual

La industria textil en el mundo es uno de los sectores industriales clásicos de mayor complejidad, formado por pequeñas y medianas empresas. Particularmente, el Perú es muy reconocido por la calidad de sus fibras naturales, como la fibra de alpaca y el algodón Pima, que le ha permitido penetrar con mucho éxito mercados exigentes y conocedores en este rubro (Díaz, 2016). Esta industria abarca diversas actividades que van desde el tratamiento de las fibras textiles para la elaboración de hilos, hasta la confección de prendas de vestir y otros artículos, por lo que genera un sinnúmero de empleos directos e indirectos y desempeña un rol muy importante en la economía. El sector de interés de estudio de muchos investigadores, es el proceso de *tintorería* y *acabados*, que no solamente utiliza colorantes y químicos, sino también una gama de productos especiales conocidos como auxiliares de teñido, que en conjunto generan efluentes líquidos contaminantes. El impacto de estos efluentes líquidos en el ambiente es muy variado, por la gran variedad de materias primas, reactivos químicos y de métodos de producción (Mansilla et al., 2015). La cantidad de agua empleada varía en forma considerable dependiendo del proceso específico y del equipamiento de la planta. En promedio se han reportado entre 125 y 170 litros de agua por kilogramo de producto (USEPA, 1997). En consecuencia, el tratamiento de estos efluentes es y ha sido de interés para muchos investigadores debido al impacto con la naturaleza. Cabe mencionar que, de los colorantes utilizados en los textiles, un 2 % es descartado directamente a los efluentes y el 10% es perdido durante el proceso de coloración textil (Pearce et al., 2003).

La mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil no son biodegradables y sus subproductos son tóxicos, aunque la composición del agua residual dependerá de las sustancias químicas que se usen durante el proceso (Manu & Chaudhari, 2002; Kuhad et al., 2004; Dos Santos et al., 2007; y Ranganathan et al., 2007). Tecnologías como el proceso

Foto-Fenton han sido utilizados con éxito para eliminar fenoles, fenoles clorados y plaguicidas en soluciones acuosas, así como también para reducir la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales. Además, se ha aplicado con mucho éxito en el tratamiento de aguas residuales contaminados con colorantes, plaguicidas y otros compuestos disueltos en agua (Forero et al., 2005).

Cuando la materia orgánica contenida en las aguas residuales es biodegradable, los tratamientos biológicos convencionales son los más económicos y utilizados. Sin embargo, si la materia orgánica no es biodegradable, es tóxica y se encuentra en concentraciones elevadas se debe recurrir a otras técnicas alternativas como son los procesos de oxidación avanzada POAs, que implican la formación de radicales hidroxilos (OH°) altamente reactivos, capaces de destruir un amplio rango de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Este radical es un potente oxidante capaz de degradar rápidamente muchos compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono, agua y sales minerales y puede ser generado por medios fotoquímicos (luz solar) o energía artificial (lámparas UV). Cabe resaltar, que aprovechar la radiación solar como fuente luminosa permite disminuir el costo energético y constituye un importante, y significativo valor ambiental.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Colorantes

Son sustancias orgánicas fluorescentes de color intenso que fijan color a otra sustancia incolora, mediante una absorción selectiva de luz (Moeller y Garson, 2003). Los colorantes utilizados actualmente en la industria textil podrían ser productos naturales extraídos de plantas y animales, o producidos por síntesis química a escala comercial. En el siglo XX, han surgido una extensa variedad de colorantes que resolvieron el problema de la tintura de fibras tan disímiles entre sí como el algodón, la lana o el poliéster entre otras. Los productos desarrollados

se agrupan en familias de colorantes con similares características químicas que poseen cualidades propias en cuanto a la aptitud para la tintura de fibras, propiedades de solidez, tipos de procesos, etc. La mayoría de los colorantes actuales son comercializados como polvos (sólidos a temperatura ambiente) por una comodidad operativa de los usuarios, pero son fácilmente solubilizados en agua al momento de ser utilizados.

2.2.1.1 Clasificación de los colorantes. En general, los colorantes se clasifican por su origen, constitución o estructura química y su aplicabilidad a la fibra.

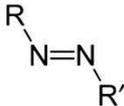
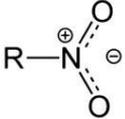
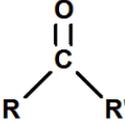
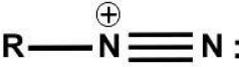
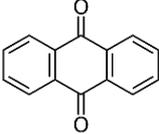
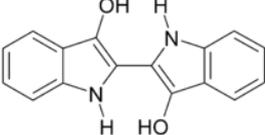
A. Origen. Pueden ser: Naturales de origen vegetal o animal (Ejemplo: el nogal, la curcumina, antocianina, el carmín de cochinilla, etc.) y los sintéticos que son elaborados en laboratorios mediante síntesis de derivados del petróleo con características que superan ampliamente a la de los naturales, principalmente en las propiedades fisicoquímicas, las ventajas funcionales que estos muestran en su aplicación, y como también en sus teñidos en lo que respecta a las solidez generales (Castañeda, 2013). Su resistencia a la degradación en cualquiera de sus formas, ha sido tan perfeccionada que en la vestimenta actual la vida del color es ya comparable a la propia vida del tejido y de la prenda misma. Otro aspecto técnico muy importante es el costo y la capacidad de producción. Esta última, hizo que los precios fueran cada vez más menores, con productos novedosos y de fácil disponibilidad.

B. Constitución química. Básicamente, los colorantes están constituidos por tres grupos funcionales presentes en su molécula: el grupo **cromóforo**, que es el responsable de la absorción de la luz dándole la propiedad de color a la molécula (generador de color), los grupos **auxocromos** son grupos de átomos con carga positiva que tienen la propiedad de intensificar la acción de un grupo cromóforo dentro de la misma molécula, y por último el **solubilizador**, que da afinidad a diversos solventes y contiene iones como $-SO_3^-Na^+$, $-NH_3^+Cl^-$, $-SO_2^-NH_2^+$, $-O^+Na^+$ (Dávila, 2012). A la sustancia que contiene un grupo cromóforo se

denomina cromógeno. Los grupos cromóforos son grupos funcionales de la molécula responsable de la absorción, entre estas tenemos los azoicos (-N=N-), carbonilo (=C=O), metilo (-CH₃), el carbiminio (=C-NH), el carbino (=C=N-), el nitro (NO₂-) y grupos quinoides (ver figura 1). El grupo cromóforo otorga color y el auxocromo lo intensifica (solo no genera color).

Figura 1

Estructura química de algunos colorantes comúnmente empleados en la industria textil

Familia	Grupo cromóforos	Gama de colores
Azoicos		amarillo
Nítros		Amplia gama de colores
Carbonilo		Verde/rojo
Diazonio		Amplia gama de colores
Antraquinonas		Amarillo/violeta
Índigo		Azul/violeta

Nota: tomado de Cortazar-Martinez et al. (2012)

C. Aplicabilidad a la fibra.

- **Ácidos:** Son sales con el anión coloreado (aniónicos) de grupos sulfónicos, carboxílicos o hidroxilos fenólicos que actúan en medio ácido. La unión a las fibras de lana es por enlace iónico (fuerzas electrostáticas).
- **Básicos:** Son sales con el catión coloreado (catiónicas) de grupos amónicas o complejos formados por cloruro de zinc o aminas que actúan en medio básico. La unión a las fibras de lana es por enlace iónico (fuerzas electrostáticas).
- **Dispersos:** Son más utilizados en la industria textil para teñir fibras sintéticas como el polyester, el acetato y el triacetato. Son sustancias polares que contienen grupos azoicos o antraquinonas.
- **Directo o sustantivos:** son compuestos del tipo azo de alto peso molecular que contiene grupos sulfónicos que facilitan la solubilidad al agua y tiñen directamente el tejido sin necesidad de alguna ayuda posterior. Pueden ser ácidos o básicos. Estos se fijan mediante fuerzas (electrostáticas) de Van der Waals y por puentes de hidrógeno, no presentan reacción química, son simplemente fijados como disolución sólida y de acuerdo a la ley de reparto de Nerts, donde se tiene: $\text{Concentración de colorante en disolución} / \text{Concentración de colorante en la fibra} = \text{constante}$. Lo cual es debido a que el colorante y la fibra son sustancias no iónicas y el colorante está repartido en ambas fases (baño y fibra) de forma unimolecular (sin agregaciones moleculares). El 75% del consumo se destina al tinte de las fibras de celulosa (IPPC, 2003). En estos colorantes, predominan los compuestos cuaternarios de amonio con largas cadenas de hidrocarburo, estas forman compuestos similares a la sal con la molécula del colorante. Los compuestos cuaternarios del amonio suelen ser tóxicos para los organismos acuáticos (Walters et al., 2005). Debido a su alta solubilidad se requiere utilizar sal para obtener un agotamiento óptimo. Se usa mayormente para fibras de poliéster o mezclas de poliéster algodón en variedad de formas, se procede en

forma más sencilla, simplemente las telas se remojan con la solución de colorantes y de inmediato se sube la temperatura hasta 130 ° C o usar inhibidores de relajación (llamados, Carrier) a menores temperaturas como a 100° C, porque incluso humedecidas presentan poros de 8-10 Å de diámetro (muy pequeños), lo que impide la absorción de sustancias en disolución coloidal, produciendo dificultades de teñido, de ahí el frecuente uso de líquidos orgánicos hinchantes y relajantes del contexto fibroso (Carrier) para el teñido de estas fibras (Gonzales, 2006).

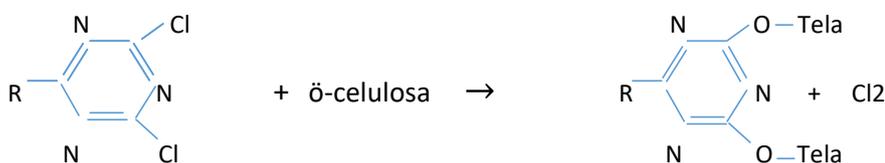
- **Reactivos:** Son capaces de reaccionar químicamente con un sustrato para formar un enlace covalente sustrato-colorante. Estos colorantes dan excelentes propiedades de solidez y brillante gama de colores, son populares en el teñido de algodón y rayón. Un tercio de los colorantes utilizados para la celulosa son reactivos y se emplea una cantidad cada vez mayor de ellos en la lana y el nylon. Los colorantes contienen grupos químicos que se unen por enlace covalente a la tela. En el caso de la celulosa, se trata de grupos que son típicamente de pirimidina, triazina o de sulfonas y que experimentan una reacción con los grupos de hidroxilo de la celulosa por sustitución o por adición nucleofílica. La estructura básica de un colorante reactivo, generalmente, se compone de dos elementos fundamentales que son: Parte cromófora y parte reactiva. El cromoforo, determinara principalmente el matiz del colorante y es a la vez, el responsable de otras propiedades del colorante. La parte reactiva, es responsable del tipo y velocidad de reacción entre la fibra celulósica y el colorante.
- **Pigmento:** son colorantes solidos finamente divididos insolubles en agua a temperatura ambiente. Por sus características de insolubilidad, los pigmentos son empleados para ser depositados sobre el sustrato textil y adheridos a él por medio de un ligante, en la técnica de estampación.
- **Mordientes:** El mordiente es un producto que se adiciona a la fibra y es absorbida por ella, pudiendo consecutivamente atraer el colorante. Este término se usa principalmente para los

colorantes que se adicionan usando óxidos metálicos como mordiente. Especialmente se emplean como mordientes los óxidos de aluminio y cromo para formar precipitados insolubles.

El mecanismo por sustitución nucleofílica se da en colorantes que llevan grupos reactivos que se basan en núcleos heterocíclicos de nitrógeno. Los átomos de nitrógeno en el anillo de heterocíclico, gracias a su electronegatividad, causan una deficiencia de electrones en los átomos de carbono adyacentes haciéndolos susceptibles al ataque de agentes nucleofílicos. De las tres triazinas, solo la triazina simétrica 1,3,5 conocida también como cloruro de cianuro es de importancia práctica. Uno de los átomos de carbono presentes en la triazina puede reaccionar con el cromógeno, quedando dos átomos de cloro para reaccionar con los grupos oxidrilos en la celulosa y aminas en la lana. Debido a las propiedades electronegativas de los átomos de nitrógeno del anillo triazinico, este compuesto es susceptible al ataque por parte del agente nucleofílico. El agente nucleofílico ataca al átomo de carbono y expulsa al átomo de cloro (ver figura 2).

Figura 2

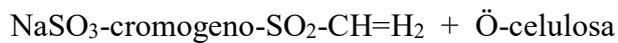
Reacción del colorante reactivo con el agente nucleofílico en la superficie de la tela



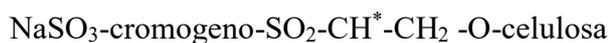
Colorante reactivo Celulosato (agente nucleofílico) Colorante fijado a la fibra

Nota: tomada de Costa (1990) y Díaz (2016)

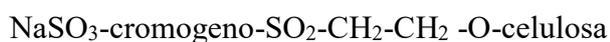
El mecanismo por adición nucleofílica para formar enlaces del tipo éter. Un enlace doble no saturado puede ser activado por un grupo adyacente de electrones (celulosato de sodio) y así formar un puente etérico entre el colorante y la fibra por adición nucleofílica. Así:



↓



↓



El enlace doble del núcleo reactivo no está presente como tal en el colorante mismo, pero es formado posteriormente durante la fijación del colorante en una reacción catalizada por álcali (Costa, 1990).

La baja fijación de colorantes, es un problema en el tintado reactivo desde hace mucho tiempo. No obstante, se ha seguido usando por que tanto su capacidad de reproducir sombras como su durabilidad de color son excelentes. Se está trabajando para aliviar el impacto medioambiental del tintado reactivo.

2.2.1.2 Propiedades fisicoquímicas de los colorantes reactivos.

A. Solidez a los álcalis. El colorante soluble debe ser resistente a álcalis diluidos, (soluciones de carbonato sódico o amoníaco) y no debe presentar cambios repentinos del tono del color, por ser los álcalis los medios del transporte y cuando se adicionan el colorante reaccionan en forma instantánea y con gran fuerza, por eso es que se debe tener mucho cuidado en la dosificación.

B. Rendimiento. El teñido es determinado por la composición química de los colorantes y de las propiedades del cuerpo a teñir. La capacidad de rendimiento de un colorante, es transmitida por tinturas en diversas concentraciones y determinada con una curva de rendimiento.

C. Comportamiento de fijación. El comportamiento de fijación de un colorante es transmitido y caracterizado por decoloraciones, cuanto colorante (%) en una unidad de tiempo (Generalmente en minutos) es fijado en el sustrato celulosa. Junto a la estructura química del colorante, la velocidad de fijación, determinada en gran parte por el tipo de curtición, el tipo y la cantidad de recurientes aplicados, del valor de pH y de la temperatura del teñido.

D. Homogeneidad. Un colorante es homogéneo desde el punto de vista de la fabricación si tiene menos del 5% de colorante de matizado, es decir cuando no se le adiciona ninguna otra sustancia colorante en cantidad importante. Esto se verifica realizando una prueba que consiste en humedecer un papel de filtro en el borde, se coloca una punta de espátula de colorante, se sopla y las partículas del colorante pasan por la zona húmeda, quedando adheridas y comienzan a disolverse. Al soplar se dispersan los distintos componentes de la mezcla y se ven los distintos colores. Desde el punto de vista químico un colorante no es homogéneo ya que en toda reacción química de formación de un colorante se obtiene una mezcla de productos secundarios siempre.

E. Intensidad de color. Es una importante propiedad y es indagada con diversos métodos. De acuerdo a cada tipo de colorante y al tipo de curtición y recurción, para un determinado teñido de profundidad se requieren diferentes cantidades de colorante.

F. Estabilidad al agua dura. El colorante disuelto, no debe enseñar ninguna floculación al diluirse con agua dura. Colorantes inestables a la dureza producen variadas coloraciones, desigualdades y desplazamientos de tonos.

G. Solubilidad. La solubilidad es importante para teñidos a baja temperatura, para teñidos con polvo y para teñidos sin baños. Colorantes difíciles de disolver, pueden conducir a formaciones de manchones como puntos y desigualdades. En las mezclas de colorantes, se pueden presentar desplazamientos del tono. Estabilidad de complejo: Algunos complejos colorantes de metal, especialmente el complejo de hierro, pueden ser desplazados de su combinación y producir desplazamientos del tono. No se debe poner en contacto con metales, por ejemplo, cobre, placas de cubrir de cobre o tuberías de cobre.

H. Estabilidad a los ácidos. El colorante disuelto, debe ser resistente a ácidos diluidos, como por ejemplo ácido fórmico o soluciones ácido sulfúrico y no debe flocular.

I. Solidez a los ácidos. El colorante disuelto, no debe conllevar a cambios repentinos de color con ácidos diluidos como por ejemplo cuando ocurre la neutralización, donde el tono vira momentáneamente pero luego se regenera y vuelve a su condición inicial.

2.2.1.3 Colorantes utilizados en el experimento.

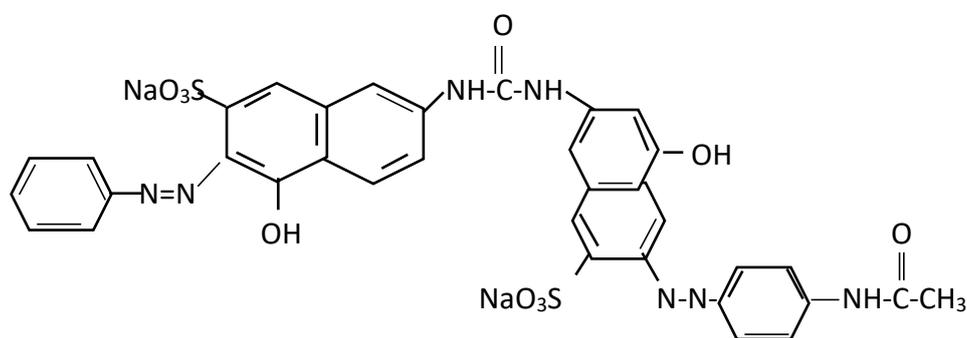
A. Colorante directo rojo escarlata. Denominado también directo scarlet F2G (Direct red 224), es de color intermedio entre bermellón y carmín. A un nivel más específico, es coloración roja vivo, de apariencia polvo, de fórmula molecular $C_{41}H_{34}N_{10}Na_4O_{18}S_4$, de peso molecular alto 1174,99 (ver figura 3). Es utilizado para seda, acrílico, mordiente tanino para teñir algodón, también puede ser utilizado para cuero, papel, cáñamo y pegamento directamente impresión y teñido. Asimismo, puede utilizarse en aceite y grasa, color de la pintura, y en la preparación de color en tinta.

B. Colorante reactivo azul corazol RD. Colorante reactivo de tintura continua, sólido granulado fino, color oscuro, azul intenso. Su estructura química es granulada de un cromóforo de fenol/sódico. Peso específico a 20 °C es 1,1. Carácter aniónico. Tiene buena compatibilidad

con los auxiliares aniónicos y no iónicos. En caso de productos catiónicos y resinas sintéticas pueden ocurrir precipitaciones. Tiene estabilidad a las concentraciones usuales de álcalis y ácidos. Aplicación en la tintura de mezclas de fibras celulósicas y de poliéster con colorantes reactivos y dispersos en proceso termosol con fijación posterior y en proceso termosol sobre fibras de poliéster. Las cantidades de aplicación dependen de la composición de la fibra y de la estructura del tejido. Cuánto más ligeras y abiertas sean las calidades de tejido, y más alto sea el porcentaje de las fibras sintéticas, más cantidad de colorante azul corazol se necesita.

Figura 3

Estructura química del colorante rojo escarlata 224, F2G.



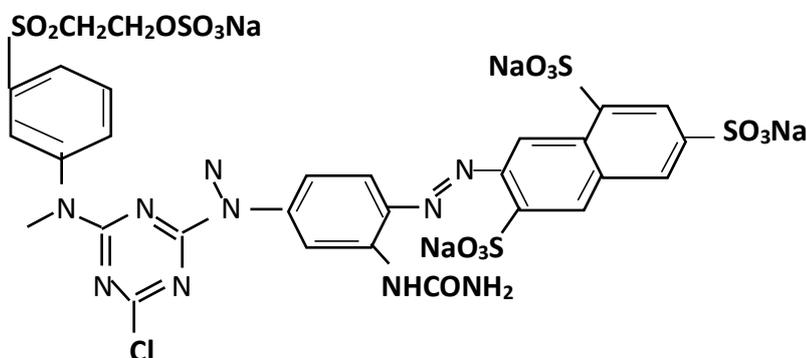
Nota: Tomada de Morales-Guzmán y Melgoza-Aleman (2009)

C. Colorante amarillo synozol S-22. De estructura molecular $C_{28}H_{20}ClN_9Na_4O_{16}S_5$, y peso molecular 1026.25. Es un colorante monoazoico y reactivo por lo que es de gran importancia tratar los efluentes que lo contienen. La estructura de este colorante está caracterizada por la presencia de un grupo azoico (monoazo) y cuatro grupos sulfónicos (ver figura 4). Es muy utilizado en la industria textil para el teñido de algodón, seda artificial y fibras sintéticas de poliéster, tiene buena reproductibilidad y fijación del color a la fibra y no pierde color cuando entra en contacto con el agua y el detergente. Este colorante, reacciona con el grupo hidroxilo celulósico de manera dual (Gul, 2007) ya sea por adición nucleofílica a un doble enlace activado o por sustitución nucleofílica del átomo de cloro reactivo, debido a esto

presenta buena solidez a la luz. Asimismo, se ha demostrado que este colorante tiene un efecto muta génico y carcinogénico en los cuerpos de agua y humanos (Patil y Shukla. 2015).

Figura 4

Estructura química del colorante amarillo reactivo.



Nota: Tomada de Butrón (2015)

2.2.2 Tratamiento de aguas residuales

Debido a la contaminación ambiental que generan los efluentes de la industria textil, la eliminación de los colorantes en este tipo de efluentes representa un reto tecnológico en los procesos de tratamiento de efluentes residuales. Actualmente, se disponen de varios métodos para el tratamiento de aguas residuales con colorantes que pueden aplicarse eficientemente. Sin embargo, algunos son muy específicos y muy costosos, por lo que dificultan su aplicabilidad para una amplia variedad de colorantes y no resuelven totalmente el problema de la decoloración (Kuhad et al., 2004 y Anjaneyulu et al., 2005). El objetivo del tratamiento de las aguas residuales es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable al ambiente, y un residuo sólido o lodo que con un proceso adecuado sirve como fertilizante orgánico para la agricultura o jardinería. Los procesos de tratamiento básicamente son: el tratamiento primario o mecánico, el secundario o biológico y el terciario o final donde se mejora la calidad del efluente al estándar requerido por las normas, antes de ser vertidas al ambiente (mar, ríos, lagos, campo, etc.). En los últimos años han surgido nuevas tecnologías de tratamiento terciario (nano

filtración, micro filtración, electrocoagulación) y los procesos de oxidación avanzada (foto-fenton, la fotocátalisis heterogénea y homogénea), así como también tratamientos combinados de fotocátalisis y oxidación electrolítica. La aplicación de estos tratamientos combinados en muchos casos ha permitido reducir significativamente el contenido de colorantes en los efluentes.

2.2.3. Normativas legales

En el Perú, el Decreto Supremo N° 010-2019 de fecha, 09 de marzo del 2019, publicado en el diario El Peruano, deroga los decretos supremos 021-2009 y 003-2011 referente a los valores máximos admisibles para de las descargas de aguas residuales y aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domesticas en el sistema de alcantarillado sanitario, con la finalidad de preservar las instalaciones, la infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos de los servicios de alcantarillado sanitario e incentivar el tratamiento de aguas residuales para disposición o reúso, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. En los artículos 7 y 8 señala los derechos y obligaciones de los usuarios no domésticos. En los artículos 11 y 12 indica sobre los laboratorios acreditados y toma de muestras. En el artículo 13 señala las descargas permitidas y las penalidades de tipo económico o de suspensión temporal en caso de no cumplimiento de los VMA establecidos en el anexo 1 (ver tabla 1). En el artículo 14, señala las descargas ´prohibidas que sobrepasen los VMA, como residuos sólidos, líquidos, gases o vapores, sustancias inflamables, radiactivas, explosivas, corrosivas, toxicas. Gases procedentes de escapes de motores de cualquier tipo, disolventes orgánicos y pinturas, materias colorantes y otros que establezca la normatividad sectorial.

Tabla 1

Valores Máximos Admisibles de las aguas residuales no domésticas

PARÁMETRO	UNIDAD	SIMBOLOGÍA	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	100

Nota. D.S. N°021-2009 – Vivienda. Tomado de la publicación en El Peruano (2009).

2.2.4. Procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POAs) consisten en generar cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, este concepto fue utilizado por primera vez por Glaze y Chapin (1987), quienes definieron como procesos que implican la producción y aplicación del radical hidroxilo (OH°), de alto potencial de oxidación. Se presentan dos derivaciones principales: Procesos fotoquímicos y no fotoquímicos.

A. Procesos no fotoquímicos. Comprende: la ionización en medio alcalino, ozonización usando H_2O_2 , procesos fenton ($\text{Fe}^+/\text{H}_2\text{O}_2$), oxidación electroquímica, radiólisis gamma y tratamiento con haces de electrones, plasma no térmico y ultrasonido (García, 2014).

B. Procesos fotoquímicos. Consiste en la transformación de las moléculas producidas por la interacción de la materia (a nivel átomo o molecular) y la luz. Por ejemplo: la fotólisis del agua en el ultravioleta al vacío (UVV), UV con peróxido de hidrógeno, UV con ozono, procesos foto-fenton y la fotocatalisis heterogénea usando como catalizador un oxido metálico (García, 2014).

¿Cuáles son las ventajas que traen los POA's frente a otros métodos?

La ventaja es que cambian químicamente la estructura del contaminante, además se logra la destrucción completa del mismo, proceso llamado mineralización; son muy útiles para compuestos de tipo refractario que resisten otro tipo de tratamiento.

Otra cualidad que los hace muy especiales, es la baja concentración en la cual pueden ser funcionales, llegando a generar remoción de partes por billón (ppb), no generando productos secundarios o presentándose en muy baja cantidad, mejoran además las propiedades organolépticas del agua y consumen muchísima menos energía que tratamientos alternativos como la incineración.

El principal inconveniente de los POAs es el elevado coste de los reactivos utilizados (H_2O_2) y/o el alto consumo eléctrico para la generación de ozono y/o para las lámparas de UV. No obstante, las técnicas de ozonización y las de irradiación con UV, están total o parcialmente comercializadas.

Por otra parte, las técnicas de fotocátalisis solar, es una alternativa que consiste en utilizar la energía solar como fuente energética en lugar de las lámparas UV, para la degradación de los contaminantes, por su economía en recursos energéticos y en lugares con altos índices de radiación durante todo el año, estos procesos son potencialmente interesantes, pero se encuentran en una fase incipiente de comercialización (Romero et al., 1999).

2.2.5. Fotocatálisis

Consiste en la aceleración de una reacción foto química en presencia de un catalizador (Mills et al., 1997). Estos procesos pueden ser homogéneos o heterogéneos.

A. Fotocatálisis homogénea. En este proceso el catalizador está disperso en el agua junto con los contaminantes orgánicos a tratar, por lo tanto, todos los componentes que participan en el proceso están en la misma fase. Los fotocatalizadores homogéneos más

comúnmente usados incluyen, ozono, oxido de metal de transición y foto-Fenton sistemas (Fe^+ y $\text{Fe}^+/\text{H}_2\text{O}_2$). La especie reactiva es el ion hidroxilo OH° que se utiliza para diferentes propósitos.

Por otro lado, el reactivo Fenton, descubierto por Henry John Horstman Fenton a finales del siglo XIX, consiste de una mezcla de peróxido de hidrógeno y sal de hierro (II). En sus variadas formas este sistema es utilizada fuertemente en el tratamiento de aguas y suelos contaminados (Rodríguez et al., 2002). La principal ventaja de este proceso es su mayor sensibilidad a la luz hasta una longitud de onda de 580 nm, lo que supondría un mayor aprovechamiento de la energía solar respecto al TiO_2 . Asimismo, la ventaja de la fotocatalisis homogénea es la existencia de un mayor contacto entre el contaminante y el agente oxidante (Bauer et al., 1999). Las desventajas son: el bajo pH requerido (menor de 3) y la separación del hierro una vez terminada la reacción. El método foto-Fenton ha sido utilizado satisfactoriamente en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con contaminantes fenólicos, colorantes, ácidos carboxílicos, compuestos aromáticos nitrogenados y para la degradación de plaguicidas disueltos en agua (Cáceres et al., 2002).

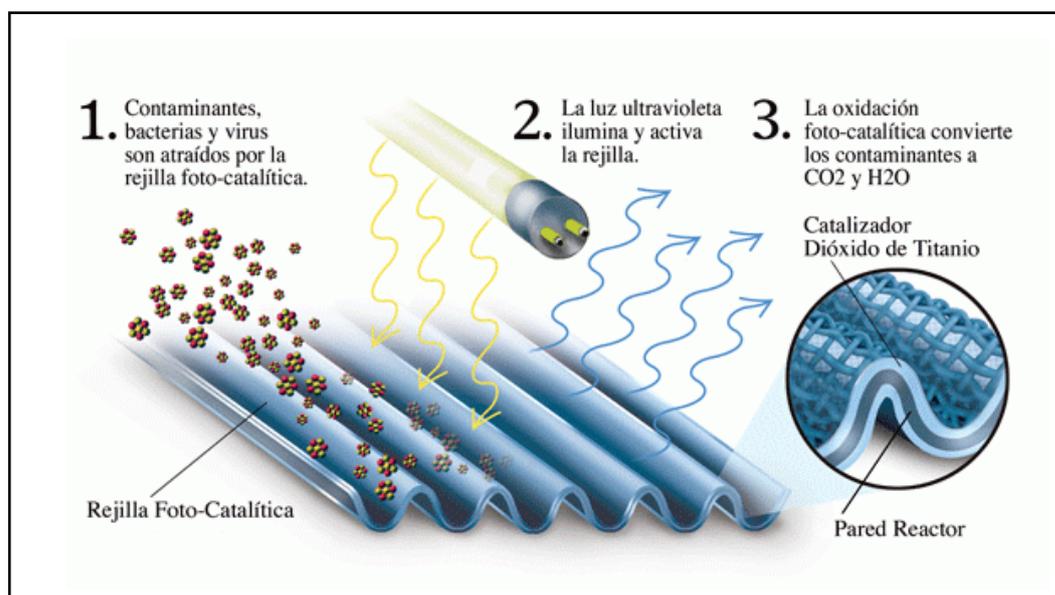
B. Fotocatalisis heterogénea. Consiste en el uso de un sólido semiconductor (por ejemplo, el TiO_2) que es estable bajo irradiación para estimular una reacción en la interface de solido/liquido o solido/gas (ver figura 5). El proceso comprende una serie de reacciones: oxidaciones leves o totales, des hidrogenación, transferencia de hidrogeno, la deposición de metales, la desintoxicación del agua, la eliminación de contaminantes gaseosos, etc.

La mayoría de estudios sobre fotocatalisis utilizaron lámparas como fuente de energía. Dentro de ellas tenemos las de mercurio, de xenón y los denominados simuladores solares. Estas lámparas proveen luz en un rango de longitudes de onda por debajo de los 400 nm, necesario para la excitación del TiO_2 . Una característica de estos sistemas es el uso de

catalizadores soportados, fijado en algún tipo de soporte inerte dentro del reactor. De esta forma se facilita la recuperación del catalizador, aunque se reduce fuertemente el rendimiento del proceso. Un sistema con catalizador soportado relativamente eficiente debe poseer una actividad foto catalítica apropiada muy parecida a los sistemas homogéneos (catalizador en suspensión), baja pérdida de carga, larga duración y costo razonable. Sin embargo, lograr todas estas características indicadas aún no ha sido posible. Otro de los inconvenientes de estos reactores, es el reemplazo del catalizador cuando éste pierde su actividad, lo que genera un incrementando sustantivo en el costo global del sistema. En cambio, en sistemas que utilizan catalizadores en suspensión se garantiza una mayor eficiencia, menor pérdida de carga y un buen contacto de transferencia de masa del fluido y el catalizador. Además, la recuperación del catalizador del medio reactivo resulta sencillo debido a la desestabilización de la suspensión coloidal y la posterior sedimentación del catalizador.

Figura 5

Esquema del proceso foto catalítico



Nota: Tomada de CRIOGES® (2021)

2.2.5 Variables que afectan el proceso fotocatalítico

Los parámetros que influyen de forma cualitativa como cuantitativamente en el proceso fotocatalítico son:

A. Longitud de onda e intensidad de luz. El óxido de zinc absorbe longitudes de onda inferiores a 510 nm, correspondiente a la región de luz ultravioleta. Dentro de este rango cualquier radiación tendrá la capacidad de generar en el semiconductor los pares electrón e^- /hueco h^+ . Los electrones excitados son transferidos hacia la especie reducible, a la vez el catalizador acepta electrones de la especie oxidable que ocuparan los huecos, de esta forma, el flujo neto de electrones es nulo y el catalizador permanece inalterado (Serrano, 2013).

B. Catalizador. Debe reunir las siguientes características: gran área superficial, distribución uniforme de tamaño de partícula, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna (Blanco et al., 1997). Normalmente se emplean polvos cuyas partículas tienen radios micrométricos. Se podría esperar que, si se utiliza mayor cantidad de catalizador, la eficacia sería mayor, sin embargo, el aumento de partículas también aumenta la turbidez, lo que dificulta la difusión de la luz solar. La mayoría de los estudios realizados usando TiO_2 se encuentra con concentraciones entre 0,5 y 1 g/L (Gómez et al., 2000).

Recientemente, la fotocatalisis oxidativa heterogénea usando óxido de zinc y luz UV ha surgido como una nueva alternativa prometedora para la degradación de contaminantes orgánicos persistentes a productos biodegradables y sustancias menos toxicas (Iglesia-Juez et al. 2013). El óxido de zinc, en su estado puro es un polvo blanco, insoluble en agua y alcohol, baja toxicidad, disponibilidad a bajo costo, pero es soluble en la mayoría de los ácidos. Posee un ancho de banda (*band gap*) relativamente amplio de aproximadamente 3.3 eV a temperatura ambiente, y otras propiedades favorables, como buena transparencia, alta movilidad de electrones, y fuerte luminiscencia, que le permite actuar como un semiconductor para el proceso foto catalítico. Su mayor ventaja como foto catalizador es que absorbe en una amplia

región del espectro, permitiendo la posible oxidación foto catalítica en presencia de luz solar (Chang y Waclawik, 2012; Gómez Muñoz, 2017).

C. Temperatura y pH. El efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción foto catalítica es insignificante aún en experimentos llevados a cabo utilizando radiación solar. No obstante, el pH de la solución si afecta considerablemente las propiedades superficiales del catalizador y a la estructura química del compuesto a degradar, y esto involucra alteraciones de la velocidad de reacción, así como también la tendencia a la floculación del catalizador. Se ha demostrado que el proceso de fotocátalisis es más eficiente en medio ácido ($3 \leq \text{pH} \leq 5$) sin embargo, es recomendable operar alrededor de pH 7. Por encima o por debajo de este valor, el catalizador se carga positiva o negativamente (Garcés et al., 2004).

D. Intensidad de radiación. Esta afecta considerablemente la cinética de reacción. Un cambio del orden de 1 a 0,5 significa que la recombinación de electrones y huecos no es apropiada y comienza a limitar el aprovechamiento de los fotones disponibles, y el cambio a un orden cero indica que el sustrato no puede generar más pares así se aumente la intensidad de la radiación. Estas conclusiones resultan muy importantes en el diseño de los colectores con radiación solar (García, 2014).

E. Calidad de agua a tratar. Los efluentes textiles no solo contienen una alta concentración de colorantes, sino que también contienen los productos químicos utilizados en las distintas etapas de procesamiento. Estos contaminantes ocasionan daños al medio ambiente y la salud humana, incluidos los sólidos suspendidos y disueltos, la demanda biológica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, los productos químicos, el olor y el color (Ghaly et al., 2014). Kehinde y Aziz (2014) muestran los siguientes parámetros característicos de las aguas residuales provenientes de la industria textil: color de 50 a 2500 unidades, DQO de 150 a 30000 mg/L, DBO de 80 a 6000 mg/L y SST de 15 a 8000 mg/L. Es decir, la contaminación debida a los efluentes de la industria textil ha aumentado durante los últimos años y se ha

convertido en una gran preocupación para un medio ambiente saludable. Esto ha generado un progreso de los procesos oxidativos avanzados en el tratamiento de aguas residuales textiles. Por otra parte, Gómez (2017) indica que el proceso de fotocátalisis comprende los fenómenos de difusión, adsorción, reacción y desorción de componentes entre fases, donde cada uno de las etapas tiene distinta velocidad, lo que indica la complejidad de la cinética de reacción global. Las reacciones químicas ocurren mediante un mecanismo de reacción con velocidades diferentes en cada etapa, la más lenta determina la velocidad total de la reacción. Por otro lado, la presencia de sólidos suspendidos en el agua a tratar generan turbidez que podrían reducir significativamente la eficacia de reacción al impedir el paso de la luz solar (Alarcón, 2014).

E. Aditivos. Son sustancias que pueden incidir de forma relevante en la eficacia del proceso foto catalítico, ya sea acelerando o inhibiendo la cinética de reacción. Los agentes oxidantes son los responsables de la captura de huecos, si el agente oxidante es más eficaz para capturar huecos, este incrementara la velocidad del proceso (Anpo et al., 1996). El oxidante más utilizado en el proceso foto catalítico es el oxígeno por ser el más económico y no rivaliza con el sustrato en el proceso de adsorción. Está demostrado que al desaparecer el oxígeno disuelto en el agua y no hay otro agente oxidante, el proceso de reacción se detiene. Después del oxígeno, el compuesto más utilizado es el peróxido de hidrógeno, y está demostrado en muchos experimentos que la velocidad de reacción aumenta según la siguiente secuencia: $O_2 < H_2O_2 < (H_2O_2 + O_2)$.

2.2.6 Radiación solar

La radiación solar es un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol y en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que produce una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada se transmite al exterior mediante la radiación solar que se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. El uso de la energía solar dio inicio al desarrollo de la tecnología de fotocátalisis solar, que permitieron

el diseño de sistemas térmicos de baja y media temperatura (colectores cilindro-parabólicos y sistemas sin concentración). Algunas modificaciones iniciales de estos sistemas fueron la del reflector solar y en el receptor debido a que éste debe ser transparente a la luz y así puedan penetrar los fotones dentro del fluido a tratar.

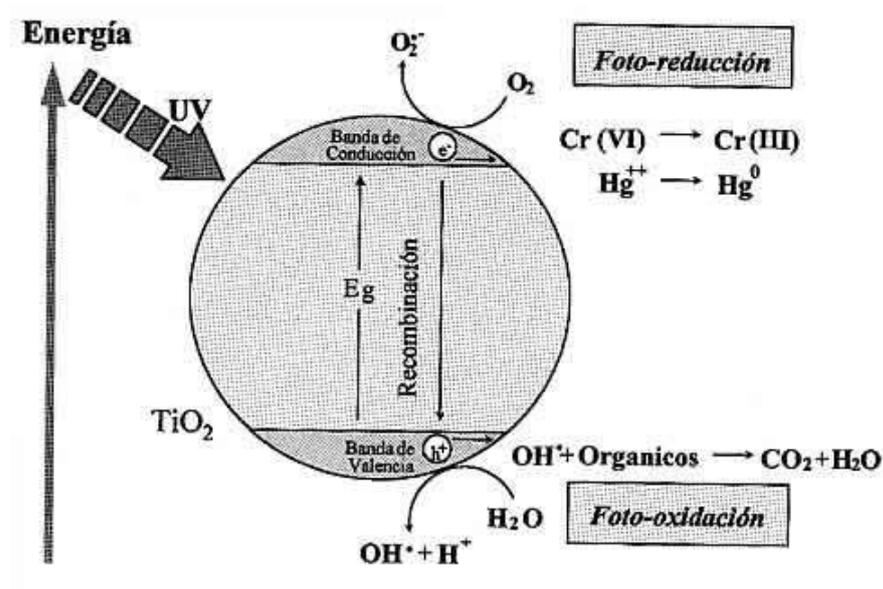
2.2.7 Mecanismos de reacción

La fotocatalisis consiste de una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química sobre la superficie de un catalizador o material semiconductor que acelera la velocidad de reacción, similar a la fotosíntesis donde la luz solar es capaz de eliminar CO₂ para generar materia orgánica. Mediante la fotocatalisis se puede eliminar contaminantes presentes en la atmósfera, como son los NO_x, SO_x, COVs (compuestos orgánicos volátiles), CO, metil mercaptano, formaldehído, compuestos orgánicos clorados, compuestos poli aromático y otros (Díaz, 2019). La fotocatalisis utiliza semiconductores, que se comporta como un conductor o como aislante dependiendo de diversos factores, por ejemplo: el campo eléctrico o magnético, la radiación que ingresa, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. A bajas temperaturas actúan como aislantes y a temperaturas muy altas, actúan como conductores. La eficiencia de estos materiales depende de la diferencia de energía entre su banda de valencia y su banda de conducción. Generalmente, la banda de energías comprende una banda de valencia, una de conducción, y otra interpuesta entre estas dos denominada “banda prohibida”. La función de esta banda es evitar que los electrones salten desde la banda de valencia hasta la banda de conducción. En los metales no existe la banda prohibida por lo que los electrones requieren poca energía para saltar de una banda a la otra. La cantidad de energía requerida en electronvoltios (eV) para que un electrón salte de la banda de valencia a la banda de conducción se denomina *band gap*. Si la energía proporcionada supera o es igual al *band gap*, entonces el electrón habrá pasado de la banda de valencia a la banda de conducción, saltando la barrera prohibida. El lugar que deja el electrón liberado se comporta como si fuera una nueva partícula

libre con una carga positiva y una masa similar a la del electrón. Esta pseudo partícula recibe el nombre de *hueco* (Serrano, 2013). Por consiguiente, en los semiconductores hay dos tipos de portadores de corriente eléctrica: los electrones con carga negativa y los huecos con carga positiva (pares electrón e^- /hueco h^+) tal como se observa y explica en la figura 6.

Figura 6

Esquema de mecanismo de reacción de fotocatalisis heterogénea en TiO₂

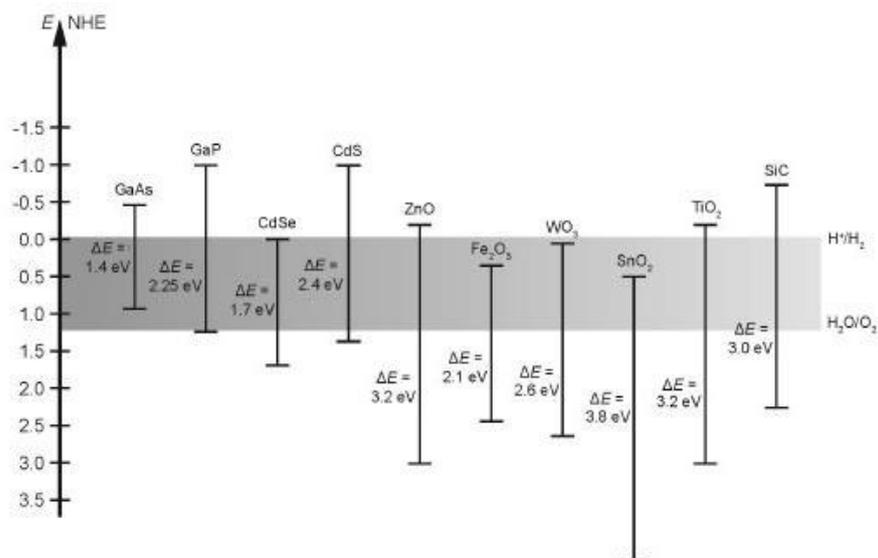


Nota: Tomada de Chong et al. (2010)

La elección de un buen conductor requiere de ciertos criterios tales como: un ancho de banda que permita la activación con luz solar o UV, baja toxicidad y disponibilidad a bajo costo. Generalmente, los mejores semiconductores son óxidos metálicos como el TiO₂, ZrO₂, ZnO y otros (Rodríguez, 2008). Estos compuestos suelen excitarse con luz baja (menor de 3.3 eV), absorbiendo parte de la radiación del espectro solar que incide sobre la tierra (longitud de onda $\lambda > 310$ nm). Muchos de estos como el Al₂O₃, SiO₂, MgO, ZnO y el TiO₂ no conducen electrones, pero poseen propiedades catalíticas. Estos materiales tienen un *band-gap* muy alto (ver figura 7).

Figura 7

Potencial redox de diversos semiconductores



Nota. Se presenta el potencial redox de algunos pares semiconductores usuales en solución acuosa, comparados con el electrodo normal de hidrógeno (NHE, por sus siglas en inglés). La escala de energía está indicada en electrón voltio. Tomada de Serrano (2013).

De todos los semiconductores mencionados el de mayor aceptación es el dióxido de titanio TiO_2 . Este compuesto metálico de transición forma diferentes polimorfos: rutilo, anatasa y brookita. En su fase anatasa y rutilo es un semiconductor excelente utilizado en reacciones foto catalíticas y foto electroquímicas (Zhang, 2014).

En la figura 7, se observa que el óxido de zinc (ZnO), tiene un “*band gap*” relativamente amplio de aproximadamente 3.3 eV a temperatura ambiente por lo que algunos investigadores propone utilizarlo para procesos fotocatalíticos. La principal ventaja de este semiconductor es su buena transparencia, alta movilidad de electrones, y fuerte luminiscencia a temperatura ambiente (Díaz, 2016).

Los procesos fotocatalíticos se fundamentan en la irradiación de muestras que contienen suspensiones de óxidos semiconductores (SC) como el dióxido de titanio u óxido de zinc, y las sustancias contaminantes a degradar. Si los fotones suministrados al sistema poseen la energía adecuada, se genera en el semiconductor una separación de cargas (pares electrón e^- /hueco h^+). Los huecos pueden dar lugar a la formación de radicales hidroxilos (OH°), que son especies muy activos de alto poder oxidante capaces de reaccionar con una gran variedad de compuestos orgánicos conduciendo en última instancia a su total mineralización (Rodríguez, 2003).

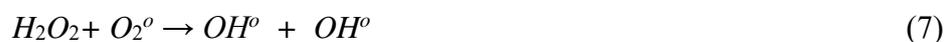
Garcés et al. (2004) estudiaron la fotocatalisis heterogénea y proponen el siguiente mecanismo de reacciones: En la superficie del semiconductor (SC), los huecos reaccionan con especies dadores de electrones tanto con H_2O absorbida (ecuación 2) como con grupos OH° unidos en la superficie (ecuación 3) para formar radicales hidroxilos OH° .



Por otro lado, los electrones en exceso de la banda de conducción reaccionan con el oxígeno molecular formando radicales superóxido y peróxido de hidrogeno.



A la vez, el radical superóxido como el peróxido de hidrógeno generan más radicales hidroxilos mediante las siguientes reacciones:



Los radicales OH° generados conducen a la completa mineralización de muchas sustancias orgánicas RH por captura de hidrogeno y formando un radical orgánico que puede reaccionar con el oxígeno atmosférico produciendo peroxiradicales.



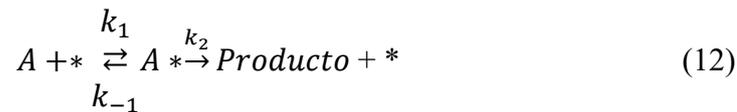
También pueden iniciarse reacciones de oxidación en serie que pueden conducir a la mineralización completa de los compuestos orgánicos.



En estos procesos, la oxidación ocurre directamente sobre la superficie del catalizador o semiconductor (TiO_2 , ZnO , entre otros). Si la energía es la radiación solar, esta puede interactuar con la materia en un amplio rango de longitudes de onda y produciendo diversos cambios en la estructura de las moléculas. La radiación cerca al espectro visible o ultravioleta (240-700 nm) interactúan con los electrones de las moléculas y estas reacciones son más relevantes desde el punto de vista ambiental (Díaz, 2019). La luz solar es una energía directa, primaria, abundante y barata que en muchos casos es absorbida por compuestos químicos para producir procesos fotocatalíticos. Así, la fotocatalisis heterogénea mediada por un catalizador sólido y la foto oxidación mediada por compuestos férricos son dos alternativas atractivas para el tratamiento de aguas. Muchos investigadores han demostrado que la fotocatalisis puede destruir completamente compuestos disueltos en agua, en principio en baja concentración y recientemente se ha comenzado a ensayar degradación de aguas residuales industriales con alto contenido de carbono orgánico. Este método es el único que realmente destruyen sustancias toxicas hasta compuestos inocuos. Se ha demostrado que hay una gran variedad de moléculas contaminantes que pueden ser degradadas fotocatalíticamente. Por ejemplo: Fenoles, dioxinas, colorantes, cianuros, disolventes, Compuestos orgánicos clorados, Herbicidas, pesticidas e insecticidas (Remtavares, 2011).

2.2.7 Estudio cinético de la reacción fotocatalítica

La ecuación más sencilla que describe la cinética del proceso foto catalítico es el modelo de Langmuir-Hinshelwood (L-H) que describe la formación de un complejo activado A^* en equilibrio termodinámico que luego decae a producto y la liberación del sitio activo. El modelo permite conocer la constante de velocidad k y la constante de equilibrio de adsorción K del colorante sobre la superficie del fotocatalizador. El mecanismo de reacción es:



Donde: A es el colorante, $*$ es el sitio activo y A^* es el colorante adsorbido. La segunda etapa de la reacción es lenta y predomina sobre la velocidad de reacción. Luego, la ecuación de velocidad es:

$$-r_A = k_2 f_A \quad (13)$$

Donde: f_A es la fracción de sitios activos ocupados por la molécula A . La primera etapa se encuentra en equilibrio termodinámico, por lo tanto, se cumple:

$$K = \frac{k_1}{k_{-1}} = \frac{f_A}{C_A f_v} \quad (14)$$

Donde K es la constante (de equilibrio) de adsorción del colorante, y f_v es la fracción de sitios activos vacíos. Del balance de sitios activos: $f_A + f_v = 1 = f_v(KC_A + 1)$

$$f_v = \frac{1}{(1+KC_A)} \quad (15)$$

Reemplazando (14) y (15) en (13) se obtiene la expresión matemática del modelo de Langmuir-Hinshelwood,

$$-r_A = -\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{kKC_A}{(1+KC_A)} \quad (16)$$

Para disoluciones diluidas $KC_A \ll 1$, la ecuación (16) presenta una cinética de reacción de pseudo primer orden. Para concentraciones elevadas, $KC_A \gg 1$, la velocidad de reacción es

máxima y presenta una cinética de orden cero (Xianghua et al., 2003). Las variables del proceso tales como pH, temperatura, tipo de catalizador, intensidad de radiación, y otros influyen fuertemente sobre los valores de k y K . Para una reacción de primer orden la ecuación (16) resulta,

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) + K(C_{A0} - C_A) = kKt \quad (17)$$

Para disoluciones diluidas $KC_A \ll 1$, luego.

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = kKt - KC_{A0} \quad (18)$$

Es decir, la gráfica $\ln(C_{A0}/C_A)$ en función del tiempo resulta una relación lineal que permite determinar los parámetros de la ecuación cinética.

Por otro lado, la degradación de la concentración del colorante se puede obtener para cada concentración C_A mediante la siguiente expresión,

$$D = 100(C_{A0} - C_A)/C_{A0} \quad (19)$$

Donde D es el porcentaje de degradación (%) y C_{A0} es la concentración inicial

III. METODO

3.1. Tipo de Investigación

Por su naturaleza, es aplicada ya que cubre una necesidad a través del conocimiento científico como es el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes. Por su enfoque es cuantitativa porque prueba una hipótesis planteada a través de la recolección de datos. Por su nivel es explicativo, porque emplea causa y efecto. Por su diseño, es experimental porque se busca obtener una respuesta de la variable dependiente al manipular variables independientes.

3.2 Población y muestra

Población

Está determinada por los colorantes utilizados en la industria textil. Generalmente, en este rubro se utiliza una gran variedad de colorantes dentro de ellas se destacan los directos y reactivos en un 75%.

Muestra

Para el proceso de degradación fotocatalítica heterogénea se ha escogido los colorantes directo (Rojo Escarlata) y los reactivos (Azul Corazol R.D y el Amarillo Synosol S-22). El primero, es de uso común en la industria del teñido y obtenidas por la empresa Ciba Gessel, mientras que los segundos son utilizados por algunas industrias específicas de teñido y son proveídas por la empresa Colourtex the Dyestuff Company. Las concentraciones utilizadas en el experimento corresponden aproximadamente a las utilizadas en los teñidos de la industria textil.

Espacio temporal

El estudio se realizó en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional del Callao, distrito de Bellavista, provincia constitucional del Callao en épocas de presencia de luz solar (noviembre a mayo) en el periodo del 2016 al 2019.

Unidad de análisis

Degradación de la concentración de los colorantes directo (rojo escarlata) y reactivos (azul corazol y amarillo synozol).

3.3 Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables se muestra en la tabla 2, donde los factores o variables utilizadas son:

Variables independientes (X)

1. Tiempo de reacción (X_1)
2. Concentración inicial del colorante (X_2)
3. Concentración del catalizador (X_3)

Variable dependiente (Y)

Degradación de la concentración del colorante

Indicadores

Y = Porcentaje de degradación de la concentración del colorante

X = Parámetros de operación del proceso foto catalítico.

Los indicadores de las variables independientes se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Indicadores de las variables de investigación.

Nº	VARIABLES INDEPENDIENTES	NOTACIÓN	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
1	Tiempo de reacción (min.)	X_1	0	20
2	Concentración inicial del colorante (ppm)	X_2	20	50
3	Concentración de catalizador (mg/100mL.)	X_3	100	400

Tabla 3*Operacionalización de variables*

Variables	Nombre/ Dimensión	Tipo	Método de lectura	Indicadores /valores
	Tiempo de reacción		Medición directa (Cronometro)	minutos
Variables independientes	Concentración inicial	Cuantitativa	Medición directa	mg/L o ppm
	Concentración del catalizador			ppm
Variables dependientes	Degradación de la concentración del colorante	Cuantitativa	Medición directa (espectrofotómetro)	mg/L o ppm

3.4 Instrumentos

Como instrumentos de medición se utilizaron: Balanza analítica marca Shimadzu con rango de pesaje de 300 gramos y precisión de 0,001 gramos, para mediciones de cantidad de colorante y catalizador. Cronometro digital Casio para monitorear el tiempo de reacción. Espectrofotómetro UV (Varian-Cary 50 Bio, Australia) certificada según la norma ISO-9001, que opera con software CaryWinUV. Especificaciones técnicas: Rango de longitud de onda de 190-1100 nm, con 2 detectores de diodo de silicio, resolución limite UV-Vis: $\leq 1,5$ nm, y rango

fotométrico de 3,3 abs. Todos los instrumentos están ubicados en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química-UNAC. La curva de calibración de absorbancia/concentración de colorante, fue obtenida usando muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante antes del inicio de la reacción. A partir de la curva de calibración se obtienen las concentraciones para cada absorbancia de lectura. La caracterización fisicoquímica del fotocatalizador ZnO fue realizado en un laboratorio externo.

3.5 Procedimiento

Se realizaron cuatro (04) tipos de experimentos. Primero, la caracterización fisicoquímica del fotocatalizador ZnO. Luego, se procedió a la degradación de los colorantes mencionados usando el ZnO en suspensión como fotocatalizador, con 100 mg/100 mL de solución. Posteriormente, se procedió a la degradación de los colorantes directos y reactivos sin foto catalizador expuesto a la radiación solar, a fin de conocer el efecto de la reacción. Finalmente, se efectuaron pruebas de fotocatalisis para una concentración constante de colorante de 50 ppm, pero variando en esta ocasión la concentración del fotocatalizador de 100, 200, 300 y 400 mg/100 mL de solución coloreada, con la finalidad de determinar la masa optima de catalizador.

La degradación fotocatalítica de las soluciones coloreadas fue realizada en un reactor batch con agitación magnética, expuesto a la luz solar y usando como catalizador el óxido de zinc. Luego, en intervalos de tiempo de 5, 10, 15 y 20 minutos se extrajeron 10 mL de la muestra, respectivamente y fueron llevadas al laboratorio para ser centrifugadas a fin de separar algunas partículas de catalizador presentes en la solución. Posteriormente, las muestras fueron llevadas al espectrofotómetro de absorción atómica. Se midieron las absorbancias para cada muestra y se determinaron las concentraciones correspondientes. La temperatura del experimento fue del ambiente y constante aproximadamente de 20 ± 2 °C.

Materiales

Se usaron: Fiolas de 100 mL, tubos de ensayo con gradillas, matraz de 250 mL, espátulas y termómetro.

Reactivos

Óxido de zinc de malla 400, agua sintética, el colorante directo Rojo Escarlata y los colorantes reactivos: Azul corazol RD y el Amarillo Synozol S-22.

Equipos

Reactor foto catalítico tipo batch de vidrio de 250 ml con agitador magnético. Balanza analítica, tamices, centrifugadora, espectrofotómetro UV y cronometro.

3.6 Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados, el primer paso fue realizar un análisis de varianza ANOVA para determinar los factores que influyen en la variable respuesta. Luego, para el pronóstico del modelo matemático se propone el modelo de regresión lineal descrito por:

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2$$

Donde:

X_1 : Factor A (tiempo)

X_2 : Factor B (Concentración inicial del colorante)

Y : Variable (concentración del colorante)

B : Coeficientes de regresión

Para el cálculo de los coeficientes de regresión se utilizó el método de mínimos cuadrados. El tratamiento de los resultados de las pruebas experimentales se efectuó mediante el programa Excel, y para el análisis de varianza se utilizó el programa estadístico Minitab 18.

En la tabla 3 se detalla la matriz del diseño experimental. El diseño es del tipo factorial que corresponde a 2^k , siendo $k = 2$, corresponde a 4 experimentos como mínimo. El mismo procedimiento fue seguido y utilizado para cada colorante en estudio

Tabla 4

Matriz de diseño experimental

N°	X ₂	X ₁	Y
1	20	0	Y ₁
	20	5	
	20	10	
	20	15	
	20	20	
2	30	0	Y ₂
	30	5	
	30	10	
	30	15	
	30	20	
3	40	0	Y ₃
	40	5	
	40	10	
	40	15	
	40	20	
4	50	0	Y ₄
	50	5	
	50	10	
	50	15	
	50	20	

IV. RESULTADOS

4.1 Contrastación de hipótesis

Los resultados experimentales de la degradación de la concentración del colorante rojo escarlata se muestran en la tabla 7, estos valores se sometieron al análisis estadístico, a fin de responder las hipótesis planteadas.

Se realizó el análisis de varianza ANOVA a fin de demostrar que las variables independientes elegidas correlacionan bien con la variable dependiente. Para el efecto se usó el software Minitab 18. Se propone un modelo que tenga una conducta lineal consistente con el modelo cinético. El modelo de diseño experimental seleccionado fue diseño de bloques completamente aleatorizado DBCA. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5

ANOVA para el modelo de primer orden del colorante rojo escarlata

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	3207.2	1069.06	56.07	0.000
Lineal	2	3087.2	1543.62	80.95	0.000
t(min)	1	1868.0	1867.97	97.96	0.000
Co	1	1219.3	1219.26	63.94	0.000
Interacciones de 2 términos	1	120.0	119.95	6.29	0.023
t(min)*Co	1	120.0	119.95	6.29	0.023
Error	16	305.1	19.07		
Total	19	3512.3			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.36667	91.31%	89.69%	82.40%

Se observa que el valor p para el modelo se encuentra por debajo de 0,05 lo que indica con un nivel de certeza estadística del 99,5 % la afirmación de la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula. La ecuación matemática que describe muy bien el comportamiento de la reacción de degradación del colorante rojo escarlata resulta:

$$Y = -5.25 - 0.285 X_1 + 1.008 X_2 - 0.0309 X_1X_2$$

Donde Y representa el valor esperado de la concentración del colorante a partir de las variables X_1 y X_2 , las cuales representan el tiempo del proceso en minutos y la concentración inicial del colorante en ppm (partes por millón) respectivamente. Para los demás colorantes en estudio se obtuvieron resultados similares del valor p (ver anexo 7) respectivamente. Asimismo, para validar la propuesta del modelo de primer orden, se observa en la tabla 5 que los valores de los coeficientes de determinación R^2 y del ajustado (R^2_{ajustado}) son altos, lo que demuestra con confianza la validez del modelo dentro del rango de trabajo utilizado en el experimento. Para los colorantes reactivos azul corazol RD y el amarillo synozol S-22 los datos se muestran en las tablas 8 y 9, y los resultados estadísticos (anexo 7) muestran también valores muy altos para el coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajustado}). En conclusión, se rechazan la hipótesis nula y se acepta la alterna.

4.1.1 Contrastación de la primera hipótesis específica.

Considerando:

Hipótesis nula H_0 : No existe relación entre el tiempo de reacción y la variación de la concentración de los colorantes durante el proceso foto catalítico utilizando óxido de zinc como catalizador.

Hipótesis alternativa H_1 : Al existir degradación de la concentración de los colorantes durante el proceso foto catalítico, se puede obtener los parámetros de la reacción.

Para este análisis se planteó un valor de 5% de nivel de significancia y 95% para nivel de confianza. El resultado del análisis estadístico indicado líneas arriba, y en el anexo 7, muestran la correlación entre los factores de concentración de colorante y el tiempo, un nivel de significancia prácticamente cero (valor $p = 0$). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa. Esto se evidencia al observar las figuras 14, 16 y 18 de los colorantes utilizados, que muestran la dispersión de la concentración en función del tiempo. En consecuencia, se obtienen los parámetros cinéticos de la reacción foto catalítica utilizando la ecuación 18.

4.1.2 Contrastación de la segunda hipótesis específica.

Hipótesis nula H_0 : No existe relación entre la concentración inicial de los colorantes y el proceso de degradación de la concentración foto catalítica utilizando óxido de zinc como catalizador.

Hipótesis alternativa H_1 : Existe relación entre la concentración inicial de los colorantes y el proceso de degradación de la concentración foto catalítica utilizando óxido de zinc como catalizador.

Para evaluar el efecto de la concentración inicial de los colorantes en el proceso foto catalítico, se utilizaron muestras con concentraciones iniciales de 20, 30, 40 y 50 ppm. Se planteó 5% como nivel de significancia y 95% nivel de confiabilidad. El procesamiento de datos (anexo 7), muestran un valor p prácticamente cero, indicando la existencia de una relación entre la concentración inicial de los colorantes y el proceso foto catalítico. Por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa. El efecto se aprecia en las figuras 14,15; 16,17 y 18,19 de los colorantes utilizados, donde se observa que a bajas concentraciones iniciales de colorante el proceso de degradación foto catalítica aumenta y para que sea más alta, la concentración inicial debe ser de 20 ppm.

4.1.3 Contrastación de la tercera hipótesis específica.

Hipótesis nula H_0 : No existe relación entre la concentración de catalizador y el proceso de degradación foto catalítica de la concentración de colorantes utilizando óxido de zinc como catalizador.

Hipótesis alternativa H_1 : Existe relación entre la concentración inicial de los colorantes y el proceso de degradación de la concentración foto catalítica utilizando óxido de zinc como catalizador.

Con el fin de conocer el efecto de la cantidad de catalizador en el proceso de degradación foto catalítica, se utilizaron cantidades de 100, 200, 300 y 400 miligramos de catalizador en 100 ml de muestras de 50 ppm de concentración de colorante rojo escarlata. Para la contrastación se estableció 5% como nivel de significancia y 95% nivel de confiabilidad. Los resultados se sometieron a la prueba estadística del análisis de varianza mostrando un valor p prácticamente cero, lo que indica que existe una relación entre la cantidad de catalizador y la degradación de la concentración del colorante. El efecto se aprecia en las figuras 26 y 27 donde se observa que a concentraciones elevadas de catalizador el proceso de degradación disminuye, y la cantidad óptima resultó 200 miligramos por 100 ml de muestra coloreada. Es decir, hay un efecto considerable de la concentración de catalizador en el proceso foto catalítico.

4.1.4 Contrastación de la hipótesis general.

Los resultados de este trabajo comprueban las hipótesis propuestas y guardan relación con la hipótesis general:

Hipótesis nula H_0 : No existe relación entre la concentración del colorante y el tiempo de degradación foto catalítica de la concentración de colorantes utilizando óxido de zinc como catalizador.

Hipótesis alternativa H1: Existe relación entre la concentración del colorante y el tiempo de degradación foto catalítica de la concentración de colorantes utilizando óxido de zinc como catalizador.

Luego del tratamiento de los resultados estadísticamente, se observa que los valores p para las variables implicadas son menores al valor del nivel de significancia propuesta. Por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna. En consecuencia, se puede degradar colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil mediante el proceso de fotocatalisis solar heterogénea utilizando óxido de zinc como catalizador.

4.2 Análisis e interpretación

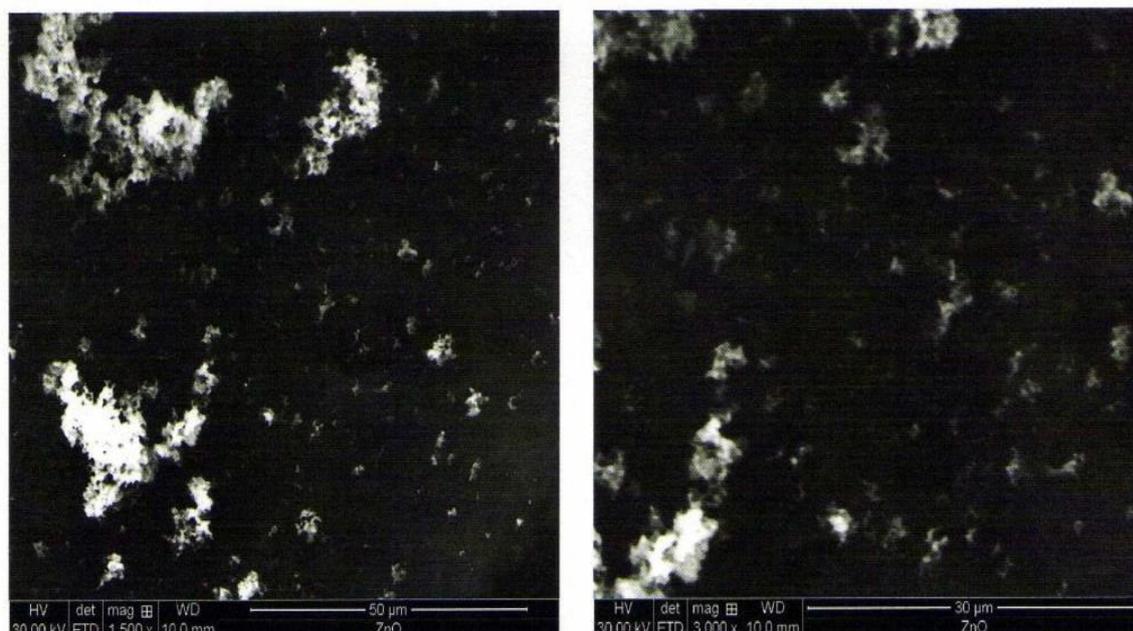
4.2.1 Caracterización fisicoquímica del fotocatalizador

Por sus características físicas como semiconductor y por tener un *band gap* similar al TiO_2 , se ha utilizado el óxido de zinc como fotocatalizador. El óxido de zinc al 99,50% de pureza industrial fue obtenido del almacén de laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, y se tuvo que adecuar el tamaño de partícula a un diámetro uniforme, a través de un tamizado de malla 400 en el laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU). Posteriormente, el catalizador fue sometido a su caracterización y análisis mediante microscopia electrónica de barrido FEI modelo *Quanta* 650, operando a 30 kV, en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP). Se obtuvieron diversas imágenes magnificadas. Se seleccionaron cuatro (04) imágenes a 6000X las cuales fueron empleadas para realizar la medición del tamaño característico de las partículas. Los resultados se muestran en la figura 8, donde se presentan imágenes de dos regiones aleatorias (región 1 y región 2) en la muestra (imágenes a 1500X (izquierda) y 3000X (derecha)). Las partículas exhiben forma variable. La figura 9, presenta las imágenes a 6000X que sirvieron para determinar el tamaño de las partículas. Se obtuvo la dimensión para un total de 126

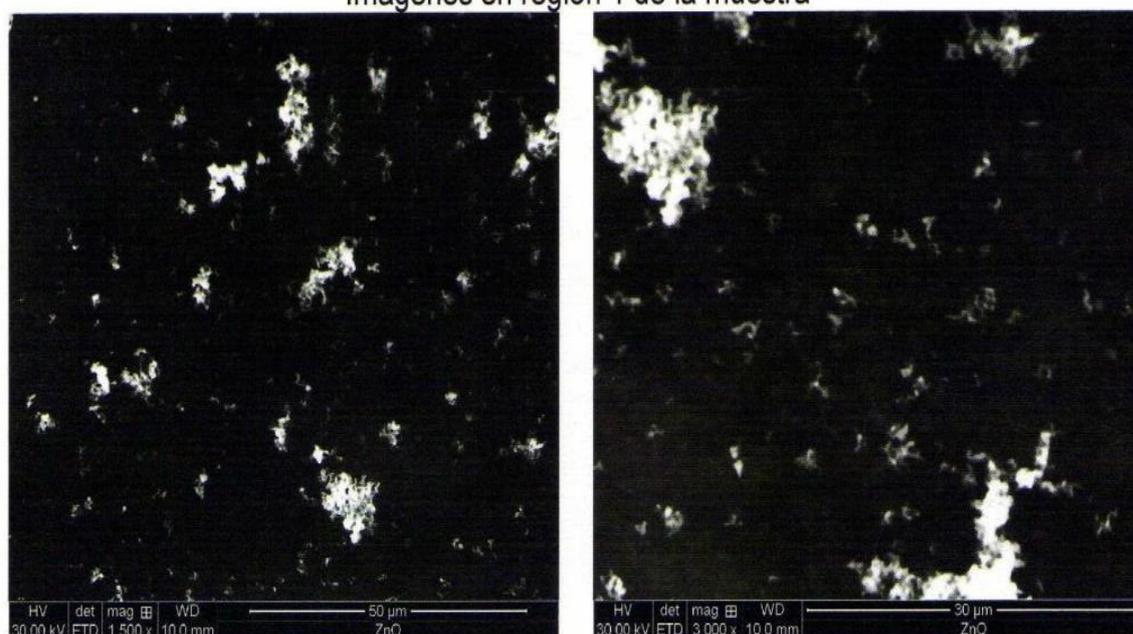
partículas, considerando como partículas individuales a aquellas con una dimensión menor a 2 micras. El tamaño promedio de partícula resulto de 0.908 micras (908 nm) +/- 0.427 micras. El 76% de las partículas exhiben un tamaño entre 0.5 y 0.9 micras (ver anexo 10).

Figura 8

Imágenes de microscopía electrónica en dos regiones aleatorias de la muestra (región 1 y región 2).



Imágenes en región 1 de la muestra

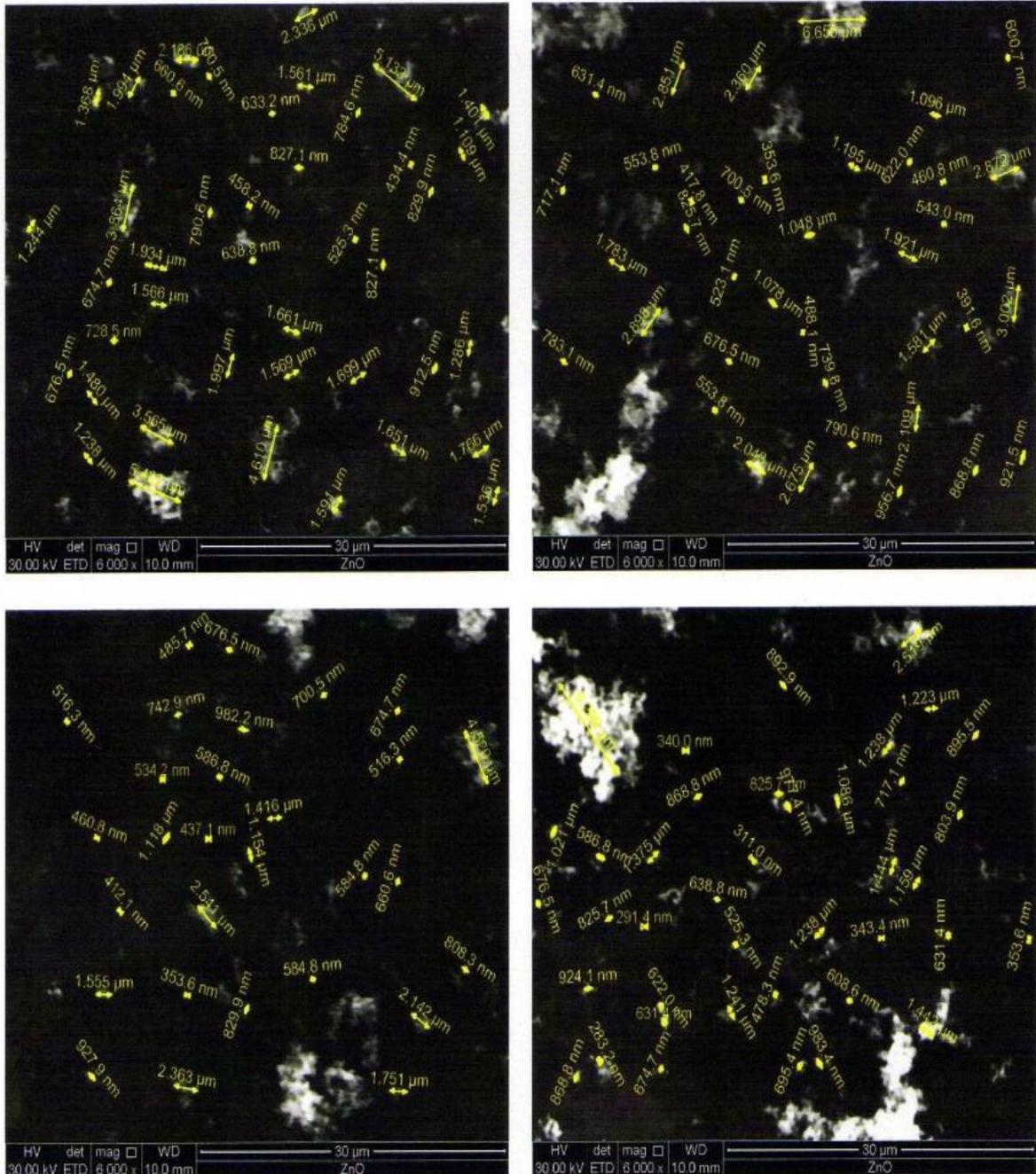


Imágenes en región 2 de la muestra

Nota: Imágenes de microscopía proporcionados por Laboratorio de Materiales PUCP. (2016)

Figura 9

Medición de tamaño de partículas en 4 regiones aleatorias de la muestra (imágenes a 6000X).



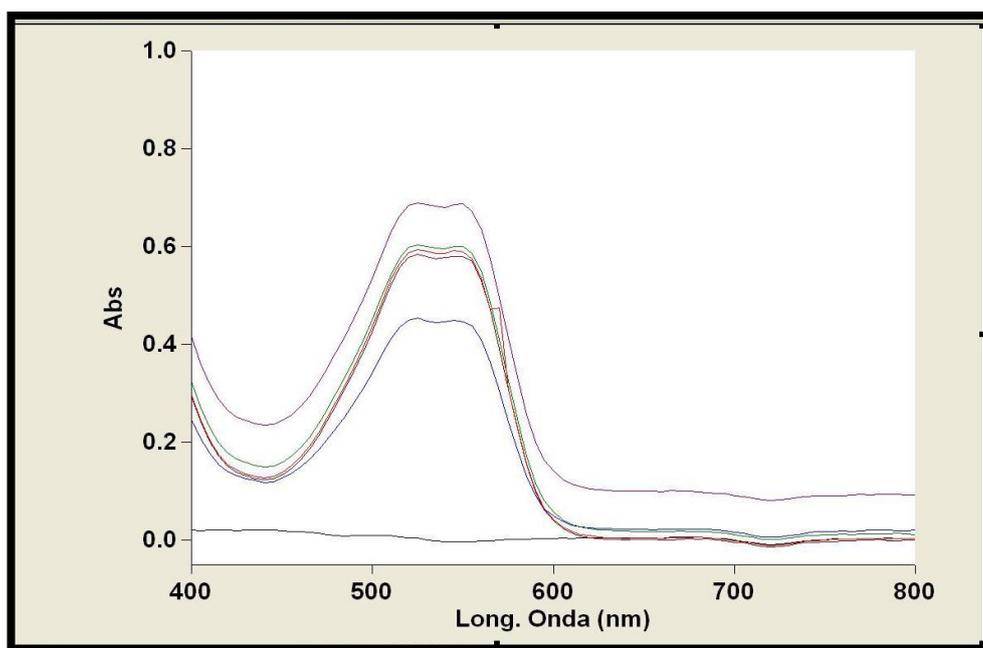
Nota: Medición de tamaño de partículas proporcionados por Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP (2016)

4.2.2 Obtención de la longitud de onda de absorción del colorante

Para realizar las corridas experimentales de las muestras del colorante se requiere conocer la longitud de onda a la cual el colorante absorbe. Para el efecto, se utilizó el espectrofotómetro UV (Varian-Cary 50 Bio,) del laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química Universidad Nacional del Callao. Se hizo un barrido de absorbancias a las muestras con concentraciones de 20, 30 40 y 50 ppm de colorante, a un pH ligeramente ácido. La figura 10, muestra el espectro de absorción de las distintas concentraciones del colorante rojo escarlata, observándose un valor máximo aproximadamente a 520 nm. Todas las demás mediciones para el colorante rojo escarlata se realizaron a esta longitud de onda.

Figura 10

Espectro de absorción del colorante rojo escarlata a distintas concentraciones.



Nota: La figura muestra el pico máximo de absorción a una longitud de onda aproximadamente de 520 nm.

Siguiendo el mismo procedimiento indicado líneas arriba para el colorante directo rojo escarlata, se determinaron las longitudes de onda idónea para los demás colorantes en estudio (azul corazol RD, y el amarillo Synozol S-22) que se resume en la tabla 6.

Tabla 6

Longitud de onda idónea de medición para distintos colorantes

Colorante	λ (nm)
Directo rojo escarlata	520
Reactivo azul corazol RD	504
Reactivo amarillo synozol S-22	432

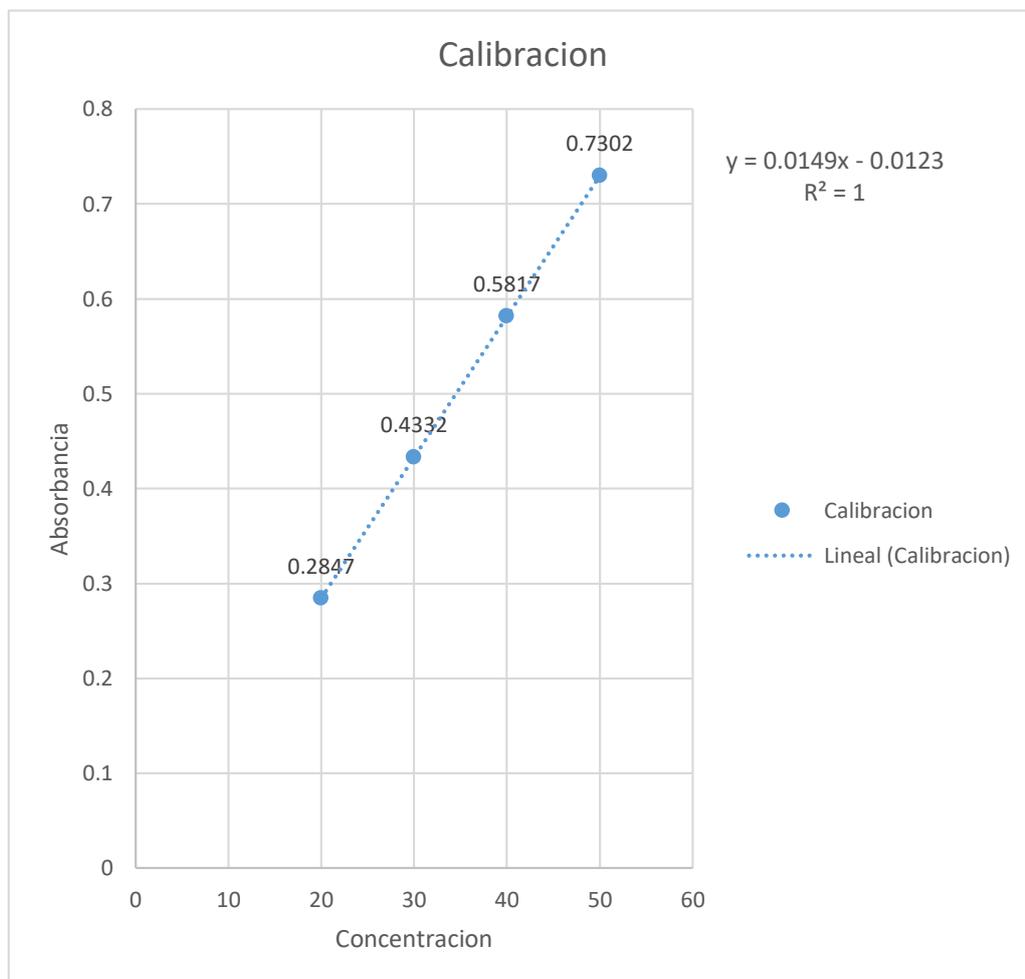
4.2.3 Obtención de la curva de calibración de los colorantes directos y reactivos

Para obtener la curva de calibración de los colorantes se procedió de la siguiente manera: Primero, se prepararon muestras de 100 ml de solución coloreada conteniendo en cada una de ellas 20, 30, 40 y 50 mg/L (ppm) del colorante respectivamente. Luego se tomaron 10 ml de cada solución y se llevó al espectrofotómetro de absorción para las lecturas respectivas a la longitud de onda idónea de absorción correspondiente a cada colorante que se indica en la tabla 8. La figura 11, muestra los resultados experimentales y la curva de calibración lineal de absorbancia versus concentración para el colorante directo rojo escarlata, de donde se obtiene la ecuación para el cálculo de las concentraciones a partir de mediciones de absorbancia.

El procedimiento se repite para los demás colorantes (azul corazol RD y el amarillo synozol S-22) utilizados en el experimento, tal como se muestran en las figuras 12 y 13 respectivamente. Los datos se obtuvieron de los informes de análisis de concentración en tiempos de cero minutos indicadas en el anexo 4 secciones (a), (b) y (c).

Figura 11

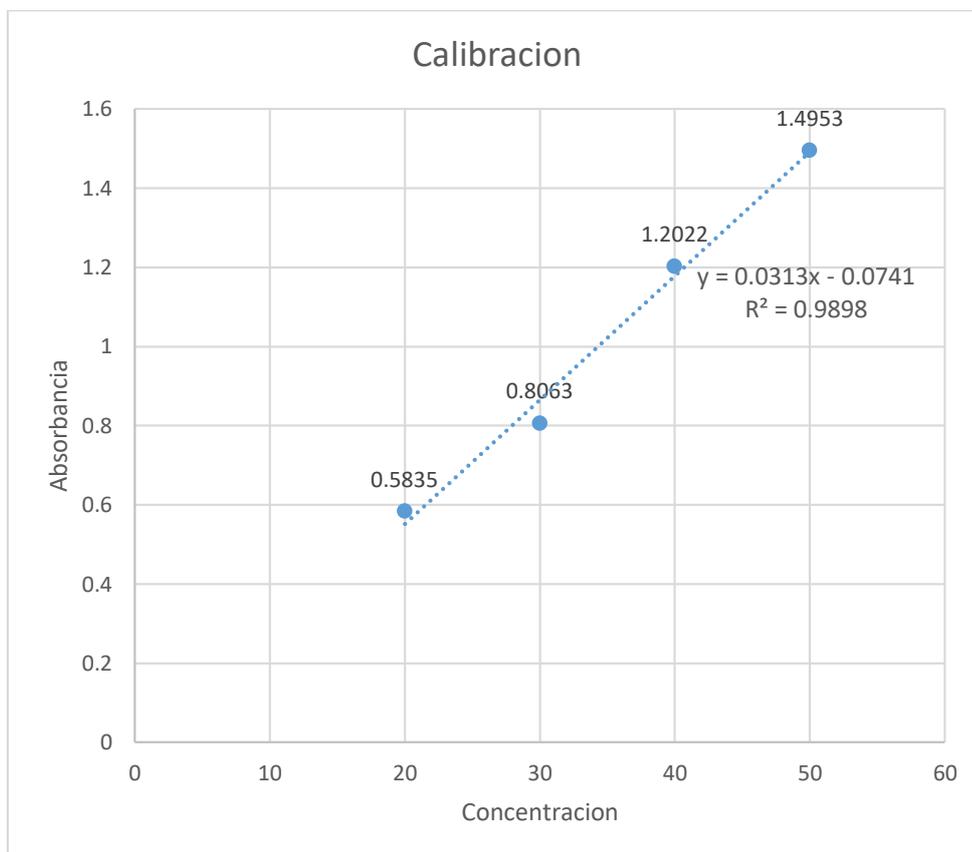
Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración del colorante rojo escarlata a concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm.



$$\text{Concentracion de colorante} = \frac{\text{Absorbancia} + 0.0123}{0.0149}$$

Figura 12

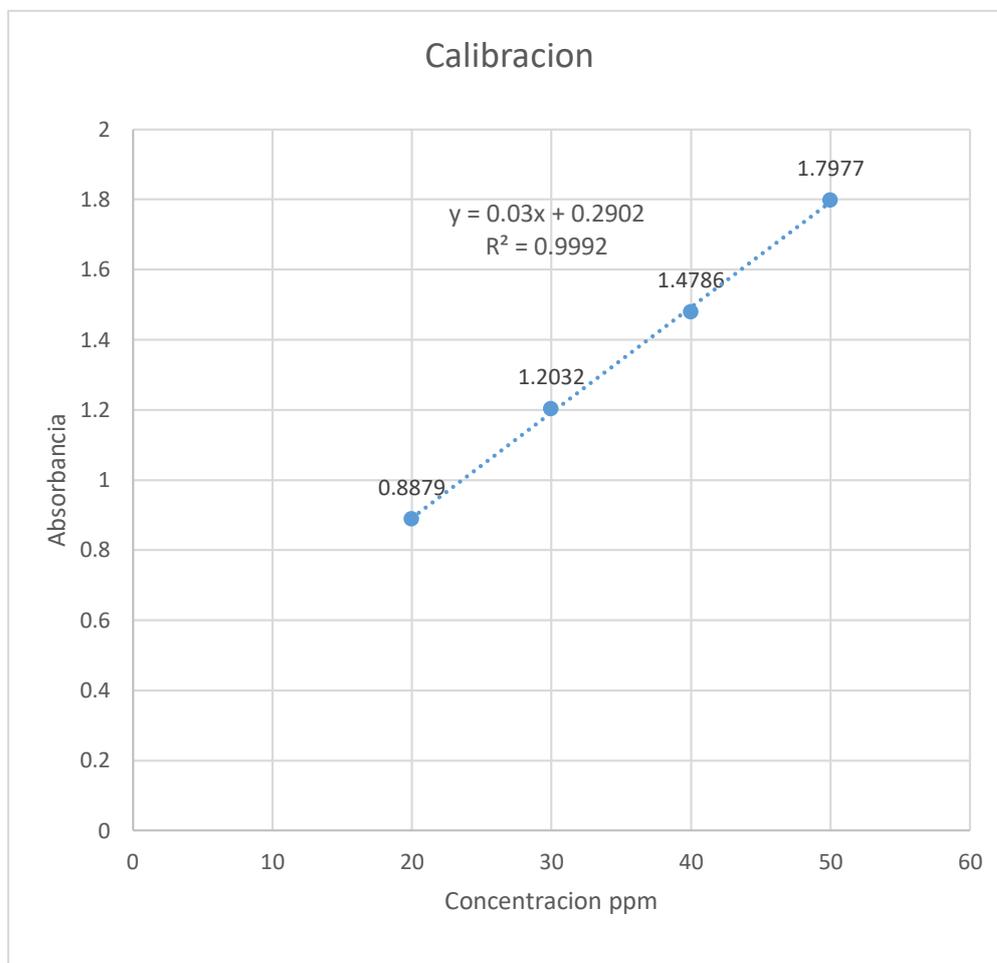
Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración del colorante azul corazol RD a concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm.



$$\text{Concentracion de colorante} = \frac{\text{Absorbancia} - 0.0741}{0.0313}$$

Figura 13

Curva de calibración, absorbancia en función de la concentración del colorante amarillo synozol S-22 a concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm.



$$\text{Concentracion de colorante} = \frac{\text{Absorbancia} - 0.2902}{0.03}$$

4.2.4 *Cinética de reacción usando fotocatalizador ZnO*

Se prepararon cuatro muestras de 100 ml de solución de colorante directo rojo escarlata con concentraciones iniciales de 20, 30, 40 y 50 ppm respectivamente. A cada una de ellas se agregaron 100 mg de foto catalizador óxido de zinc. Las muestras fueron expuesta a irradiación solar (en el intervalo del día desde las 12 horas hasta las 15 horas) siendo agitadas uniformemente mediante pastillas magnéticas (reactor tipo batch). En intervalos de tiempo de 5, 10, 15 y 20 minutos se tomaron 10 ml de muestras irradiadas de cada reactor. Estas muestras irradiadas se guardaron en un cuarto oscuro a fin de detener la reacción y luego se centrifugaron para separar las partículas de catalizador presentes en cada muestra. Una vez separada la fase líquida se midieron las absorbancias en el espectrofotómetro UV. Para el colorante directo rojo escarlata, los resultados se reportan en la tabla 7. Los datos experimentales de absorbancia se muestran en el reporte de informe análisis de absorbancia (ver anexo 4a) y la concentración en cada intervalo de tiempo se obtiene de la curva de calibración que se muestra en la figura 11. El porcentaje de degradación se obtuvo usando la ecuación 19.

Para los colorantes reactivos: Azul corazol RD, y el amarillo synozol S-22, el procedimiento experimental fue similar a lo descrito anteriormente. Los resultados de los análisis se muestran en las tablas 8 y 9 respectivamente y los datos de la absorbancia se muestran en el anexo 4 (b) y 4 (c), respectivamente.

Las figuras 14, 16, y 18 muestran la dispersión de la concentración de los colorantes rojo escarlata, azul corazol RD y amarillo synozol S-22 en función del tiempo de reacción, observándose una disminución siguiendo un comportamiento polinómico de segundo orden.

Las figuras 15, 17 y 19 muestran la relación logarítmica de concentración inicial y concentración en función del tiempo de reacción para los colorantes rojo escarlata, azul corazol RD y el amarillo synozol S-22. Para una reacción de primer orden el comportamiento logarítmico obedece a una relación lineal dada por la ecuación 18. Las gráficas muestran la

correlación lineal para concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm con sus índices de correlación R^2 de cada colorante.

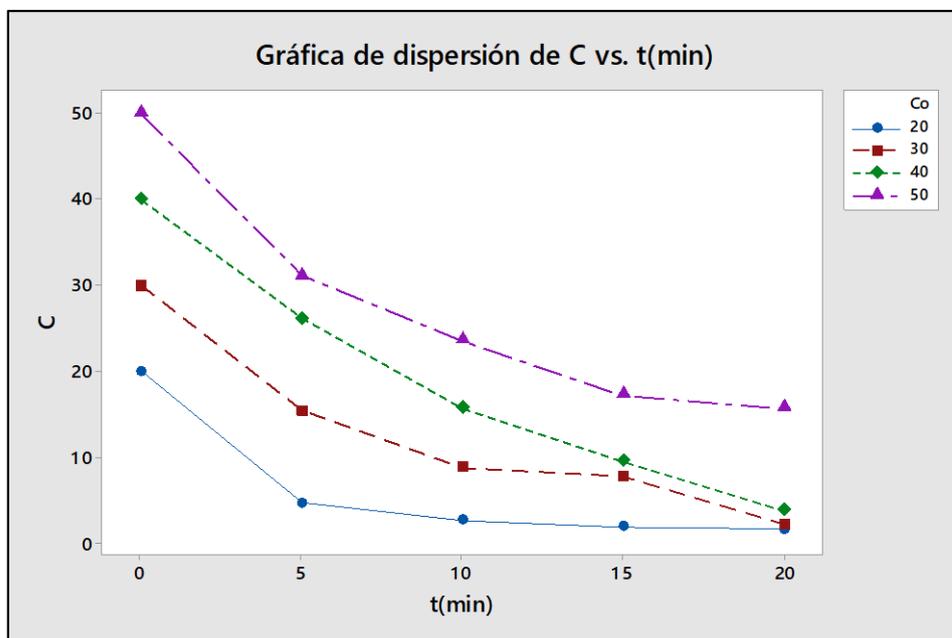
Tabla 7

Concentración y % de degradación del rojo escarlata en función del tiempo de reacción, utilizando 100 mg/100 mL de catalizador, para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de solución

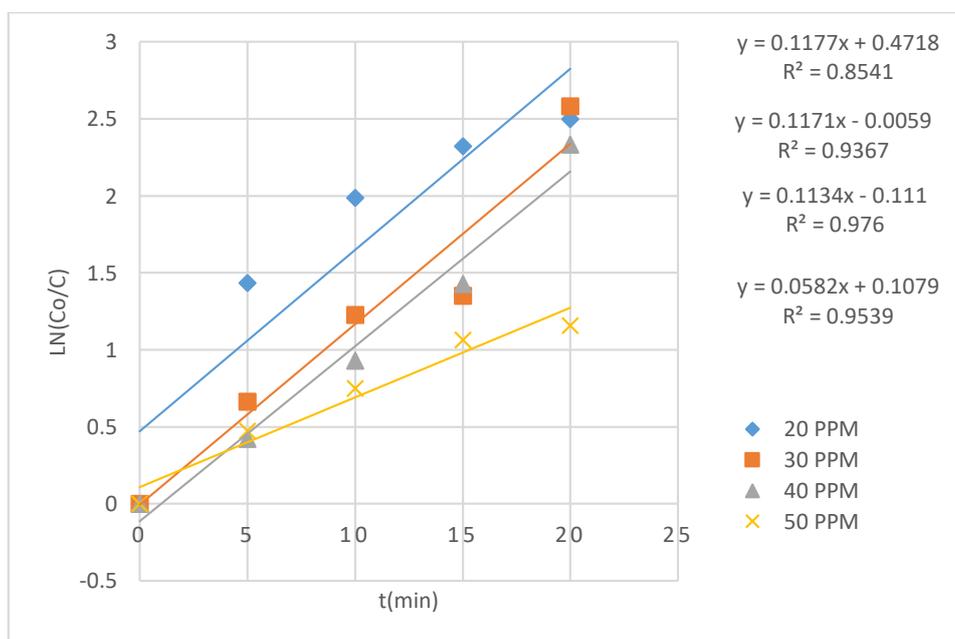
Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Inicial (ppm)	%D
0	0,2847	19,9329	0	20	0
5	0,0584	4,7450	1,4348		76,1843
10	0,0284	2,9530	1,9870		86,2903
15	0,0168	1,9530	2,3225		90,1977
20	0,0121	1,6376	2,4987		91,7812
0	0,4332	29,8993	0	30	0
5	0,2170	15,3893	0,6641		48,5295
10	0,1183	8,7383	1,2270		70,6846
15	0,1030	7,7383	1,3516		74,1188
20	0,0213	2,2550	2,5847		92,4580
0	0,5817	39,8658	0	40	0
5	0,3768	26,1141	0,4230		34,4950
10	0,2215	15,6913	0,9324		60,6397
15	0,1302	9,5638	1,4275		76,0100
20	0,0453	3,8658	2,3333		90,3030
0	0,7302	49,8322	0	50	0
5	0,4501	31,0336	0,4736		37,7238
10	0,3378	23,4967	0,7518		52,8483
15	0,2434	17,1611	1,0660		65,5622
20	0,2206	15,6309	1,1594		68,6329

Figura 14

Grafica de dispersión de concentración del colorante rojo escarlata en función del tiempo (min.) de reacción.

**Figura 15**

Grafica de $\ln(C_0/C)$ en función del tiempo de reacción del colorante rojo escarlata.



Nota: La grafica corresponde a la ecuación (18) de donde se obtienen los parámetros cinéticos que se muestran en la tabla 14.

Tabla 8

Concentración y % de degradación del colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, utilizando 100 mg/100 mL de catalizador, para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante.

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Inicial (ppm)	%D
0	0,5835	20,5210	0	20	0
5	0,5056	18,0001	0,1310		12,2950
10	0,4323	15,6278	0,2734		23,8447
15	0,3751	13,7767	0,3985		32,8653
20	0,3165	11,8802	0,5466		42,1068
0	0,8063	27,7314	0	30	0
5	0,7325	25,3430	0,0900		8,6124
10	0,6369	22,2492	0,2202		19,7689
15	0,5436	19,2298	0,3661		30,6570
20	0,4712	16,8867	0,4960		39,1060
0	1,2022	40,5436	0	40	0
5	1,1755	39,6796	0,0215		2,1312
10	1,1463	38,7346	0,0456		4,4620
15	1,1162	37,7124	0,0711		6,8646
20	1,0845	36,7346	0,0986		9,3951
0	1,4953	50,1406	0	50	0
5	1,4326	48,0001	0,0414		4,055
10	1,3823	46,3721	0,0759		7,309
15	1,3142	44,1682	0,1246		11,7148
20	1,2778	42,9903	0,15164		14,0694

Figura 16

Grafica de dispersión de concentración del colorante azul corazol RD en función del tiempo (min.) de reacción.

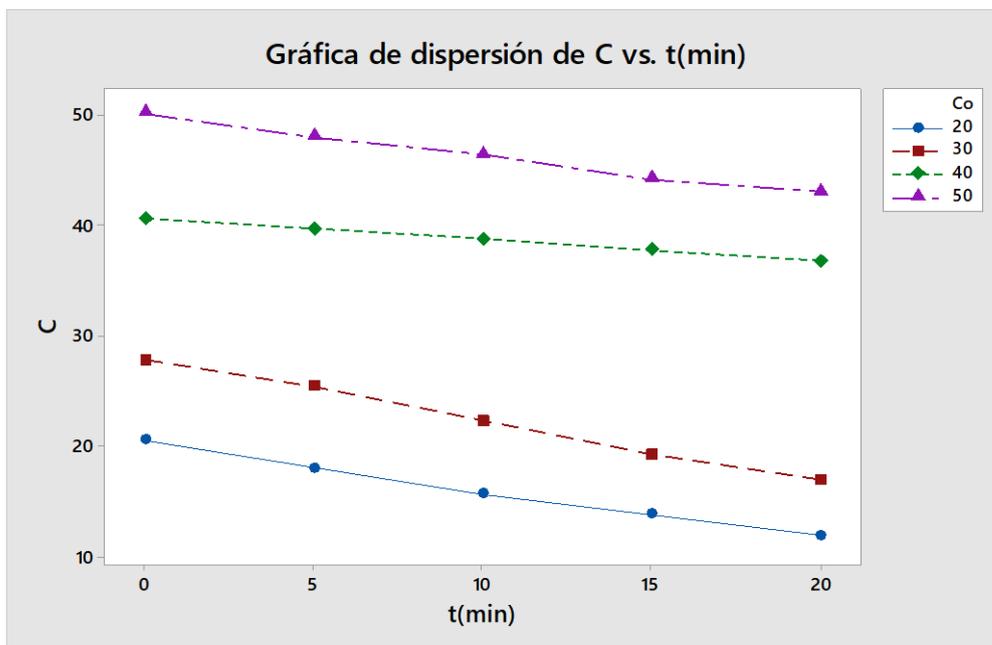
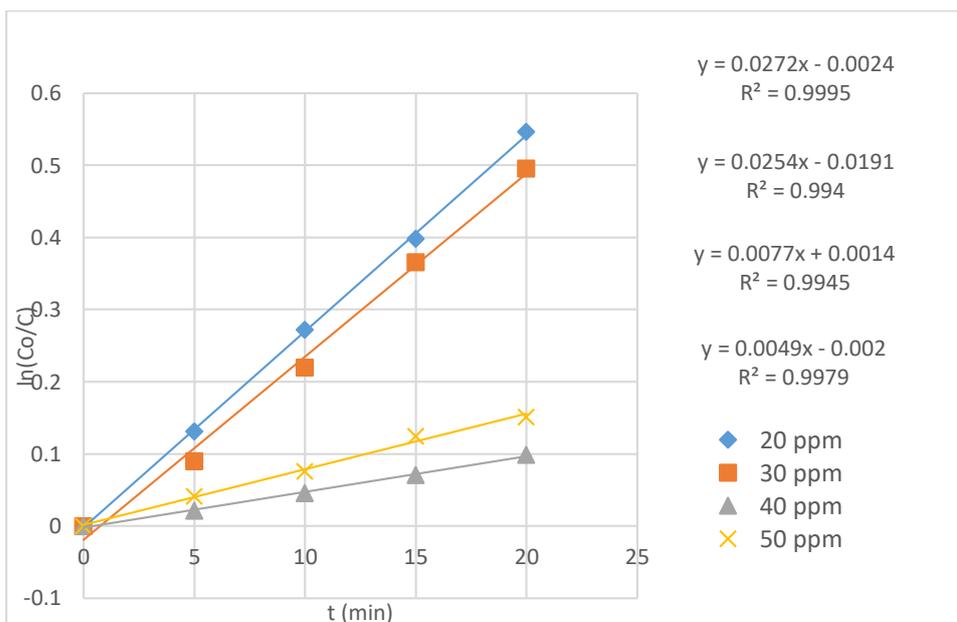


Figura 17

Grafica de $\ln(C_0/C)$ del colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción.



Nota: La grafica corresponde a la ecuación (18) de donde se obtienen los parámetros cinéticos que se muestran en la tabla 14.

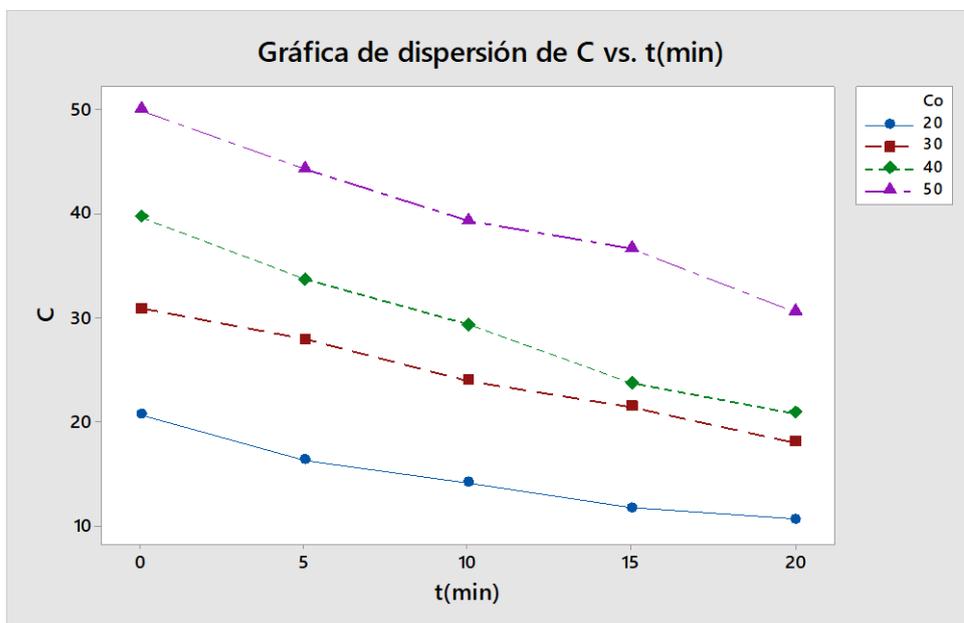
Tabla 9

Concentración y % de degradación del colorante amarillo synozol en función del tiempo de reacción, utilizando 100 mg/100 mL de catalizador, para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante.

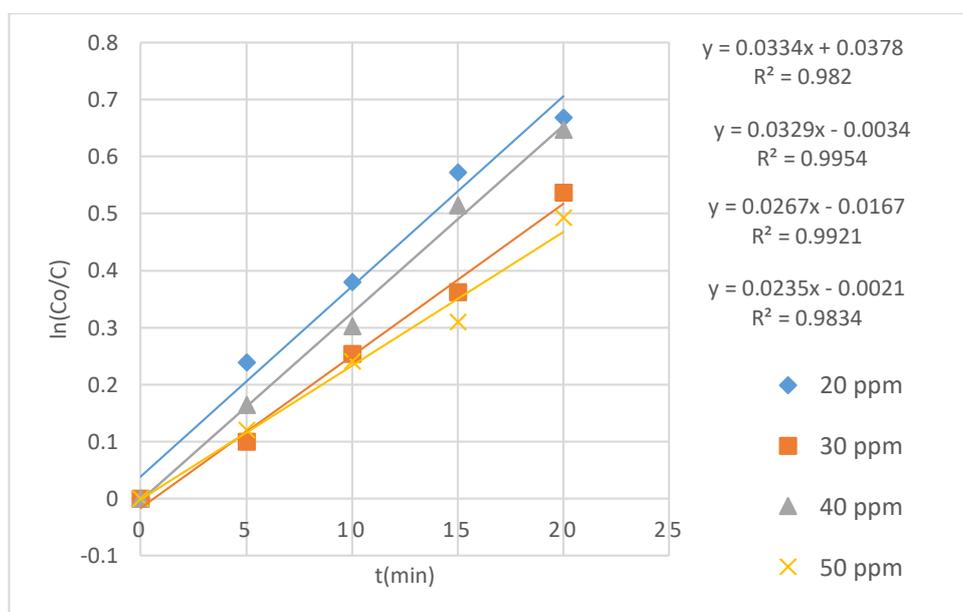
Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Inicial (ppm)	%D
0	0,8879	20,6559	0	20	0
5	0,7513	16,2636	0,2390		21,2638
10	0,6849	14,1286	0,3798		31,6000
15	0,6081	11,6559	0,5719		43,5552
20	0,5746	10,5820	0,6688		48,7701
0	1,2032	30,7942	0	30	0
5	1,1123	27,8713	0,0997		9,4914
10	0,9887	23,8971	0,2535		22,3973
15	0,9121	21,4437	0,3619		30,3644
20	0,8056	18,0096	0,5354		41,5161
0	1,4786	39,6495	0	40	0
5	1,2922	33,6559	0,1638		15,1163
10	1,1571	29,3119	0,3020		26,0724
15	0,9824	23,6945	0,5148		40,2400
20	0,8912	20,7620	0,6469		47,6360
0	1,7977	49,9099	0	50	0
5	1,6214	44,2411	0,1205		11,3580
10	1,4655	39,2283	0,2408		21,4018
15	1,3838	36,6012	0,3101		26,6654
20	1,1939	30,4951	0,4926		38,8997

Figura 18

Grafica de dispersión de concentración del colorante amarillo synozol S-2 en función del tiempo (min.) de reacción.

**Figura 19**

Grafica de Ln(Co/C) del colorante amarillo synozol S-22 en función del tiempo de reacción.



Nota: La grafica corresponde a la ecuación (18) de donde se obtienen los parámetros cinéticos que se muestran en la tabla 14.

4.2.5 Cinética de reacción sin usar fotocatalizador

A fin de conocer el efecto de la presencia del fotocatalizador en la degradación de los colorantes, se expusieron las muestras a radiación solar, pero sin usar catalizador. Así, muestras de colorante directo rojo escarlata conteniendo 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante, fueron expuestas a irradiación solar. Luego, siguiendo el protocolo descrito en el ítem 4.2.4 se obtuvieron los resultados que se resume en la tabla 10, los datos de absorbancia se indican en el anexo 5 (a) Reporte de análisis del colorante rojo escarlata.

Para los colorantes azul corazol RD, y el amarillo synozol S-22, el procedimiento experimental sin fotocatalizador fue similar a lo descrito líneas arriba. Los resultados se muestran en las tablas 11 y 12. Los datos de absorbancia se indican en el anexo 5 (b) y (c) respectivamente.

Las figuras 20, 22 y 24 muestran la dispersión de concentración de los colorantes (rojo escarlata, azul corazol RD, y amarillo synozol S-22) en función del tiempo de reacción en minutos. Asimismo, las figuras 21, 23, y 25 indican la coloración de las muestras después de las corridas experimentales, donde prácticamente se mantienen la coloración.

4.2.6 Efecto de la concentración del catalizador

A fin de determinar el efecto de la concentración del catalizador sobre el proceso fotocatalítico, se eligieron arbitrariamente cantidades de 100, 200, 300 y 400 mg de ZnO/100 mL de solución coloreada. La concentración inicial del colorante en todos los casos fue de 50 ppm. El experimento se inició con 100 mg de fotocatalizador en 100 mL de solución y se hicieron las corridas experimentales siguiendo el protocolo indicado en el ítem 4.2.5. Posteriormente, con 200 mg, y así sucesivamente hasta 400 mg. Los resultados para el colorante rojo escarlata

se muestran en la tabla 13 y figuras 26 y 27 obtenidas del anexo 6. Se observa que la velocidad de reacción se hace alta cuando la concentración del fotocatalizador es de 200 mg.

Tabla 10

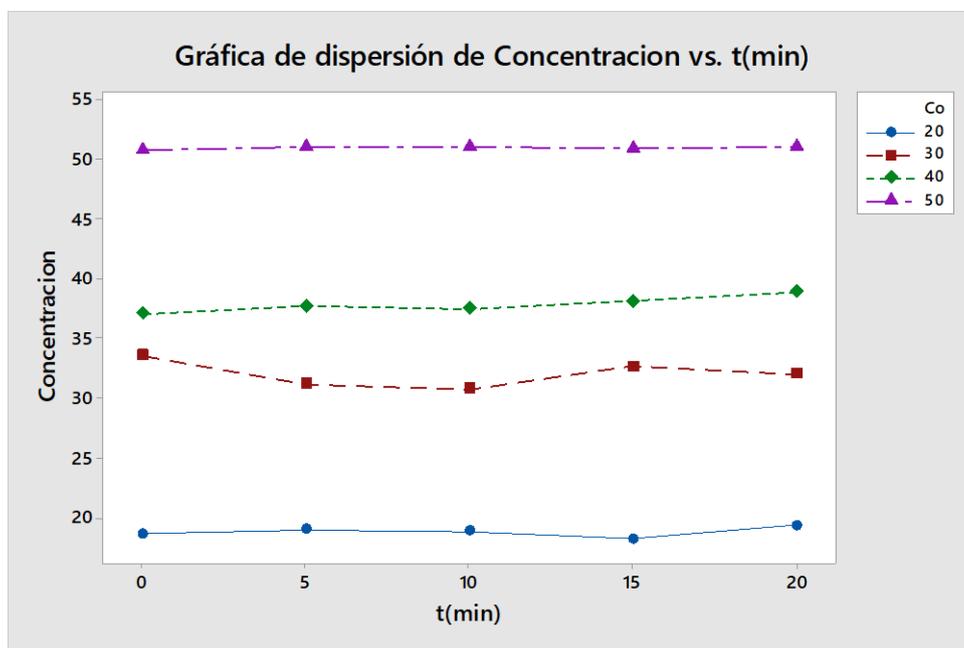
Concentración y % de degradación del colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante.

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Inicial (ppm)	%D
0	0,2784	18,5880	0	20	0
5	0,2852	18,9172	-0,0158	20	-1,7707
10	0,2826	18,7913	-0,0084		-1,0930
15	0,2693	18,1476	0,0216		-2,3695
20	0,2937	18,3280	-0,0358		-3,9840
0	0,5879	33,5687	0		30
5	0,5390	31,2018	-0,0312	30	7,0508
10	0,5301	30,7710	-0,0181		8,3340
15	0,5690	32,6539	-0,0739		2,7250
20	0,5562	32,0343	-0,0560		4,5708
0	0,6609	37,1021	0		40
5	0,6727	37,6733	-0,0145	40	-1,5394
10	0,6691	37,4990	-0,0100		-1,0697
15	0,6825	38,1476	-0,0263		-2,8178
20	0,6977	38,8833	-0,0445		-4,8008
0	0,9428	50,7468	0		50
5	0,9485	51,0227	-0,0052	50	-0,5437
10	0,9489	51,0421	-0,0056		-0,5819
15	0,9469	50,9453	-0,0037		-0,3911
20	0,9493	51,0614	-0,0059		-0,6200

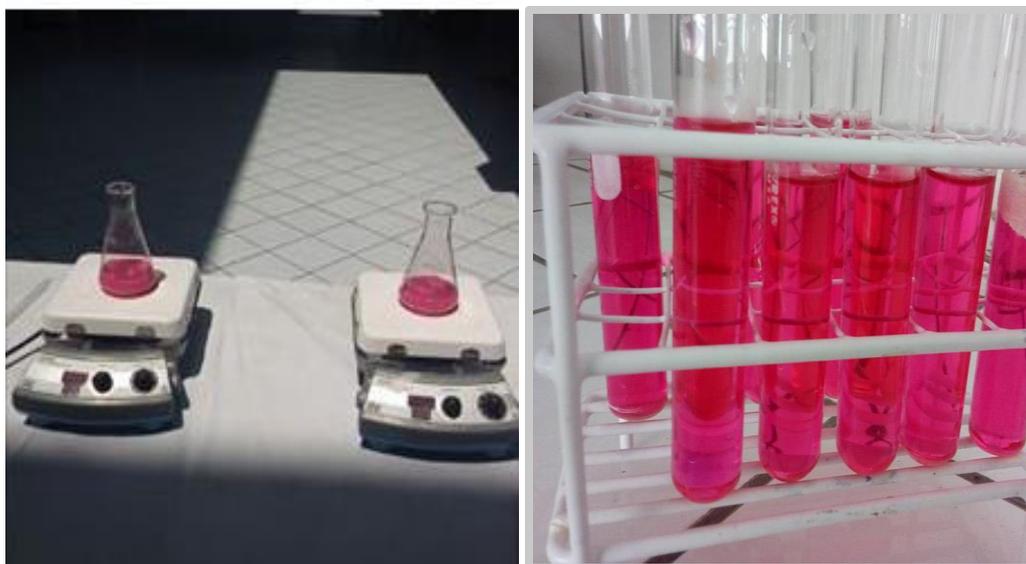
Nota: Los datos indican que el porcentaje de degradación de la concentración del colorante prácticamente es nulo. Lo que indica que, sin catalizador, la fotocatalisis no existe.

Figura 20

Gráfica de dispersión de la concentración de colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30 40 y 50 ppm.

**Figura 21**

Fotografías del proceso fotocatalítico del rojo escarlata a concentraciones de 20, 30 40 50 ppm sin usar catalizar.



Nota: Se observa que la coloración del rojo escarlata prácticamente se mantiene. Lo que indica que la fotocatalisis no existe.

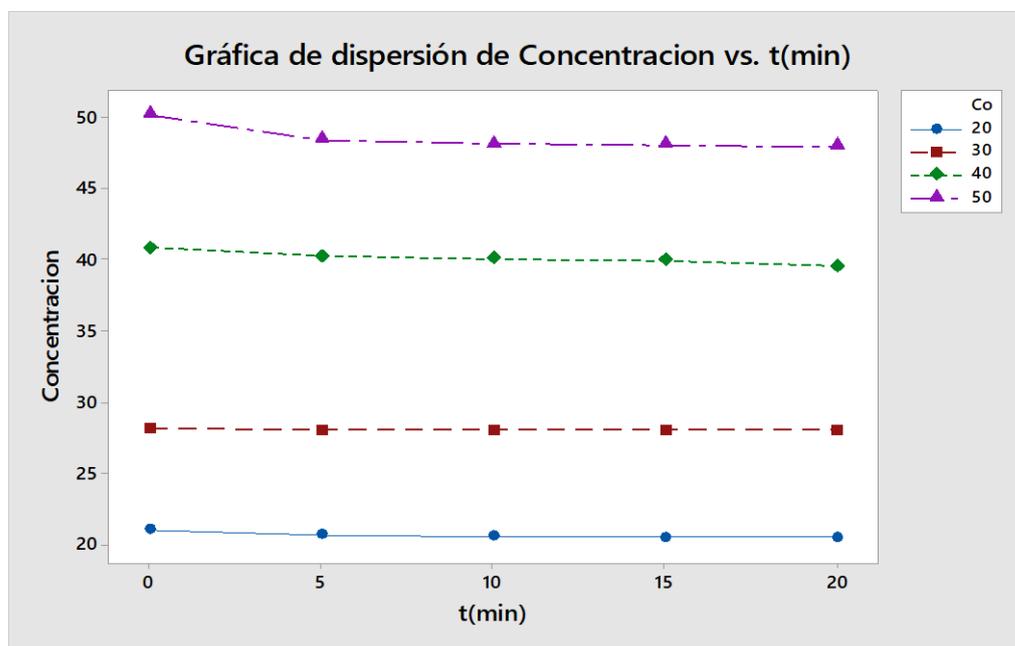
Tabla 11

Concentración y % de degradación del colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante.

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Inicial (ppm)	%D
0	0,5835	21,0096	0	20	0
5	0,5720	20,6422	0,0176		1,7487
10	0,5682	20,5207	0,0235		2,3270
15	0,5678	20,5080	0,0241		2,3175
20	0,5667	20,4696	0,0260		2,5702
0	0,8063	28,1278	0	30	0
5	0,8028	28,0159	0,0039		0,3978
10	0,8027	28,0128	0,0040		0,4088
15	0,8026	28,0096	0,0042		0,4202
20	0,8022	27,9970	0,0046		0,4650
0	1,2022	40,7764	0	40	0
5	1,1853	40,2364	0,0133		1,3242
10	1,1794	40,0479	0,0180		1,7865
15	1,1744	39,8882	0,0220		2,1782
20	1,1627	39,5144	0,0314		3,0949
0	1,4953	50,1406	0	50	0
5	1,4403	48,3834	0,0356		3,5045
10	1,4313	48,0958	0,0416		4,0781
15	1,4285	48,0064	0,0435		4,2564
20	1,4257	47,9170	0,0453		4,4347

Figura 22

Grafica de dispersión de la concentración de colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm

**Figura 23**

Fotografía de la concentración de colorante azul corazol RD en función del tiempo de reacción, sin usar catalizador para muestras de 20 ppm.



Nota: Se observa que la coloración del azul corazol prácticamente no cambia. Lo que indica que la fotocatalisis no existe

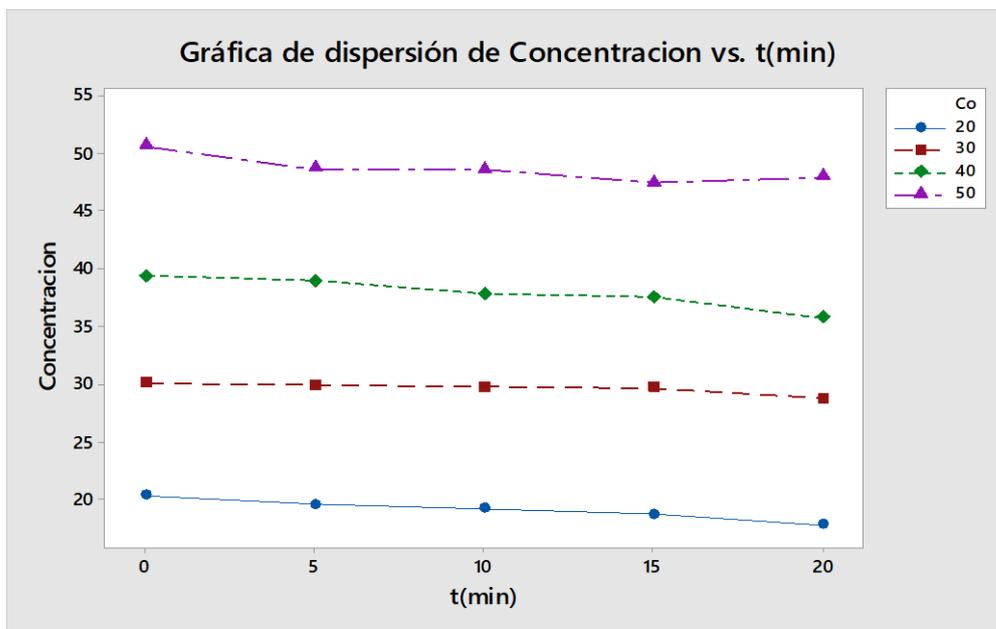
Tabla 12

Concentración y % de degradación del colorante amarillo synozol en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante.

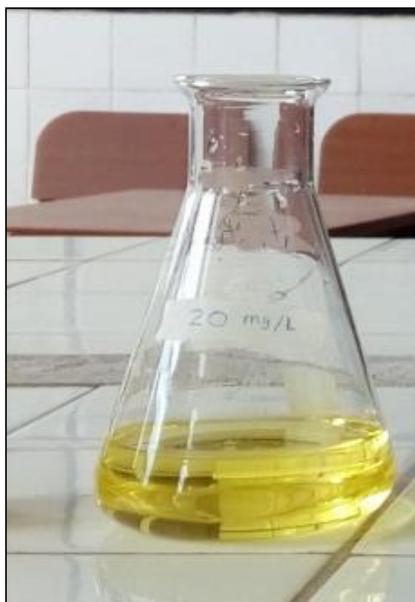
Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Inicial (ppm)	%D
0	0,8860	20,2768	0	20	0
5	0,8595	19,5282	0,0377		3,6919
10	0,8465	19,1610	0,0566		5,5028
15	0,8289	18,6638	0,0829		7,9549
20	0,7976	17,7796	0,1315		12,3155
0	1,2335	30,0932	0	30	0
5	1,2249	29,8503	0,0081		0,8071
10	1,2221	29,7712	0,0107		1,0700
15	1,2177	29,6412	0,0151		1,5020
20	1,1855	28,7373	0,0461		4,5056
0	1,5630	39,4013	0	40	0
5	1,5480	38,9774	0,0108		1,0758
10	1,5075	37,8333	0,0406		3,9795
15	1,4980	37,5652	0,0477		4,6599
20	1,4356	35,8022	0,0957		9,1344
0	1,9611	50,6469	0	50	0
5	1,8918	48,6892	0,0394		3,8653
10	1,8886	48,5988	0,0412		4,0438
15	1,8487	47,4717	0,0647		6,2692
20	1,8312	47,9774	0,0541		5,2708

Figura 24

Grafica de dispersión de concentración de colorante amarillo synozol en función del tiempo de reacción, sin catalizador para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm.

**Figura 25**

Fotografía de la concentración de colorante amarillo synozol transcurridos 15 minutos, sin catalizador para muestra de 20 ppm.



Nota: Se observa que la coloración del amarillo synozol se mantiene. Lo que indica que la fotocatalisis no existe

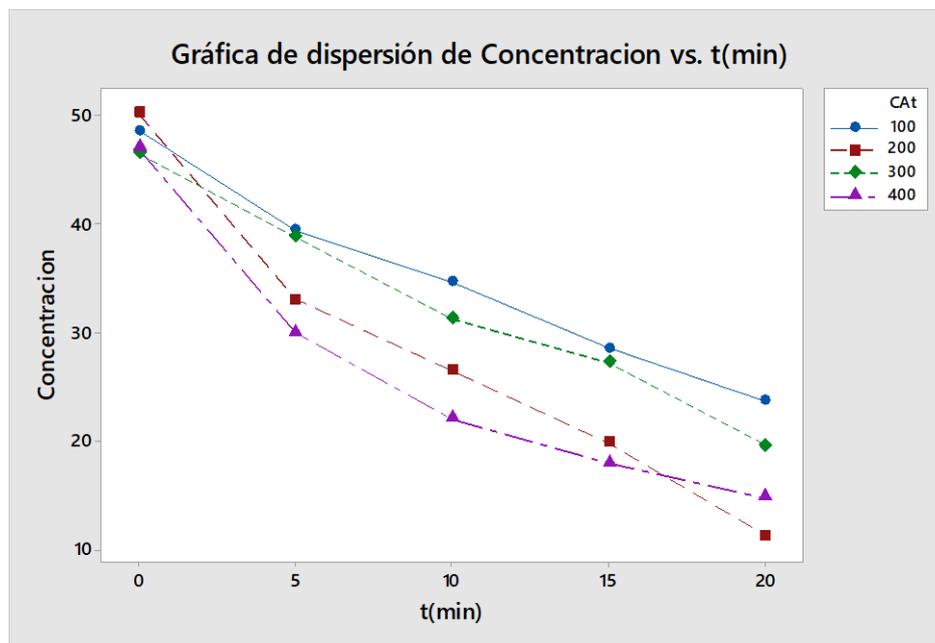
Tabla 13

Concentración y % de degradación del colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, utilizando 100, 200, 300, y 400 mg de catalizador para muestras que contienen 50 ppm de colorante.

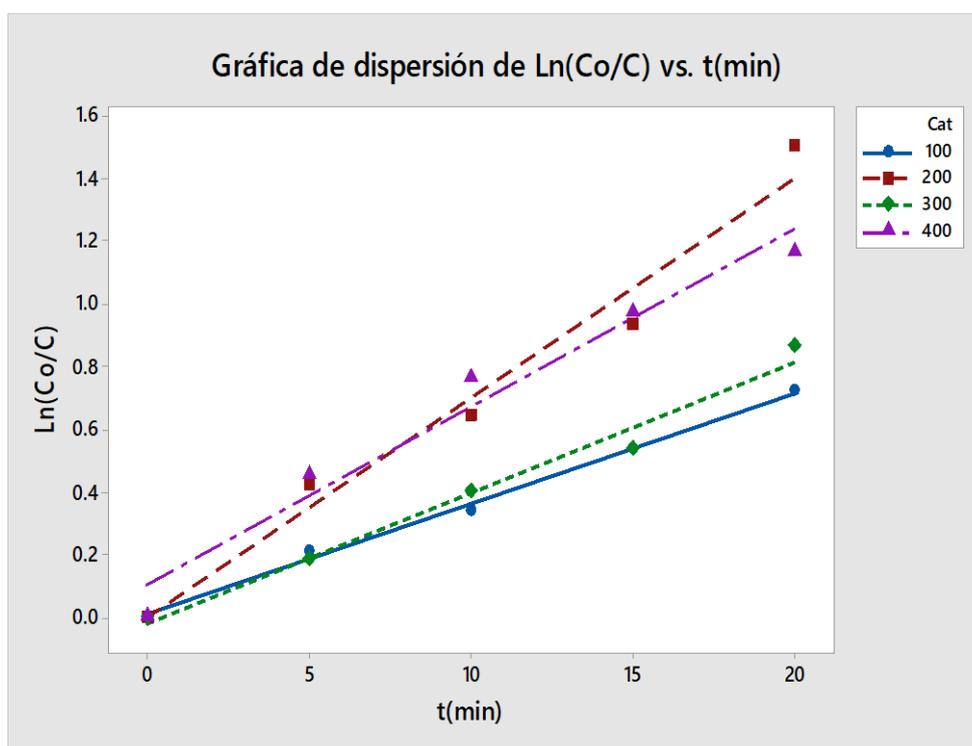
Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (ppm)	Ln (Co/C)	Concentración Catalizador (ppm)	%D
0	1,2723	48,6206	0	100	0
5	1,0285	39,4067	0,2101		18,9506
10	0,9018	34,6183	0,3396		28,7991
15	0,7396	28,4883	0,5345		41,4069
20	0,6125	23,6848	0,7192		51,2865
0	1,3148	50,2268	0	200	0
5	0,8599	33,0342	0,4189		34,2287
10	0,6851	26,4286	0,6421		47,3814
15	0,5088	19,7657	0,9326		60,6471
20	0,2827	11,2207	1,4988		77,6599
0	1,2165	46,5117	0	300	0
5	1,0112	38,7528	0,1825		16,6816
10	0,8120	31,2245	0,3985		32,8674
15	0,7054	27,1958	0,5366		41,5291
20	0,5046	19,5601	0,8662		57,9458
0	1,2288	46,9766	0	400	0
5	0,7765	29,8828	0,4523		36,3879
10	0,5662	21,9350	0,7615		53,3065
15	0,4583	17,8571	0,9672		61,9872
20	0,3742	14,6788	1,1632		68,7529

Figura 26

Grafica dispersión de concentración de colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, usando 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador en solución de 50 ppm.

**Figura 27**

Grafica de $\ln(C_0/C)$ de colorante rojo escarlata en función del tiempo de reacción, y ajuste lineal, usando 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador en solución de 50 ppm.



V. DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 Caracterización fisicoquímica del fotocatalizador

De los resultados mostrados en las figuras 8 y 9, se concluye que las partículas de óxido de zinc utilizados en este experimento exhiben forma variable y el tamaño promedio de partícula es de 0.908 micras (908 nm) \pm 0.427 micras. El 76% de las partículas exhiben un tamaño entre 0.5 y 0.9 micras, según informe técnico del laboratorio de Materiales de PUCP (ver anexo 10). Esto indica que se tiene una gran área superficial de contacto, y cuenta con infinidad de partículas dispersas en la solución que actúan cada una como un sitio activo donde se produce la fotocatalisis. Corzo et al. (2012) también utilizaron el ZnO como foto catalizador en sus estudios de degradación de colorante rodamina B. La caracterización por MEB del fotocatalizador indica que el tamaño de partícula utilizado fue aproximadamente de 0,5 micras. La diferencia se debe probablemente al tipo y uso de malla del tamiz utilizado en el experimento. Cabe, indicar que la disposición del catalizador fue en suspensión (Marín et al. 2007, y Sánchez et al. 2004).

5.2 Obtención de la longitud de onda de los colorantes

Para obtener la longitud de onda idónea para los análisis de absorción se hizo un barrido del espectro para muestras de 20, 30, 40 y 50 ppm. En la figura 10, se muestra el espectro de absorción del colorante rojo escarlata a distintas concentraciones, presentando un valor máximo aproximadamente de 520 nm. Siguiendo el mismo procedimiento se determinaron la longitud de onda para los colorantes en estudio (azul corazol RD, y amarillo synozol S-22) que se resumen en la tabla 6. Se observa que los valores de la longitud idónea de las muestras colorantes se encuentran dentro del rango del espectro de la luz visible. Cabe indicar que todas las mediciones de absorbancia para las distintas muestras de colorantes en estudio se realizaron a longitudes de onda indicadas en esta tabla.

5.3 Obtención de la curva de concentraciones

Para el colorante rojo escarlata, la curva de calibración de absorbancia versus concentración se obtiene de las corridas experimentales en tiempo cero dadas en el anexo 4 (a). Mediante regresión lineal de los datos experimentales se obtiene la figura 10, donde la ecuación matemática es:

$$\text{Absorbancia} = 0,0149 \text{ Concentración} - 0,0123 \quad R^2 = 1$$

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Absorbancia} + 0,0123}{0,0149}$$

Para los colorantes: azul corazol, RD y amarillo synozol S-22, los datos del anexo 4 (b) y 4 (c) en tiempo cero, generan las ecuaciones que se muestran en las figuras 12, y 13 respectivamente. Se observa que los datos experimentales de todos los colorantes satisfacen un coeficiente de correlación lineal positiva muy alta $R^2 \cong 1$, que indica la bondad del ajuste lineal.

5.4 Cinética de degradación con catalizador

La tabla 7, muestra el resumen de los resultados de la concentración del colorante rojo escarlata y el porcentaje de degradación en función del tiempo usando 100 mg de catalizador ZnO/100 mL de solución, en muestras que contienen 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante. Se puede observar que el porcentaje de degradación del colorante aumenta a bajas concentraciones iniciales, llegando cercanamente al 100% a los 20 minutos de reacción. Los datos se reflejan en la figura 14, donde se observa que la concentración del colorante disminuye progresivamente desde una concentración inicial hasta alcanzar un límite del equilibrio químico aproximadamente a los 15 minutos, para la concentración inicial de 20 ppm. Para concentraciones iniciales mayores, el límite se incrementa. Para la concentración inicial de 40

ppm, la degradación del colorante es más pronunciada, mientras que, para 50 ppm, el equilibrio se consigue a tiempos mayores de 20 minutos. La figura 15, muestra las isothermas de $\ln(C_0/C)$ en función del tiempo para distintas concentraciones iniciales. Los resultados también muestran que cuando la concentración inicial del colorante aumenta, la velocidad de degradación del colorante disminuye, y para lograr que la velocidad de reacción sea la más alta, la concentración inicial del colorante debe ser la más baja, correspondiendo en este caso una óptima de 20 ppm.

Para el colorante azul corazol RD, los resultados del proceso foto catalítico se muestran en la tabla 8. Se observa que la degradación del colorante aumenta a bajas concentraciones iniciales, llegando aproximadamente a 43 % en 20 minutos de reacción. A concentraciones iniciales mayores, la degradación disminuye. La figura 16 muestra la degradación de la concentración del colorante donde el equilibrio se logra por encima de 20 minutos, y que a bajas concentraciones iniciales la velocidad de reacción aumenta siendo la más alta a 20 ppm, en consecuencia, la concentración inicial óptima resulta 20 ppm.

Para el colorante amarillo sinozol S-22, los resultados se presentan en la tabla 9 y figura 18, donde se observa que la degradación para concentraciones iniciales de 20, 30 y 40 ppm es aproximadamente el 50% en 20 minutos, asimismo, se observa que la degradación del colorante tiene un comportamiento polinómico de segundo grado, con una pendiente más pronunciada que la del colorante azul corazol RD. Además, para la concentración inicial de 20 ppm, el límite del equilibrio químico es aproximadamente a 20 minutos de reacción, incrementándose a concentraciones iniciales superiores.

En conclusión, se arriba que a bajas concentraciones iniciales o en soluciones diluidas la degradación del colorante es mayor que en soluciones más concentradas, siendo la concentración inicial óptima de 20 ppm. Por otro lado, la velocidad de degradación del colorante directo rojo escarlata es cercano al 100% en 20 minutos, mientras que para los colorantes reactivos azul corazol RD y el amarillo sinozol S-22, es mucho menor

(cercanamente al 50%) en el mismo tiempo. Asimismo, el equilibrio químico se consigue aproximadamente a los 15 minutos para una solución de concentración inicial de 20 ppm, mientras que para concentraciones iniciales mayores se consigue a tiempos superiores de 15 minutos.

Aplicando el modelo de isoterma Langmuir-Hinshelwood, y usando los datos de las tablas 7, 8 y 9 se obtienen las isotermas para los colorantes rojo escarlata, azul corazol RD y el amarillo synozol S-22, a concentraciones iniciales de 20, 30, 40 y 50 ppm, tal como se muestran en las figuras 15, 17 y 19. La mayoría de estas satisfacen el modelo de la regresión lineal con coeficientes de regresión cercanos a la unidad. Usando la ecuación (18) y las ecuaciones de correlación lineal de las figuras indicadas se obtienen los parámetros cinéticos de los colorantes en estudio que se muestran en la tabla 14.

Los valores obtenidos son aproximadamente similares a los publicados por Corzo et al. (2012) en sus estudios de la degradación foto catalítica oxidativa de la Rodamina B. Los autores usando ZnO en suspensión como catalizador y la irradiación solar, obtuvieron una cinética de pseudo primer orden con la constante cinética de 16.55 min^{-1} y una constante de equilibrio de adsorción de 0.0061, y el tiempo de vida promedio de 6.8 minutos. Garcés et al. (2005), estudiaron la cinética de degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto por medio de la fotocatalisis con luz solar (colector solar) empleando el TiO_2 y H_2O_2 . Sus resultados, indican que la degradación sigue una cinética de pseudo primer orden, y que el parámetro que más influyó sobre los tiempos de vida media del colorante, es el uso de TiO_2 conjuntamente con peróxido de hidrogeno. Utilizando 150 mg/L de TiO_2 y 2 ml/L de H_2O_2 , obtuvieron un tiempo de vida media de 1.92 horas.

Indudablemente, los resultados difieren por el tipo de colorante que es de distinta naturaleza química y también por el tipo de proceso, ya sea en suspensión e irradiación directa o usando un colector solar. También, al tamaño y tipo de catalizador (TiO_2 , TiO_2 y H_2O_2 , ZnO).

No obstante, los valores están dentro del rango aproximado, confirmando que el proceso de fotocátalisis solar heterogénea utilizando el ZnO como catalizador es una técnica alternativa viable para la descontaminación de aguas coloreadas provenientes de la industria textil en épocas y lugares donde hay presencia de luz solar. Blanco et al. (1994), Romero et al. (1999), Pey (2008) y Escudero (2015) también utilizaron la radiación solar en sus trabajos de degradación de colorantes y llegaron a la misma conclusión.

Para el colorante azul corazol RD, la constante cinética es aproximadamente 04 veces mayor que la del rojo escarlata, y el tiempo de vida media aumenta en aproximadamente tres (03) veces. En el caso del colorante amarillo synozol S-22, la constante cinética es aproximadamente 5 veces mayor que del rojo escarlata y el tiempo de vida media aumenta aproximadamente tres (03) veces.

Los resultados obtenidos en este trabajo son consistentes debido a la afinidad que tienen los colorantes reactivos a reaccionar con la tela, mientras que los directos actúan de acuerdo a las fuerzas de Van der Waals.

5.5 Cinética de degradación sin catalizador

A fin de conocer el efecto del catalizador en el proceso foto catalítico se procedió a realizar las corridas experimentales sin la presencia del catalizador óxido de zinc en muestras cuyas concentraciones fueron 20, 30, 40 y 50 ppm de colorante. El reactor fue sometido a exposición del sol entre 12 y 15 horas del día a la temperatura promedio de 24 °C. Para el colorante rojo escarlata se obtiene la curva de absorbancia/concentración (ver anexo 5a).

$$\text{Absorbancia} = 0,02066 \text{ Concentración} - 0,10563 \quad R^2 = 0,9548$$

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Absorbancia} + 0,10563}{0,02066}$$

A partir de esta relación indicada líneas arriba se obtuvo la tabla 10. Los resultados muestran que la concentración del colorante en todas las muestras prácticamente no varía con el tiempo de 5, 10, 15 y 20 minutos. El resultado se refleja en las figuras 20 y 21, donde prácticamente la concentración del colorante permanece constante con el tiempo en todas las concentraciones evaluadas, y se aprecia que la coloración rojiza permanece en el tiempo, lo que indica que en ausencia de fotocatalizador, la reacción foto catalítica no existe. Resultados similares se obtuvieron para el colorante azul corazol RD y el amarillo synozol que se verifican en las tablas 11 y 12, donde prácticamente la concentración del colorante no cambia con el tiempo tal como se observan en las figuras 22 y 24, demostrando de este modo la ausencia de reacción foto catalítica al no usar catalizador.

5.6 Efecto de la concentración del fotocatalizador

Los resultados de la fotocatálisis solar del colorante rojo escarlata utilizando 100, 200, 300 y 400 mg de fotocatalizador ZnO/100 mL de solución, para una concentración inicial de 50 ppm en cada muestra se indican en la tabla 13 y figuras 26 y 27, donde se observan que a medida que se incrementa la cantidad de fotocatalizador, la concentración del colorante disminuye en el tiempo más rápidamente. La cantidad óptima de fotocatalizador ZnO por cada 100 ml de solución resulta de 200 mg. El óptimo se refiere a la cantidad de catalizador donde se supone que todas las partículas estén iluminadas de modo tal que no exista exceso que haga efecto pantalla y cubra parcialmente la superficie de las partículas. Es de esperar que, a mayor cantidad de catalizador utilizada, mayor sería la eficiencia que se obtiene. Sin embargo, a mayor cantidad, el efecto de la turbidez producida por la presencia de partículas también aumenta, dificultando la difusión de la luz ultravioleta y disminuyendo el rendimiento de la reacción al impedir el paso de la luz solar (Alarcón, 2014).

Corzo Lucioni y Vega Baudrit (2012), en su estudio cinético de la degradación fotocatalítica de la rodamina B, también evaluaron el efecto de la concentración del catalizador. Utilizando una concentración inicial de 30 ppm de colorante y dosis de 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador por 100 mL de solución, encontraron que la masa óptima de catalizador ZnO por cada 100 mL de solución es de 300 mg. Los autores indican que en las reacciones fotocatalíticas un aumento en la concentración del colorante y/o del fotocatalizador, aumentará la velocidad de reacción hasta un cierto límite, porque a concentraciones elevadas de colorante las partículas impiden el desplazamiento de fotones libre a través de la solución, similarmente, con concentraciones elevadas de fotocatalizador habrá moléculas no activadas por los fotones como también algunas que sí lo están. Estas moléculas activadas pueden sufrir desactivación debido a las colisiones con moléculas no activadas, generando la disminución de la velocidad de reacción.

La diferencia, de la cantidad óptima de fotocatalizador respecto a lo obtenido por los autores se debería al tamaño del catalizador utilizado en el experimento que corresponde a diámetros promedios mayores de 0.5 a 0,9 micras.

Tabla 14*Parámetros cinéticos de la reacción fotocatalítica de los colorantes.*

Parámetros cinéticos	Valores
Rojo escarlata	
Orden de reacción	1
Constante cinética k (min^{-1})	40.86
Constante de equilibrio de adsorción K	0.00278
Constante aparente de velocidad (min^{-1})	0.1134
$t_{1/2}$ promedio (min)	6.22
Azul corazol RD	
Orden de reacción	1
Constante cinética k (min^{-1})	226.67
Constante de equilibrio de adsorción K	0.00012
Constante aparente de velocidad (min^{-1})	0.0272
$t_{1/2}$ promedio (min)	25.5
Amarillo synozol S-22	
Orden de reacción	1
Constante cinética k (min^{-1})	299.3
Constante de equilibrio de adsorción K	0.00011
Constante aparente de velocidad (min^{-1})	0.0329
$t_{1/2}$ promedio (min)	21.07

VI. CONCLUSIONES

- La cinética de reacción del proceso de degradación de la concentración de los colorantes estudiados se ajusta al modelo de isoterma de *Langmuir-Hinshelwood* y todos son de pseudo primer orden. Los valores obtenidos de la constante cinética promedio se muestran en la tabla 14. Se observa que los colorantes reactivos, muestran constantes cinéticas y tiempos de vida media promedios mayores que el colorante directo, mientras que las constantes de adsorción son ligeramente menores.
- Los resultados de las tablas 7, 8 y 9; y figuras 13, 15 y 17 muestran que la concentración del colorante disminuye progresivamente desde una concentración inicial C_0 hasta alcanzar un límite del equilibrio químico. A bajas concentraciones la degradación de los colorantes es alta, mientras que, a concentraciones elevadas, esta disminuye debido a la presencia de partículas que impiden el desplazamiento de fotones libre a través de la solución, por lo que la concentración inicial óptima es de 20 ppm. Para el colorante directo la degradación es aproximadamente el 100% a los 20 minutos de reacción, con lo que se consigue un valor muy por debajo del VMA, mientras que para los reactivos es cercana al 50 % en el mismo tiempo y concentración inicial, lo que indica una mayor resistencia a la degradación y mayor tiempo de irradiación.
- La tabla 13 y figuras 26 y 27 muestran el efecto de la concentración del catalizador en el proceso de degradación fotocatalítica del colorante rojo escarlata donde se observa que a medida que la concentración del catalizador aumenta, también se incrementa el porcentaje de degradación. Sin embargo, la concentración óptima de catalizador debe ser de 200 ppm, con el cual se consigue mayor degradación. A concentraciones superiores la degradación decae ligeramente debido a la presencia de moléculas no activadas por los fotones.

La presente investigación trata de la degradación de algunos colorantes que utiliza la industria textil. Se ha demostrado experimentalmente que la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador, es muy efectiva para la degradación de los colorantes estudiados (rojo escarlata, azul corazol y amarillo synozol), que puede ser utilizada para el tratamiento de efluentes líquidos provenientes de la industria textil en lugares con radiación solar o combinadas con lámparas UV en épocas donde hay poca radiación solar. Asimismo, cabe indicar que el proceso de reacción fotocatalítica es imposible sin la presencia del fotocatalizador.

VII. RECOMENDACIONES

- Respecto a la disposición del catalizador en solución, este puede encontrarse en suspensión o inmovilizado. El uso de partículas de ZnO en suspensión promueve la aparición de sólidos suspendidos, por lo que se tiene que separar estas partículas de las aguas tratadas al ser una variable limitada por la legislación vigente en materia de vertidos. Este inconveniente puede ser superado por una de las dos alternativas: aumentando el tamaño de las partículas a fin de separarlas por filtración, o bien adherirlas a soportes inertes (vidrio, policarbonato, estireno, etc.) de mayor tamaño. Este último es el más recomendable que los sistemas en suspensión.
- En el proceso de degradación fotocatalítico, el protocolo debe seguirse minuciosamente y con detalle cada uno de los pasos. Por ejemplo, en la toma de muestras de 10 ml una vez iniciada la reacción, la muestra debe centrifugarse para separar algunas partículas de catalizador que pueda existir y luego decantar en ausencia de luz solar a fin de paralizar la reacción y llevarlo al espectrofotómetro para la medición de la absorbancia.
- Aplicar la fotocatalisis solar heterogénea utilizando óxido de zinc como catalizador en el tratamiento de efluentes líquidos provenientes de la industria textil, en lugares con bastante irradiación solar y en combinación con otras tecnologías que emplean lámparas UV, en épocas y lugares con poca irradiación solar.

VIII. REFERENCIAS

- Aboglio, Ana María (2015). Socavando los límites del antropocentrismo. Matices. *ILECA (Instituto Latino de Estudios Críticos Animales)* Vol. I. pp 53-73. ISSN 2346-920X
<http://revistaleca.org/journal/index.php/RLECA/article/view/32>
- Alarcón-Rodas, C.A. (2014). Tratamiento de aguas residuales proveniente de la fase de teñido de la curtiembre mediante un sistema fisicoquímico basado en la oxidación avanzada con la ayuda del semiconductor TiO₂ en presencia de luz UV. *Tesis. Universidad San Francisco de Quito*. Repositorio digital USFQ.
<https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/3241>
- Anaya Meléndez Fernando (2019). Tratamiento de aguas residuales con colorantes reactivos mediante proceso de oxidación avanzada Fenton y variantes. *Rev. de investig. agroproducción sustentable* 3(1): 55-61, 2019 ISSN: 2520-9760. DOI:10.25127/aps.20191.483.
https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=EnCgiOkAAAJ&citation_for_view=EnCgiOkAAAAJ:d1gkVwhDpl0C
- Anjaneyulu, Y., Sreedhara-Chary, N., & Suman-Raj, S. (2005). Decolourization of industrial effluents – available methods and emerging technologies – a review. *Rev. Environ. Sci. Technol.*, **4**, pp. 245–273.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-005-1246-z>
- Anpo, M. Yamashita, H., & Zhang, S.G. (1996). Photoinduced surface chemistry. *Elsevier Current Opinion in Solid State and Materials Science*. **5**, pp. 630-635.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028696800441>

- Arroyave Rojas, J.A., Garcés Giraldo, L. F., Arango Ruiz, J., Agudelo Lopez, C., y y Martinez Rivera, C. (2009). Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina. *Rev. Lasallista de Investigación*. Vol. 6, nº 1, pp. 27-34. ISSN 1794-4449.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-44492009000100004&script=sci_abstract&tlng=es
- Bauer, R., Fallmann, H., Malato, S., y Blanco, J. (1999). Applicability of the Photo-Fenton method for treating water containing pesticides. *Catalysis Today. Elsevier*, 54, pp. 1-3.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586199001923>
- Blanco, J., Rodríguez, S., y Carmona, E. (1997). Tratamiento de efluentes industriales mediante detoxificación solar. *CIEMAT, Almeria*, dialnet.unirioja.es. pp. 29-47.
<https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/2245461.pdf>
- Blanco J., Malato, S., Bahnemann D., Bockelman D., Weichgrebe D., Carmona F., y Martinez F. (1994). Proceedings of 7th Inter. Symp. On Solar Thermal Conc. Tech., *IVTAN Ed.* ISBN 5-201-09540-2, pp. 540-550, Moscow, Russia.
<http://biblioteca.cio.mx/tesis/09270.pdf>
- Brown, M.A. & De Vito, S.C. (1993). Predicting azo dye toxicity. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.***23**. pp. 249–324.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389309388453>
- Butron Sevillano, María (2015). Evaluación del potencial de hongos xilófagos en la remoción de colorantes de tintorería de textiles celulósicos. Tesis. Universidad Católica de Santa María. Arequipa. Perú.
<https://core.ac.uk/download/pdf/198131132.pdf>

- Cáceres, J., Malato, S., y Blanco, J. (2002). Photocatalytic treatment of water soluble pesticides by photo-Fenton and TiO₂ using solar energy. *Catalysis today*. Elsevier. 76, pp. 209-220.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586102002201>
- Corzo-Lucioni, A., y Vega-Baudrit, J. (2012). Estudio cinético de la degradación foto catalítica oxidativa de colorantes empleados en la industria textilera. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 13, pp. 60-68.
<https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/07/2012-lucioni.pdf>
- Cortázar-Martínez, A., Coronel-Olivares, C., Escalante-Lozada, J., y Gonzales-Ramírez, C. (2012). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- Costa Mirko, R. (1990). Las fibras textiles y su tintura. *Concytec*. Lima. Pp 1-563.
https://books.google.com/books/about/Las_fibras_textiles_y_su_tintura.html?hl=es&id=SvvZMgEACAAJ
- Couto, S. (2009). Dye removal by immobilized fungi. *Biotechnology Advances*, 27, 227– 235. Department of Chemical Engineering Rovira I Virgil University. doi: 10.1016/j.biotechadv.2008.12.001
- Christie, R. (2001). Colour Chemistry. *The Royal Society of Chemistry*, Cambridge, United Kingdom. PDF ISBN: 978-1-84755-059-0. Pp 218. DOI:
<https://doi.org/10.1039/9781847550590>
<https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-0-85404-573-0>
- Chang, J. & Waclawik, E.R. (2012). Facet-controlled self-assembly of ZnO nanocrystals by non-hidrolytic aminolysis and their photodegradation activities. DOI: 10.1039/c2cc25154j.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ce/c2ce25154j>

Chong, M. N., Jin, B., Chow, C.W.K., y Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology. *Water Research. Elsevier*, 44, pp. 2997-3027.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20378145/>

Chung, H., Kasai, S. & Nishimura, B.P.J. (1992). Yurprotection of DNA damage by dietary restriction. *Free Rad. Biol. Med.*, 12, pp. 523-525.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1601327/>

Chung, K.T. & Stevens, S.E.J. (1993). Decolourisation of azo dyes by environmental microorganisms and helminthes. *Environ. Toxicol. Chem.*, 12, pp. 2121–2132.

<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etc.5620121120>

CRIOGES (2021) Estudios sobre citostáticos y otros compuestos peligrosos en el ámbito hospitalario.pdf.

<https://www.crioges.com/wp-content/uploads>

Dávila Méndez Silvana G. (2012). Optimización del proceso de aplicación de los colorantes en la empresa Radel Industry S.A. *Tesis de grado, Ambato-Ecuador. Escuela de Ingeniería Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.*

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2026>

De Moraes, S.G., Freire, R.S. y Duran, N. (2000). Degradation and toxicity reduction of textile effluent by combined photocatalytic and ozonation processes. *Chemosphere*, 40, pp. 369-373.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653599002398>

Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA (2019). El peruano. Reglamento de Valores Máximos Admisibles.

<https://busquedas.elperuano.pe › normaslegales › decr...>

Dias, A.D., Sampaio, A., y Bezerra, R.M. (2007). Environmental applications of fungal and plant systems: decolourisation of textile wastewater and related dyestuffs. *En Environmental Bioremediation Technologies* (Eds. Singh S.N. y Tripathi R.D.) Springer Berlin Heidelberg, pp. 445-463.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-34793-4_19

Diaz Bravo Pablo (2016). Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil mediante fotocatalisis solar heterogénea. *Repositorio. Trabajo de investigación. FIQ-UNAC.*

https://unac.edu.pe/images/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/2016/12/DICIEMBRE%202016,%20PABLO%20BELIZARIO%20DIAZ%20BRAVO,%20FIQ.pdf

Diaz Bravo Pablo (2019). Degradación de la tartrazina mediante fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc. *Repositorio. Trabajo de investigación. FIQ-UNAC.*

<http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/5156>

Dos Santos, A., Cervantes, F., y Van-Lier, J. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresour. Technol.*, **98**, pp. 2369-2385.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406006043>

Escudero García, J.A. (2015). Regeneración de aguas contaminadas por plaguicidas (sustancias prioritarias y preferentes), con elevado potencial de lixiviación, mediante fotocatalisis solar. *Digitum.um.es.* Universidad de Murcia

<https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/45819>

Espinoza, M.P., Paspuel-Pupiales, L., Fernández, L., Guaman, W. (2022). Degradación fotocatalitica de azul de metileno utilizando TiO₂ impregnado en paredes de botellas

de vidrio y de polietileno. InfoANALITICA. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. ISSN: 2602-8344, vol. 10 (1).

revistainfoanalitica@gmail.com

Fernández Pérez Amparo (2020). Diseño, análisis y optimización de un nuevo sistema de reacción en continuo basado en nanos catalizadores crecidos sobre mallas micrométricas para la degradación de azul de metileno en agua. Tesis doctoral, Repositorio de la Universidad de Oviedo. Programa de Doctorado en Materiales.

https://digital.csic.es/bitstream/TD_Amparo_Fe...

Forero, J.E., Ortiz, O.P., y Ríos, F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Dialnet CT&F* (Ciencia, Tecnología y Futuro). ISSN-e 0122-5383, 3, pp. 97-109.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5513926>

Gavril, M. y Hodson, P.V. (2007). Investigation of the Toxicity of the Products of Decoloration of Amaranth by *Trametes versicolor*. *J. Environ. Qual.*, **36**, pp. 1591–1598.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17940258/>

Garcés Giraldo L.F., Mejía Franco E.A., y Santamaría Arengo J.J., (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. Vol. 1(1), pp. 83-92.

<https://www.redalyc.org/pdf/695/69511013.pdf>

Garcés Giraldo L.F., Mejía Franco E.A., y Santamaría Arengo J.J. (2005). Cinética de degradación y mineralización del colorante Rojo Amaranto por medio de la fotocatalisis con luz solar. *Revista Lasallista de Investigación*, Colombia. Vol. 2(1), pp. 19-26.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520104>

Garcés Giraldo Luis Fernando (2005). Degradación y mineralización de un colorante en aguas residuales, analizando desde las superficies de respuestas. *Revista Lasallista de Investigación*, Colombia. Vol. 7(2), pp. 113-123.

<https://www.redalyc.org/pdf/695/69519014013.pdf>

García Ortiz Jorge (2014). Depuración de aguas contaminadas con plaguicidas empleados en cultivos de caña de azúcar en Colombia. *Trabajo de master. Universidad Politecnica de Valencia*. Pp.27-30.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/35725/DEPURACI%C3%93N%20DE%20AGUAS%20CONTAMINADAS%20CON%20PLAGUICIDAS%20EMPLEADO%20EN%20CULTIVOS%20DE%20CA%C3%91A%20DE%20AZ%C3%9ACAR%20EN%20COLOMBIA.pdf?sequence=1>

Ghaly, A., Ananthashankar, R., Alhattab , M., & Ram, V. V. (2014). Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. *Chemical Engineering & Process Technology*, 5(1), 18.

<http://dx.doi.org/10.4172/2157-7048.1000182>

Gómez, L., Urkiaga, A., Gutiérrez, M. y De Las Fuentes, L. (2000). Fotooxidación de vertidos químicos. *Centro Gaikar*. ISSN 0210-2064, pp. 211-216.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2892426>

Gómez Muñoz, B.V. (2017). Remoción de azul de metileno mediante fotocatalisis heterogénea. Tesis para optar el grado de ingeniero Ambiental. *Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas*. Repositorio Continental.

<https://docplayer.es/97256163-Universidad-de-ciencias-y-artes-de-chiapas-programa-educativo-de-ingenieria-ambiental-tesis-remocion-de-azul-de-metileno-mediante.html>

González, G. (2006). Estudio de la degradación de un colorante azo rojo reactivo en un biorreactor anaerobio de flujo ascendente. *Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Celaya*. México.

https://www.researchgate.net/publication/267152722_Estudio_de_la_degradacion_de_un_colorante_azo_rojo_reactivo_en_un_biorreactor_anaerobio_de_flujo_ascendente

Gonzales López, I.M. (2006). Proceso de Tintorería y Acabado en una Industria Textil Peruana. *Tesis, UNI- Lima*.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_f4a18d71f68061f733f9031fa172cbf0

Gul, S. Ozcan, O., y Erbatur. (2007). Ozonation of CI Reactive Red 194 and CI reactive Yellow 145 in aqueous solution in the presence of granular activated carbón. *Dyes and Pigments*. Elsevier, pp. 426-431.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Ozonation-of-C.I.-Reactive-Red-194-and-C.I.-Yellow-G%C3%BCI-Ozcan/7791018e672d676725a23b27b84961d7cf73d7b8>

Glaze, W. H. (1987). Drinking water treatment with ozone. *Environmental Science and Technology* 21, pp. 224-230. Doi:org/10.1021/es00157a001.

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es00157a001>

Hernández, J.M., García, L.A, y García, R. (2012). Estudio cinético de la fotodegradación del naranja de metilo en presencia de TiO₂: Efecto de la fuente de radiación UV, concentración del azo-colorante y del catalizador. Dialnet. unirioja.es. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, ISSN-e4 0718-8706, 3, pp. 25-34.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627686003>

Iglesia-Juez, A., Kubacka, A., Colon, G. y Fernández García, M. (2013). Photocatalytic Nanooxides: The case of TiO₂ and ZnO. *Elsevier*, pp. 245-266. Doi:10.1016/B978-0-444-53874-1.00010-y.

https://www.researchgate.net/publication/283159295_Photocatalytic_Nanooxides_The_Case_of_TiO2_and_ZnO

Integrated pollution prevention and control. IPPC. (2003). Reference Document on the General Principles of Monitoring. Pp-1-111. EUROPEAN COMMISSION.

<https://www.ecolex.org/details/legislation/integrated-pollution-prevention-and-control-law-2003-law-no-562003-lex-faoc087108/>

Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295.

<https://www.sciencedirect.com/pii>

Kandelbauer, A., Guebitz, G. (2005). Biorremediation of the Decolorization of Textile Dyes. *A Review*, Chapter 26. Parte III, pp. 269-288.

<https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/bioremediation-for-the-decolorization-of-textile-dyes-a-review>

Kehinde, F., & Aziz, H. (2014). Textile Waste Water and the advanced Oxidative Treatment Process, an Overview. *International Journal of Innovative Research in Science, 107 Engineering and Technology*, 3(8), 15310-15317. doi:10.15680/IJRSET.2014.0308034

<https://www.semanticscholar.org/paper/Textile-Waste-Water-and-the-advancedOxidative-an-Kehinde-Aziz/9dd15573dd8f3ad644d2108921708a6d9cdf131e>

Kuhad, R.C., Sood, N., Tripathi, K.K., Singh, A. y Ward, O.P. (2004). Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Adv. Appl. Microbiol.*, 56, pp. 185-213.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15566980/>

Ley General del Ambiente N° 28611 (2005). Congreso de la república. Pp 01-60. Fecha (13 de octubre 2005). Minam

<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>

Mansilla, H. D., Lizama, C., Gutarra, A. y Rodríguez, J. (2015). Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil, en Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea. *Blesa M.A. editor, Editorial CYTED*, La Plata, Argentina, pp. 285-294.

https://www.researchgate.net/publication/237275070_TRATAMIENTO_DE_RESIDUOS_LIQUIDOS_DE_LA_INDUSTRIA_DE_CELULOSA_Y_TEXTIL

Manu, B. & Chaudhari, S. (2002). Anaerobic decolorization of simulated textile wastewater containing azo dyes. *Biores. Technol.*, 82, pp. 225–231.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11991070/>

Manrique Losada, L., Laguna Castillo, E., Osorio Restrepo, E. Serna Galvis, E. y Torres Palma, R. (2017). Tratamiento de aguas contaminadas con colorantes mediante fotocatalisis con TiO₂ usando luz artificial y solar. *Producción + Limpia*. 12, No.2 pp. 50-60. DOI: 10.22507/pml.v12n1a4 1

<http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1542>

Marin J.M., Montoya J., Monsalve, E., y Granda, C.F., (2007). Degradation de naranja de metilo en un nuevo fotorreactor solar de placa plana con superficie corrugada. *Revista.utp.edu.co*. Vol. 1, N°. 34.

<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5667>

Marin S. J.M., (2002). Fotodegradacion sensibilizada con TiO₂ y F⁺3 de los pesticidas Malation y metomil en aguas. *Trabajo de grado de Maestria en Ingenieria Ambiental. Universidad de Antioquia*. Facultad de Ingenieria.

http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvllac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000085898

Marcelino, R. B., Queiroz, M. T., Amorim, C. C., Leão, M. M., & Brites-Nóbrega, F. F. (2014). Solar energy for wastewater treatment: review of international technologies and their applicability in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 762–773.

Mills, A., & Le Hunte, S. (1997). An overview of semiconductor photocatalysis. *Elsevier. Journal of photochemistry and photobiology A*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603097001184>

- Morales-Guzman, F. y Melgoza-Aleman, R.M. (2009). Tratamiento del colorante Azo rojo directo 23 mediante reactores discontinuos secuenciados anaerobios/aerobios. *Quimica y Aplicaciones*. Vol. 20 N°1, pp. 73-82. Doi: 10.1612/inf.tecnol.4005it.08.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642009000100009
- Morales, M.G., Pajares, A.M, Massad, W.A. (2018). Degradación de colorantes por técnicas fotoquímicas. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet). Centro de Investigación y Transferencia de Santa Cruz. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Santa Cruz-Argentina. Ri.conicet.gov.ar.*
<http://hdl.handle.net/11336/84197>
- Moeller, G.E., y Garzon, M. A. (2003). Desarrollo de tecnologías no convencionales para el tratamiento de efluentes de la fabricación de colorantes del tipo Azo. *Anuario Imta (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/99188/D-CD102578.pdf>
- Patil, N.N., y Shukla, S.R. (2015). Degradation of Reactive Yellow 145 dye by persulfate using microwave and conventional heating. *Journal of Water Process Engineering. Elsevier*
<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-9d8392b4-d57c-34ce-981d-99c712ac9303>
- Pearce, C., Lloyd, J., Guthrie, J. (2003). The Removal of Colour From Textile Wastewater Using Whole Bacterial Cells. *Dyes and Pigments* 58: pp. 179-196.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143720803000640>
- Pérez Estrada, L.A., Sánchez, M., Leal, M.T. y Bandala, E.R. (2002). Degradación de desechos de laboratorio mediante fotocatalisis solar. XXVIII Congreso Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, del 27 al 31 de octubre, FEMISCA, pp. 1 – 6.
https://www.psa.es/en/areas/tsa/docs/Tesis_Leonidas%20Perez.pdf

Pey Clemente J. (2008). Aplicacion de procesos de oxidacion avanzada (fotocatalisis solar) para el tratamiento y reutilizacion de efluentes textiles. *Chemosphere*, **40**, pp. 369-373.

<https://riunet.upv.es/handle/10251/2241>

Prieto-Rodríguez. L, Miralles-Cueva, C., Oller, I., Fernandez-Ibañez, P., Aguera, A., Blanco, J., Malato, S; (2012). Optimization of mild solar TiO₂ photocatalysis as a tertiary treatment for municipal wastewater treatment plant effluents.

Ramsay, J. y Nguyen, T. (2002). Decoloration of textile dyes by *Trametes versicolor* and its effect on dye toxicity. *Biotechnol. Lett.*, **24**, pp. 1757–1761.

<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020644817514>

Ranganathan, K., Jeyapaul, S., y Sharma, D. (2007). Assessment of water pollution in different bleaching based paper manufacturing and textile dyeing industries in India. *Environ. Monit. Assess.*, **134**, pp. 363–372.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17294270/>

REMTAVARES (Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables). (2011). *Tratamiento de agua mediante energías renovables*. Universidad de Alcalá.

<http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/01/10/131545>

Ramesh, M., Saravanan, M., y Pradeepa, G. (2007). Studies on the physicochemical characteristics of the Singallunar lake, Coimbatore, South India. *In Proceeding National Seminar on Limnol. Maharana Pratap University of Agric. Technology, Udaipur, India*. Rao KDS, Ramakrishniah M, Karthikeyan M, Suk.

https://www.researchgate.net/publication/313623636_Seasonal_Variations_in_Physicochemical_Characteristics_of_Water_Samples_of_Surajpur_Wetland_National_Capital_Region_India

Rodríguez et. al. (2002). Tratamiento de agua residual proveniente de la industria textil mediante fotocatalisis solar, *XXVIII Congreso Interamericano de Ing. Sanitaria y Ambiental*, Cancún, México.

<https://www.academia.edu/16138635>

Rodríguez, R. (2008). Eliminación foto catalítica de H₂S en el aire mediante TiO₂ soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A. Santiago de Compostela: *E.T.S Enxeñaria*.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=107804>

Sánchez, B., Cardona, A.I., y Peral, J. (2004). Purificación de gases por fotocatalisis heterogénea: *estado de arte*. Researchgate.net

<https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/07cap02.pdf>

Serrano, D. (2013). Foto degradación de Aguas de Proceso de la Industria Textil. España: *Proyecto de fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid*.

<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/17031>

Souza, R. P., Freitas, T. K., Domingues, F. S., Pezoti, O., Ambrosio, E., Ferrari-Lima, A. M., & Garcia, J. C. (2016). Photocatalytic activity of TiO₂, ZnO and Nb₂O₅ applied to degradation of textile wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 329, 9–17.

Tejada Velásquez Yelena (2022). Degradación de colorantes utilizando radiación solar y visible mediante fotocatalizadores de Sr₂CeO₄:xNi. Tesis de maestría en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía. Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo. Universidad Autónoma de Coahuila. México.

<https://repositorio.cinvestav.mx>SSIT0016884>

Tomasini, A.C., y Moeller, G.E. (2010). Tratamiento Biológico con Biomasa suspendida anaerobio/aerobio de un agua real textilera con colorante Azo. *Revista AIDS*, III (1), pp. 1-10.

<https://biblat.unam.mx/fr/revista/revista-aidis-de-ingenieria-y-ciencias-ambientales/articulo/tratamiento-biologico-con-biomasa-suspendida-anaerobioaerobio-de-una-agua-real-textilera-con-colorante-azo>

Toribio Salado Mayra Consuelo (2021). Remoción del color de las aguas residuales del teñido de jeans usados con fotocatalisis heterogénea. Tesis de maestría, UNCP, Junín-Huancayo.

https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7242/T010_42984770_M.pdf?sequence=1

US/EPA Handbook of Advanced Photochemical Oxidation Processes, EPA/625/R-98/004 (2012). U.S. Environmental Protection Agency. Pp 1-100. ISBN-10-124924899X.

<https://sswm.info/node/3264>

Walters, A., Santillo, A.M., y Johnston, P. (2005). Toxicity of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid to plants and aquatic invertebrates. *MHLi-Environmental Toxicology: An International Journal*. 11, pp. 714-719.

<https://europepmc.org/article/MED/18461560>

Weisburger, J.H. (2002). Comments on the history and importance of aromatic and heterocyclic amines in public health. *Mutat. Res.*, 506–507, pp. 9-20.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0027510702001471>

Weston, (1999). Una invitación a la filosofía medioambiental, *Oxford University Press*, New York, New York. (en inglés)

https://es.wikipedia.org/wiki/Filosof%C3%ADa_medioambiental

Xianghua Kong, Xiaoming Sun, Xiaolin Li, Yadong Li. (2003). Catalytic growth of ZnO nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*. 82, p. 997.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058403004164>

Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2018). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*.

<https://core.ac.uk/download/pdf/199215554.pdf>

IX. ANEXOS

ANEXO 1: Materiales de laboratorio, reactivos colorantes, instrumentos y equipos utilizados en el experimento

ANEXO 2: Colorantes utilizados en el estudio experimental

ANEXO 3: Parámetros cinéticos de la reacción foto catalítica

ANEXO 4: Reporte de análisis de absorbancia de colorantes en el espectrofotómetro UV/Varian/Cary usando 100 mg/100 ml de catalizador.

ANEXO 5: Reporte de análisis de absorbancia de colorantes en el espectrofotómetro UV/Varian/Cary sin usar catalizador.

ANEXO 6: Reporte de análisis de absorbancia de colorantes en el espectrofotómetro UV/Varian/Cary usando 100, 200, 300 y 400 mg de catalizador /100 ml de solución de 50 ppm de colorante.

ANEXO 7: ANOVA para la degradación de colorantes

ANEXO 8: Potenciales de oxidación de diferentes especies

ANEXO 9: Información técnica del colorante azul corazol R.D.

ANEXO 10: Informe técnico de Laboratorio de Materiales PUCP

ANEXO 11: Matriz de consistencia

ANEXO 1: Materiales de laboratorio, reactivos colorantes, instrumentos y equipos utilizados en el experimento.

A: Fotografías de materiales



a) Piceta



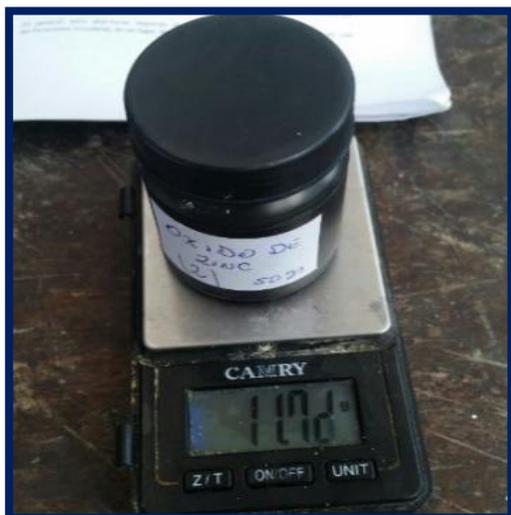
b) termómetro



c) vaso precipitado



d) Fiolas de 100 ml, matraces erlenmeyer de 250 ml, y tubos de ensayo con gradilla

B: Fotografías de reactivos y colorantes utilizados

a) Catalizador óxido de zinc



b) Colorante rojo escarlata



c) Colorante azul corazol RD



d) Colorante amarillo synozol S-22

C: Fotografías de instrumentos y equipos utilizados.

a) Balanza analítica



b) Reactor batch con agitador magnético



c) Centrifugadora



d) Tamizado de malla 400 y 500



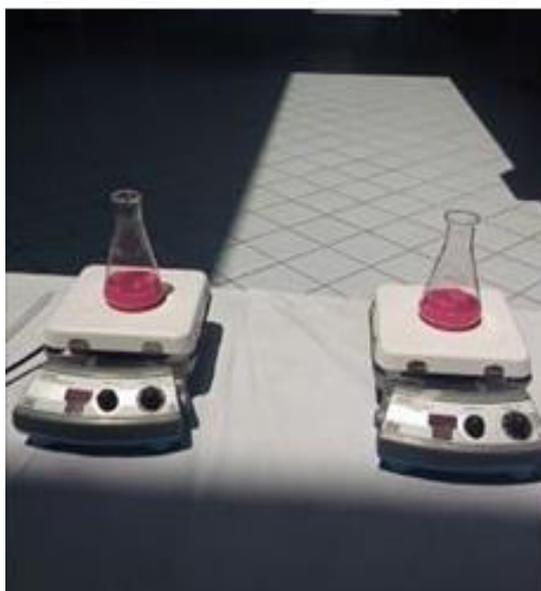
e) Tamizado del óxido de zinc en balanza



f) Espectrofotómetro UV/Varian

ANEXO 2: Colorantes utilizados en el estudio experimental**A: Fotografías del colorante directo rojo escarlata**

a) Concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm



b) Colorante expuesto a luz solar



c) degradación de color en 20 minutos

B: Fotografías del colorante reactivo Azul Corazol RD

a) Concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm



b) Degradación de color en el tiempo

C: Fotografías de colorante reactivo amarillo synozol S-22

a) Concentraciones de 20, 30, 40 y 50 ppm

ANEXO 3: Parámetros cinéticos de la reacción fotocatalítica**a) Rojo escarlata a 20, 30, 40 y 50 ppm**

Integrando la ecuación de Langmuir-Hinshelwood resulta,

$$\ln\left(\frac{C_o}{C}\right) = kKt + K(C - C_o) \quad (1)$$

Realizando correlación lineal de los datos se obtienen:

$$\text{Para 20 ppm: } y = 0.1177X + 0.4718 \quad R^2 = 0.8541 \quad (2)$$

$$30 \text{ ppm: } y = 0.1171X - 0.0059 \quad R^2 = 0.9367 \quad (3)$$

$$40 \text{ ppm: } y = 0.1134X - 0.1110 \quad R^2 = 0.9760 \quad (4)$$

$$50 \text{ ppm: } y = 0.0582X + 0.1079 \quad R^2 = 0.9539 \quad (5)$$

Para $KC \ll 1$ la reacción es de primer orden.

Orden de reacción: 1

El coeficiente de correlación mayor resulta a 40 ppm. Luego,

Constante cinética $k = 0.134/2.78 \times 10^{-3} = 40.86 \text{ min}^{-1}$

Constante de equilibrio de adsorción K :

$$K = (0.1110/40) = 2.78 \times 10^{-3}$$

Constante aparente de velocidad kK :

$$kK = 0.1134 \text{ min}^{-1}$$

$t_{1/2}$ Promedio: $\ln(2) / 0.1134 + 0.0059 = 6.22$ minutos

b) Azul corazol RD a 20, 30, 40 y 50 ppm

Realizando correlación lineal de los datos se obtienen:

$$\text{Para 20 ppm: } y = 0.0272X - 0.0024 \quad R^2 = 0.9995$$

$$30 \text{ ppm: } y = 0.0254X - 0.0191 \quad R^2 = 0.994$$

$$40 \text{ ppm: } y = 0.0077X + 0.0014 \quad R^2 = 0.9945$$

$$50 \text{ ppm: } y = 0.0049X - 0.002 \quad R^2 = 0.9979$$

Para $KC \ll 1$ la reacción es de primer orden.

Orden de reacción: 1

El coeficiente de correlación mayor resulta a 20 ppm. Luego,

Constante cinética $k = 0.0272/1.2 \times 10^{-4} = 226.67 \text{ min}^{-1}$

Constante de equilibrio de adsorción K :

$$K = (0.0024/20) = 1.2 \times 10^{-4}$$

Constante aparente de velocidad kK :

$$kK = 0.0272 \text{ min}^{-1}$$

$$t_{1/2} \text{ promedio: } \ln(2)/0.0272 + 0.0024 = 25.5 \text{ minutos}$$

c) Amarillo Synozol a 20, 30, 40 y 50 ppm

Realizando correlación lineal de los datos se obtienen:

$$\text{Para 20 ppm: } y = 0.0334X + 0.0378 \quad R^2 = 0.982$$

$$30 \text{ ppm: } y = 0.0329X - 0.0034 \quad R^2 = 0.9954$$

$$40 \text{ ppm: } y = 0.0267X - 0.0167 \quad R^2 = 0.9921$$

$$50 \text{ ppm: } y = 0.0235X - 0.0021 \quad R^2 = 0.9834$$

Para $KC \ll 1$ la reacción es de primer orden.

Orden de reacción: 1

El coeficiente de correlación resulta a 30 ppm. Luego,

$$\text{Constante cinética } k = 0.0329/1.1 \times 10^{-4} = 299,1 \text{ min}^{-1}$$

Constante de equilibrio de adsorción K :

$$K = (0.0034/30) = 1.1 \times 10^{-4}$$

Constante aparente de velocidad kK :

$$kK = 0.0329 \text{ min}^{-1}$$

$$t_{1/2} \text{ promedio: } \ln(2)/0.0329 + 0.0034 = 21.07 \text{ minutos}$$

ANEXO 4: Reporte de Análisis de absorbancia de colorantes en el espectrofotómetro UV/Varian/Cary usando 100mg/100 ml de catalizador

a) Rojo escarlata

Informe Análisis Concentración de colorante rojo escarlata

Hora Informe 12/05/2016 04:46:50
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Rojo Escarlata-0min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador **Rojo Escarlata-0 min**

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1358)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 12/05/2016 04:47:10

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,2842 0,2851 0,2847
	20,0		0,2847	0,0004	7,24	
Patrón3						0,4335 0,4337 0,4325
	30,0		0,4332	0,0005	0,65	
Patrón4						0,5815 0,5820 0,5817
	40,0		0,5817	0,0003	2,17	
Patrón5						0,7308 0,7298 0,7301
	50,0		0,7302	0,0007	0,30	

Ecuación Calib. Abs =0,0149*Conc -0,012297
 Coef. Correlación 0,99999
 Hora Calibración 12/05/2016 04:51:48

Informe Análisis Concentración de colorante rojo escarlata

Hora Informe 12/05/2016 05:01:25
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Rojo Escarlata-5min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador **Rojo Escarlata-5 min**

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1358)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 12/05/2016 05:01:28

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,0589 0,0583 0,0580
	20,0		0,0584	0,0005	7,24	
Patrón3						0,2176 0,2169 0,2165
	30,0		0,2170	0,0006	0,65	
Patrón4						0,3771 0,3764 0,3768
	40,0		0,3768	0,0004	2,17	
Patrón5						0,4505 0,4497 0,4502
	50,0		0,4501	0,0004	0,30	

Ecuación Calib. Abs =0,0133*Conc -0,19160
 Coef. Correlación 0,97601
 Hora Calibración 12/05/2016 05:01:30

Informe Análisis Concentración de colorante rojo escarlata

Hora Informe 12/05/2016 05:04:25
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Rojo Escarlata-10min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador **Rojo Escarlata-10 min**

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1358)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 12/05/2016 05:04:26

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
--------	-----------------------	---	-------	----	------	----------

Patrón2						0,0289 0,0280 0,0283
	20,0		0,0284	0,0005	7,24	
Patrón3						0,1186 0,1183 0,1180
	30,0		0,1183	0,0003	0,65	
Patrón4						0,2219 0,2216 0,2211
	40,0		0,2215	0,0003	2,17	
Patrón5						0,3374 0,3380 0,3381
	50,0		0,3378	0,0004	0,30	

Ecuación Calib. Abs =0,0103*Conc -0,18440
 Coef. Correlación 0,99650
 Hora Calibración 12/05/2016 05:04:28

Informe Análisis Concentración de colorante rojo escarlata

Hora Informe 12/05/2016 05:10:01
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Rojo Escarlata-15min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador **Rojo Escarlata-15 min**

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1358)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 12/05/2016 05:10:02

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,0165 0,0171 0,0169
	20,0		0,0168	0,0003	7,24	
Patrón3						0,1033 0,1027 0,1031
	30,0		0,1030	0,0003	0,65	
Patrón4						0,1306 0,1302 0,1299
	40,0		0,1302	0,0004	2,17	
Patrón5						0,2432 0,2439 0,2431
	50,0		0,2434	0,0005	0,30	

Ecuación Calib. Abs =0,0071*Conc -0,12410
 Coef. Correlación 0,95300
 Hora Calibración 12/05/2016 05:10:04

Informe Análisis Concentración de colorante rojo escarlata

Hora Informe 12/05/2016 05:14:50
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Rojo Escarlata-20min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador **Rojo Escarlata-20 min**

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1358)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 12/05/2016 05:14:52

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,0121 0,0118 0,0125
	20,0		0,0121	0,0004	7,24	
Patrón3						0,0218 0,0210 0,0212
	30,0		0,0213	0,0005	0,65	
Patrón4						0,0456 0,0449 0,0453
	40,0		0,0453	0,0004	2,17	
Patrón5						0,2210 0,2202 0,2205
	50,0		0,2206	0,0004	0,30	

Ecuación Calib. Abs =0,0065*Conc -0,15250
 Coef. Correlación 0,72930
 Hora Calibración 12/05/2016 05:14:54

b) Azul Corazol RD

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 12:13:17
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Azul-Corazol-0min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador Azul-Corazol-0min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Intrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1520)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 12:14:20

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2	20,0		0,5835	0,0007	0,10	0,5826 0,5830 0,5849
Patrón3	30,0		0,8063	0,0024	0,15	0,8060 0,8027 0,8102
Patrón4	40,0		1,2022	0,0015	0,13	1,2022 1,2028 1,2016
Patrón5	50,0		1,4953	0,0035	0,22	1,4960 1,4954 1,4945

Ecuación Calib. Abs =0,03131*Conc -0,07413
 Coef. Correlación 0,998982
 Hora Calibración 09/05/2018 12:16:14

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 12:28:02
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\ Azul-Corazol-5min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador Azul-Corazol-5min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Intrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1355)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 12:30:12

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2	20,0		0,5056	0,0008	0,26	0,5050 0,5056 0,5056
Patrón3	30,0		0,7665	0,0007	0,21	0,7660 0,7662 0,7673
Patrón4	40,0		1,1965	0,0005	0,04	1,1964 1,1964 1,1968
Patrón5	50,0		1,4526	0,0029	0,19	1,4526 1,4520 1,4531

Ecuación Calib. Abs =0,03271*Conc -0,16455
 Coef. Correlación 0,98911
 Hora Calibración 10/05/2018 12:32:10

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 12:36:08
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\ Azul-Corazol-10min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador Azul-Corazol-10min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1058)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 12:36:50

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,4322 0,4320 0,4327
	20,0		0,4323	0,0013	0,15	0,4327
Patrón3						0,7659 0,7650 0,7668
	30,0		0,7659	0,0007	0,08	0,7668
Patrón4						1,2561 1,2561 1,2568
	40,0		1,2563	0,0006	0,05	1,2568
Patrón5						1,3828 1,3823 1,3818
	50,0		1,3823	0,0016	0,12	1,3818

Ecuación Calib. Abs =0,033404*Conc -0,20994
 Coef. Correlación 0,95817
 Hora Calibración 10/05/2018 12:37:18

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 12:49:59
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Azul-Corazol-15min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador Azul-Corazol-15min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1505)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 12:50:12

Patrón	Concentración F mg/L	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2	20,0	0,4006	0,0000	0,01	0,4003 0,4005 0,4010
Patrón3	30,0	0,5436	0,0010	0,18	0,5438 0,5437 0,5433
Patrón4	40,0	1,1063	0,0016	0,13	1,1063 1,1062 1,1064
Patrón5	50,0	1,2942	0,0021	0,15	1,2940 1,2946 1,2940

Ecuación Calib. Abs =0,03243*Conc -0,29905
 Coef. Correlación 0,94254
 Hora Calibración 10/05/2018 12:50:48

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 13:09:56
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Azul-Corazol-20min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador Azul-Corazol-20min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1310)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 13:10:04

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,2760 0,2762 20,0 0,2761 0,0004 0,16 0,2761
Patrón3						0,4225 0,4220 30,0 0,4220 0,0011 0,27 0,4215
Patrón4						0,9986 0,9990 40,0 0,9986 0,0016 0,13 0,9982
Patrón5						1,2577 1,2577 50,0 1,2578 0,0029 0,22 1,2580

Ecuación Calib. Abs =0,035217*Conc -0,49397
 Coef. Correlación 0,95211
 Hora Calibración 10/05/2018 13:10:33

c) Amarillo Synozol S-22

Informe Análisis Concentración de colorante Amarillo Synozol

Hora Informe 21/11/2018 13:55:01
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\amarillo con catalizador a 20 ppm.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1582)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 13:55:26

Patrón	tiempo (min)	F	Lecturas
Patrón1	0,0	0,8879	
Patrón2	5,0	0,7513	
Patrón3	10,0	0,6849	
Patrón4	15,0	0,6081	
Patrón5	20,0	0,5746	

Ecuación Calib. Abs = -0,0154*tiempo + 0,85531
 Coef. Correlación 0,95082
 Hora Calibración 21/11/2018 13:55:28

Informe Análisis Concentración de colorante Amarillo Synozol

Hora Informe 21/11/2018 14:07:07
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\30 ppm amarillo con catalizador.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1470)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 14:07:33

Patrón	Concentración mg/L	F	Lecturas
Patrón1	0,0		1,2032
Patrón2	5,0		1,1123
Patrón3	10,0		0,9887
Patrón4	15,0		0.9121
Patrón5	20,0		0.8056

Ecuación Calib. Abs = -0.0199*tiempo +1.20351
 Coef. Correlación 0,99632
 Hora Calibración 21/11/2018 14:07:35

Informe Análisis Concentración de colorante Amarillo Synozol

Hora Informe 21/11/2018 15:04:27
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\40 ppm
amarillo con catalizador.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador Amarillo-Synozol-10min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1403)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 15:04:58

Patrón	Concentración mg/L	F	Lecturas
Patrón1	0,0		1,4786
Patrón2	5,0		1,2922
Patrón3	10,0		1,1571
Patrón4	15,0		0.9824
Patrón5	20,0		0.8912

Ecuación Calib. Abs = -0,0297*tiempo +1,45721
 Coef. Correlación 0,98932
 Hora Calibración 21/11/2018 15:05:00

Informe Análisis Concentración de colorante Amarillo Synozol

Hora Informe 21/11/2018 15:18:51
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\50ppm amarillo con catalizador.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1460)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 15:19:46

Patrón	tiempo (min)	F	Lecturas
Patrón1	0,0		1,7977
Patrón2	5,0		1,6214
Patrón3	10,0		1.4655
Patrón4	15,0		1,3838
Patrón5	20,0		1.1939

Ecuación Calib. Abs = -0,0289*tiempo +1.78152
 Coef. Correlación 0,98771
 Hora Calibración 21/11/2018 15:19:48

ANEXO 5: Reporte de Análisis de absorbancia de colorantes en el espectrofotómetro UV/Varian/Cary sin usar catalizador

a) Rojo escarlata:

Concentration [Operador:iveet1][C:\...\ivvet4.BCN]- Online[Calibrado]

Fichero Editar Ver Comandos Preparar... Gráfico Ayuda

0.9842 Abs **VARIAN**  **Iniciar**

Preparar... 

Cero

Releer

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 12/05/2016 04:46:50 p.m.
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Laboratorio1\Escritorio\ivvet4.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador iveet1

Condiciones del Instrumento
 Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3.00
 Long. Onda (nm) 518.0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0.1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0.95000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0.1370)	518.0

Calibración
 Tiempo Colección 12/05/2016 04:47:10 p.m.

Patrón	Concentración mg/L	F	Lecturas
Patrón1	20.0		0.2784
Patrón2	30.0		0.5879
Patrón3	40.0		0.6609
Patrón4	50.0		0.9428

Ecuación Calib. Abs = 0.02066*Conc - 0.10563
 Coef. Correlación 0.95478
 Hora Calibración 12/05/2016 04:51:48 p.m.

Análisis
 Tiempo Colección 12/05/2016 04:51:48 p.m.

Muestra	Concentración mg/L	F	Lecturas
Muestral	18.9		0.2852
Muestra2	34.6		0.6090
Muestra3	37.2		0.6627
Muestra4	51.6		0.9602
Muestra5	19.1		0.2892

Borrar informe

Recalcular

Imprimir...

Secuencia lectura completada

b) Azul corazol RD**Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD**

Hora Informe 10/05/2018 13:14:17
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Azul-Corazol-
 Omin.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador Azul-Corazol-**Omin**

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
cero	(0,1520)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 13:15:20

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
--------	-----------------------	---	-------	----	------	----------

Patrón2						0,5826 0,5830 20,0 0,5835 0,0007 0,10 0,5849
Patrón3						0,8060 0,8027 30,0 0,8063 0,0024 0,15 0,8102
Patrón4						1,2022 1,2028 40,0 1,2022 0,0015 0,13 1,2016
Patrón5						1,4960 1,4954 50,0 1,4953 0,0035 0,22 1,4945

Ecuación Calib. Abs =0,03131*Conc -0,07413
 Coef. Correlación 0,998982
 Hora Calibración 09/05/2018 13:16:14

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 13:38:02
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\ Azul-Corazol-5min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador Azul-Corazol-5min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Intrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1355)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 13:40:12

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,5721 0,5727 0,5714
	20,0		0,5720	0,0007	0,26	
Patrón3						0,8032 0,8025 0,8029
	30,0		0,8028	0,0004	0,21	
Patrón4						1,1861 1,1852 1,1848
	40,0		1,1853	0,0008	0,04	
Patrón5						1,4404 1,4405 1,4401
	50,0		1,4403	0,0029	0,19	

Ecuación Calib. Abs =0,0299*Conc -0,04552
 Coef. Correlación 0,99103
 Hora Calibración 10/05/2018 13:42:10

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 13:46:08
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\ Azul-Corazol-10min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador Azul-Corazol-10min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Intrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1058)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 13:46:50

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,5688 0,5679 0,5678
	20,0		0,5682	0,0006	0,15	
Patrón3						0,8023 0,8029 0,8031
	30,0		0,8027	0,0004	0,08	
Patrón4						1,1788 1,1795 1,1798
	40,0		1,1794	0,0004	0,05	
Patrón5						1,4311 1,4319 1,4310
	50,0		1,4313	0,0016	0,12	

Ecuación Calib. Abs =0,0297*Conc -0,04272
 Coef. Correlación 0,99181
 Hora Calibración 10/05/2018 13:47:18

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 13:59:59
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Azul-Corazol-15min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador Azul-Corazol-15min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1505)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 14:01:12

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2						0,5681 0,5675 0,5677
	20,0		0,5678	0,0003	0,01	
Patrón3						0,8031 0,8024 0,8024
	30,0		0,8026	0,0005	0,18	
Patrón4						1,1742 1,1748 1,1742
	40,0		1,1744	0,0004	0,13	
Patrón5						1,4288 1,4293 1,4273
	50,0		1,4285	0,0012	0,15	

Ecuación Calib. Abs =0,0295*Conc -0,04056
 Coef. Correlación 0,99245
 Hora Calibración 10/05/2018 14:05:49

Informe Análisis Concentración de colorante Azul Corazol RD

Hora Informe 10/05/2018 14:19:56
 Método
 Nombre de Lote C:\Varian\Cary Winuv\Azul-Corazol-20min.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador Azul-Corazol-20min

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 504,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 3
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,00000
 Unidades Concentración mg/L
 Cambiador Celdas Encen.

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1310)	504,0

Calibración

Tiempo Colección 10/05/2018 14:20:04

Patrón	Concentración mg/L	F	Media	SD	%RSD	Lecturas
Patrón2	20,0	0,5666	0,0009	0,16	0,5660	0,5664 0,5675 0,5660
Patrón3	30,0	0,8022	0,0008	0,27	0,8015	0,8022 0,8030 0,8015
Patrón4	40,0	1,1627	0,0004	0,13	1,1624	1,1631 1,1627 1,1624
Patrón5	50,0	1,4257	0,0015	0,22	1,4254	1,4272 1,4245 1,4254

Ecuación Calib. Abs =0,0294*Conc -0,03891
 Coef. Correlación 0,99392
 Hora Calibración 10/05/2018 14:20:33

c) Amarillo Synozol S-22

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 21/11/2018 12:09:14
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\20 ppm amarillo.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1416)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 12:09:37

Patrón	tiempo (min)	F Lecturas
Patrón1	0,0	0,8860
Patrón2	5,0	0,8595
Patrón3	10,0	0,8465
Patrón4	15,0	0,8289
Patrón5	20,0	0,7976

Ecuación Calib. Abs = -0,0012*t + 0,2246
 Coef. Correlación 0,9597
 Hora Calibración 21/11/2018 12:09:53

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 21/11/2018 12:19:51
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\30 pp amarillo sin .BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Intrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1426)	402,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 12:20:13

Patrón	tiempo (min)	F	Lecturas
Patrón1	0,0	1,2335	
Patrón2	5,0	1,2249	
Patrón3	10,0	1,2221	
Patrón4	15,0	1,2175	
Patrón5	20,0	1,1855	

Ecuación Calib. Abs = -0,0007*t + 0,3336
 Coef. Correlación 0,8825
 Hora Calibración 21/11/2018 12:20:33

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 21/11/2018 12:31:13
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and
 Settings\Administrador\Escritorio\40 ppm
 amarillo.sin BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración 402

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1425)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 12:31:40

Patrón	tiempo F	Lecturas
	(min)	
Patrón1	0,0	1,5630
Patrón2	5,0	1,5480
Patrón3	10,0	1,5075
Patrón4	15,0	1,4980
Patrón5	20,0	1,4356

Ecuación Calib. Abs = -0,0017*t + 0,4282
 Coef. Correlación 0,948
 Hora Calibración 21/11/2018 12:21:56

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 21/11/2018 12:41:26
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\50 ppm
 Amarillo sin .BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 432,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1493)	432,0

Calibración

Tiempo Colección 21/11/2018 12:42:12

Patrón	tiempo (min)	F	Lecturas
Patrón1	0,0		1,9611
Patrón2	5,0		1,8918
Patrón3	10,0		1,8886
Patrón4	15,0		1,8487
Patrón5	20,0		1,8312

Ecuación Calib. Abs = -0,0036*t + 0,5493
 Coef. Correlación 0.9371
 Hora Calibración 21/11/2018 12:42:31

ANEXO 6: Reporte de Análisis de absorbancia del colorante rojo escarlata usando 100, 200, 300 y 400 mg/ml de fotocatalizador en solución de 50 ppm.

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 13/05/2016 13:50:10
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\50 ppm
 Rojo escarlata.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador 100 mg catalizador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1416)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 13/05/2016 13:55:37

Patrón	tiempo (min)	F	Lecturas
Patrón1	0,0	1,2723	
Patrón2	5,0	1,0285	
Patrón3	10,0	0,9018	
Patrón4	15,0	0,7396	
Patrón5	20,0	0,6125	

Ecuación Calib. Abs = -0,0322*t + 1,2326
 Coef. Correlación 0,9841
 Hora Calibración 13/05/2016 13:55:53

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 13/05/2016 14:01:11
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\50 ppm
 Rojo escarlata.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador 200 mg catalizador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1416)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 13/05/2016 14:02:37

Patrón	tiempo (min)	F	Lecturas
Patrón1	0,0	1,3148	
Patrón2	5,0	0,8599	
Patrón3	10,0	0,6851	
Patrón4	15,0	0,5088	
Patrón5	20,0	0,2827	

Ecuación Calib. Abs = -0,0483*t + 1,2133
 Coef. Correlación 0,9565
 Hora Calibración 13/05/2016 14:02:47

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 13/05/2016 14:05:21
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\50 ppm
 Rojo escarlata.BCN
 Aplicación Concentración 3.00 (339)
 Operador 300 mg catalizador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1416)	520,0

Calibración

Tiempo Colección 13/05/2016 14:05:38

Patrón	tiempo (min)	F Lecturas
Patrón1	0,0	1,2165
Patrón2	5,0	1,0112
Patrón3	10,0	0,8120
Patrón4	15,0	0,7054
Patrón5	20,0	0,5046

Ecuación Calib. Abs = -0,0346*t + 1,1959
 Coef. Correlación 0,9907
 Hora Calibración 13/05/2016 14:05:50

Informe Análisis Concentración

Hora Informe 13/05/2016 14:10:31
 Método
 Nombre de Lote C:\Documents and Settings\Administrador\Escritorio\50 ppm
 Rojo escarlata.BCN
 Aplicación Concentración 3.00(339)
 Operador 400 mg catalizador

Condiciones del Instrumento

Instrumento Cary 50
 N° Versión Instrumento. 3,00
 Long. Onda (nm) 520,0
 Modo Ordenadas Abs
 T. Med. (sec) 0,1000
 Replicados 1
 Media Patrón/Muestra Apag.
 Correcciones de peso y volumen Apag.
 Tipo Ajuste Lineal
 Mín R² 0,95000
 Unidades Concentración mg/L

Comentarios:

Informe Cero

Leer	Abs	nm
Cero	(0,1416)	520,0

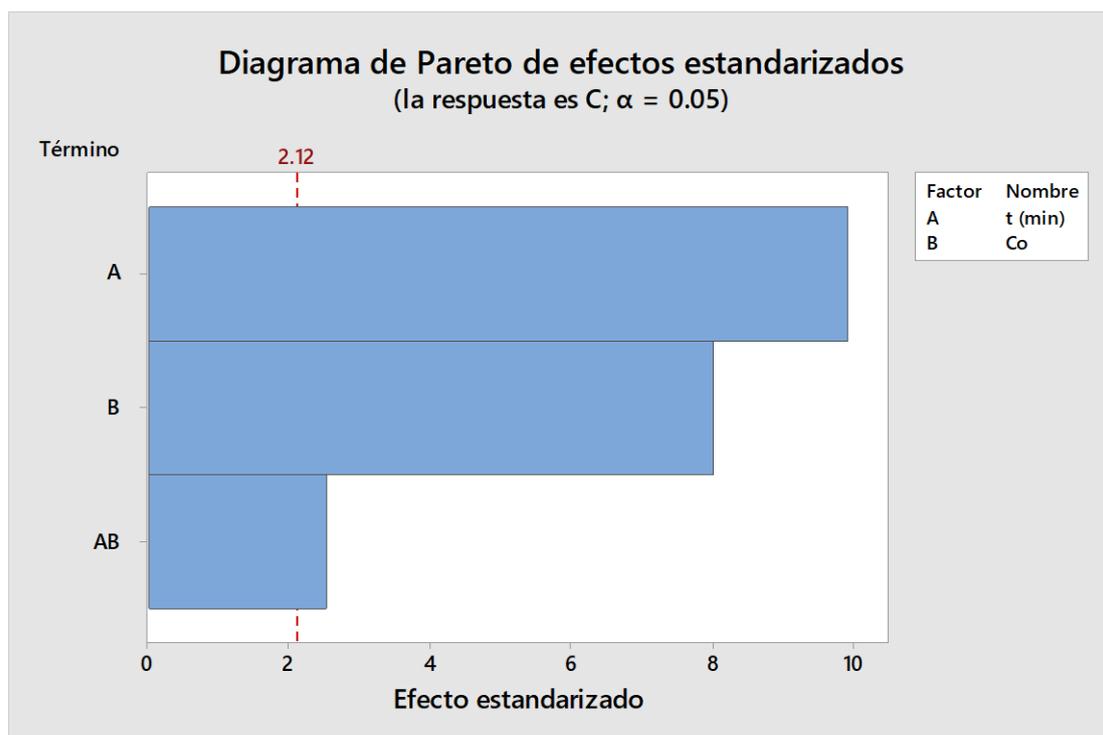
Calibración

Tiempo Colección 13/05/2016 14:10:38

Patrón	tiempo (min)	F Lecturas
Patrón1	0,0	1,2288
Patrón2	5,0	0,7765
Patrón3	10,0	0,5662
Patrón4	15,0	0,4583
Patrón5	20,0	0,3742

Ecuación Calib. Abs = -0,0405*t + 1,0863
 Coef. Correlación 0,8819
 Hora Calibración 13/05/2016 14:10:48

ANEXO 7: ANOVA para Rojo Escarlata



Regresión factorial: C vs. t (min); Co

* NOTA * Este diseño incluye algunas corridas divergentes.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	3207.2	1069.06	56.07	0.000
Lineal	2	3087.2	1543.62	80.95	0.000
t (min)	1	1868.0	1867.97	97.96	0.000
Co	1	1219.3	1219.26	63.94	0.000
Interacciones de 2 términos	1	120.0	119.95	6.29	0.023
t (min)*Co	1	120.0	119.95	6.29	0.023
Error	16	305.1	19.07		
Total	19	3512.3			

Resumen del modelo

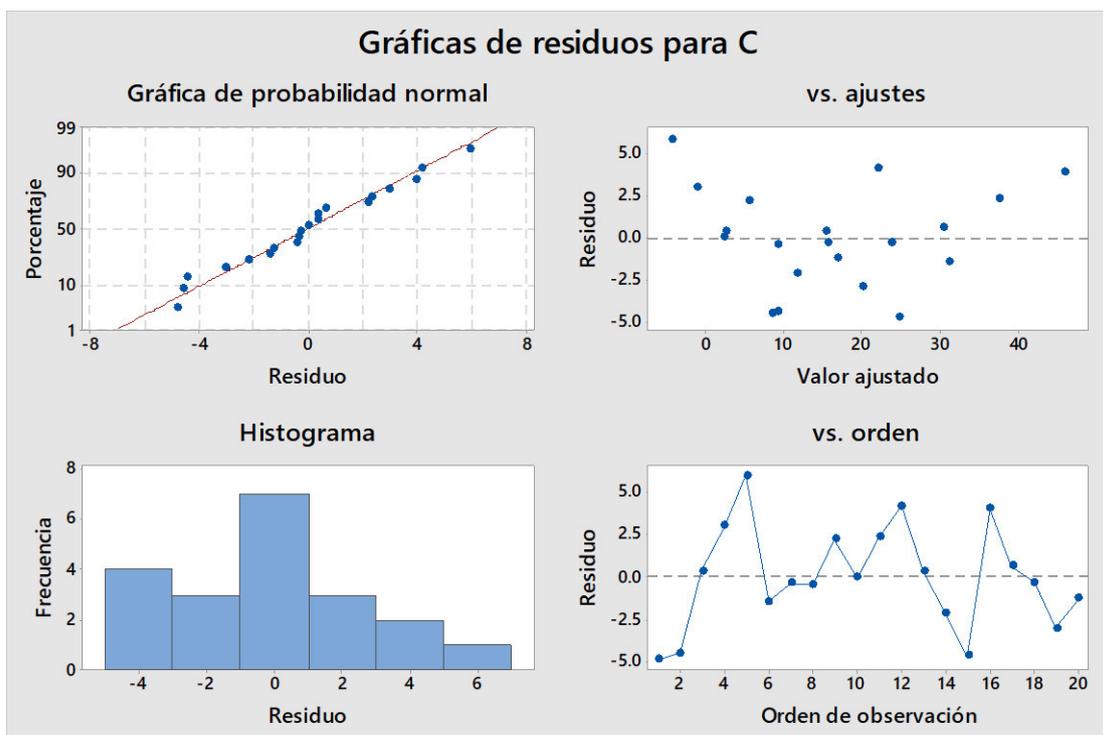
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.36667	91.31%	89.69%	82.40%

Coeficientes codificados

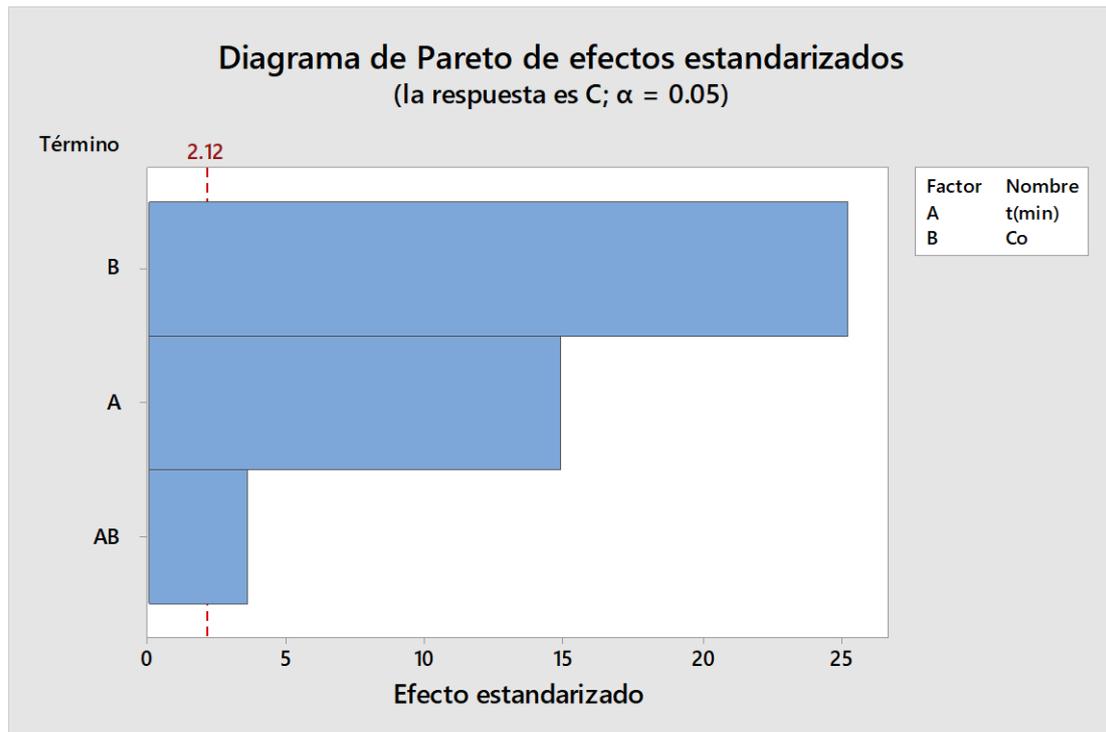
Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		16.380	0.976	16.78	0.000	
t (min)	-27.33	-13.67	1.38	-9.90	0.000	1.00
Co	20.95	10.48	1.31	8.00	0.000	1.00
t (min)*Co	-9.29	-4.65	1.85	-2.51	0.023	1.00

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$C = -5.24 - 0.283 t (\text{min}) + 1.008 Co - 0.0310 t (\text{min}) * Co$$



ANOVA para Azul Corazol RD



Regresión factorial: C vs. t(min); Co

* NOTA * Este diseño incluye algunas corridas divergentes.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	2245.21	748.40	289.00	0.000
Lineal	2	2212.68	1106.34	427.22	0.000
t(min)	1	570.27	570.27	220.21	0.000
Co	1	1642.41	1642.41	634.23	0.000
Interacciones de 2 términos	1	32.53	32.53	12.56	0.003
t(min)*Co	1	32.53	32.53	12.56	0.003
Error	16	41.43	2.59		
Total	19	2286.64			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.60923	98.19%	97.85%	97.41%

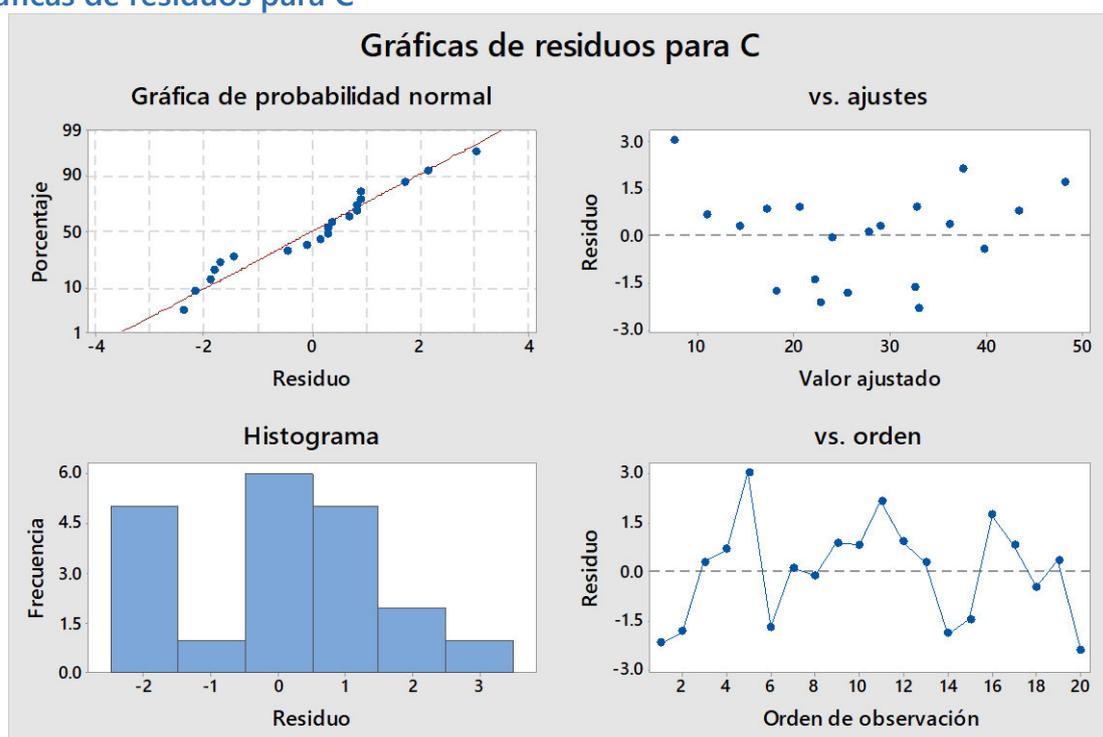
Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		27.165	0.360	75.49	0.000	
t(min)	-15.103	-7.552	0.509	-14.84	0.000	1.00
Co	24.316	12.158	0.483	25.18	0.000	1.00
t(min)*Co	-4.840	-2.420	0.683	-3.54	0.003	1.00

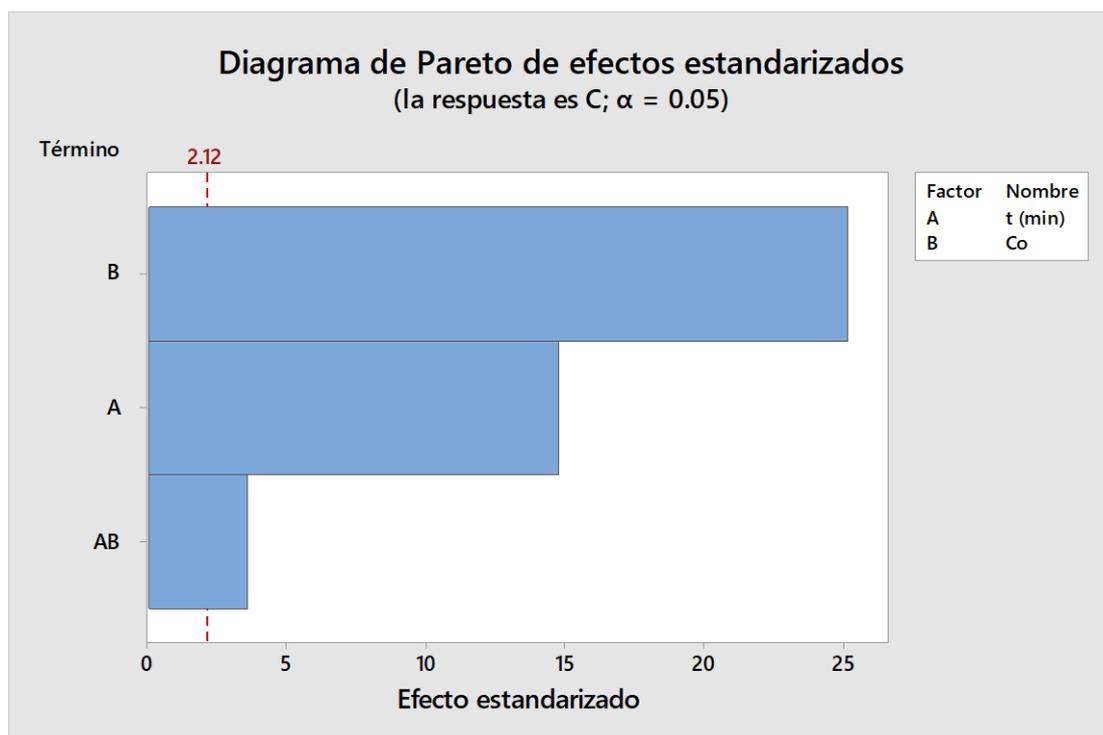
Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$C = 0.70 - 0.191 t(\text{min}) + 0.9719 Co - 0.01613 t(\text{min}) * Co$$

Gráficas de residuos para C



ANOVA para Amarillo Synozol S-22



Regresión factorial: C vs. t (min); Co

* NOTA * Este diseño incluye algunas corridas divergentes.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	2255.87	751.96	286.93	0.000
Lineal	2	2223.16	1111.58	424.15	0.000
t (min)	1	569.71	569.71	217.39	0.000
Co	1	1653.45	1653.45	630.91	0.000
Interacciones de 2 términos	1	32.71	32.71	12.48	0.003
t (min)*Co	1	32.71	32.71	12.48	0.003
Error	16	41.93	2.62		
Total	19	2297.80			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.61887	98.18%	97.83%	97.39%

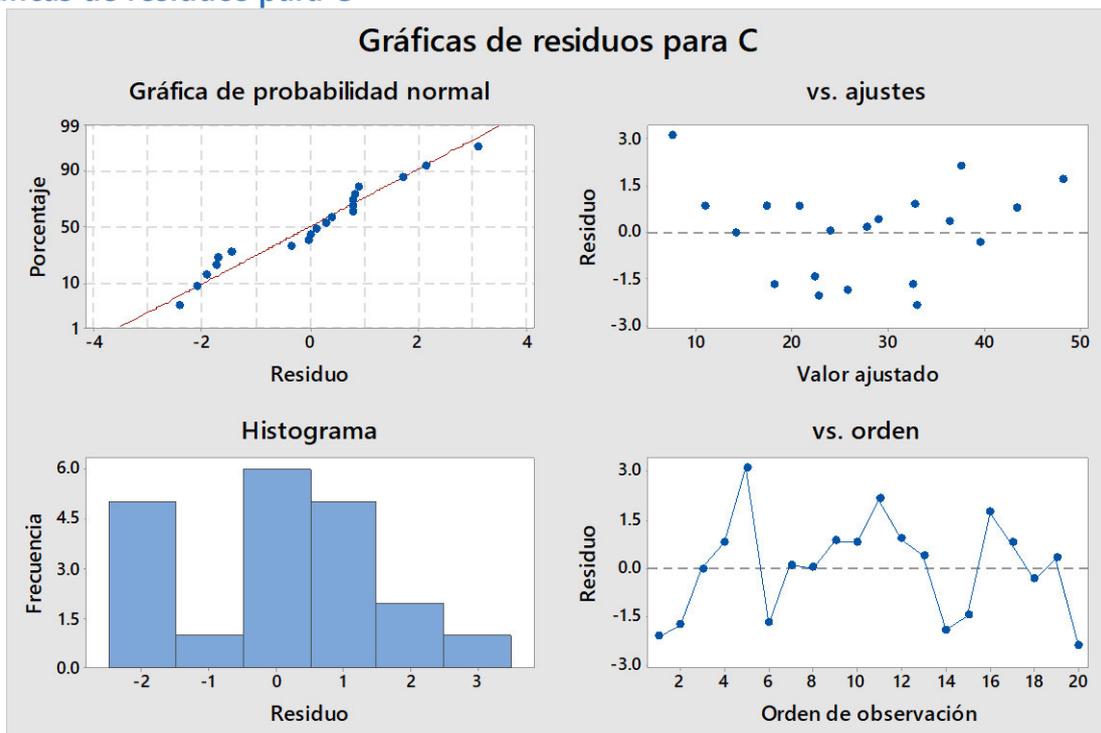
Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		27.143	0.362	74.98	0.000	
t (min)	-15.096	-7.548	0.512	-14.74	0.000	1.00
Co	24.398	12.199	0.486	25.12	0.000	1.00
t (min)*Co	-4.853	-2.426	0.687	-3.53	0.003	1.00

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$C = 0.56 - 0.189 t (\text{min}) + 0.9750 Co - 0.01618 t (\text{min}) * Co$$

Gráficas de residuos para C



ANEXO 8: Potenciales de oxidación de diferentes especies

Especie	Potencial de oxidación voltios (25 °C)
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,8
Oxígeno atómico	2,42
Peróxido de hidrogeno	1,78
Radical peróxido	1,70
Permanganato	1,68
Cloro dióxido	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,07
Iodo	0,54

Rodríguez M., 2003

ANEXO 9: Información técnica del colorante Azul Corazol RD



AZUL CORAZOL RD

Carácter	Colorante Reactivo de tintura continua
Estructura química	Granulado de un cromóforo de fenol / sódico
Aspecto	Sólido granulado fino, oscuro, azul intenso
Carácter ionógeno	Aniónico
Valor pH de una solución al 10 %	5,0 – 7,0
Peso específico a 20 °C	1,1
Estabilidades	<p>AZUL CORAZOL RD tiene buena compatibilidad con los auxiliares aniónicos y no iónicos. En caso de productos catiónicos y resinas sintéticas pueden ocurrir precipitaciones.</p> <p>AZUL CORAZOL RD tiene estabilidad a las concentraciones usuales de álcalis y ácidos.</p> <p>El producto tiene sensibilidad limitada a las heladas; modificaciones que aparecen a temperaturas bajas desaparecen al calentar y después de agitar bien.</p>

Los valores arriba indicados describen el producto. Las especificaciones obligatorias del producto son indicadas en la hoja de especificaciones de entrega. Otras informaciones con relación a las características del producto y los datos toxicológicos, ecológicos y relevantes a la seguridad se encuentran en la hoja de datos de seguridad.

Propiedades

AZUL CORAZOL RD otorga una gama de colores a fibras celulósicas, sintéticas y de poliéster para teñidos de proceso continuo. La viscosidad del baño y la mejor penetración del colorante gracias a la menor migración superficial permite obtener un aspecto de tejido más regular.

AZUL CORAZOL RD es más efectivo en un ámbito de pH entre 5,0 y 9,0.

AZUL CORAZOL RD penetra fácilmente en el tejido.

AZUL CORAZOL RD no produce espuma.

Técnica de aplicación

Instrucciones de dilución

AZUL CORAZOL RD es fácilmente diluible con agua fría y caliente bajo agitación.



Campos de aplicación

- Aplicación en proceso Pad-Dry-Pad-Steam, proceso Econtrol, proceso Pad-Dry y Pad-Dry-Jig sobre artículos de fibras celulósicas
- Aplicación en la tintura de mezclas de fibras celulósicas y de poliéster con colorantes reactivos y dispersos en proceso termosol con fijación posterior
- Aplicación en proceso termosol sobre fibras de poliéster

AZUL CORAZOL RD se aplica en fulard con un humectante aniónico como por ejemplo el COLORCONTIN SAN o el KOLLASOL IND junto con otros colorantes y, si se desea, con un dispersante y secuestrante (MEROPAN DPE). El valor pH del baño debe ser entre 5,5 y 6,5 (NEUTRACID BO 45).

Recomendación de aplicación

Las cantidades de aplicación dependen de la composición de la fibra y de la estructura del tejido. Cuanto más ligeras y abiertas sean las calidades de tejido, y más alto sea el porcentaje de las fibras sintéticas, más cantidad de AZUL CORAZOL RD se necesita.

Tejidos de algodón

0,1 – 25 g/l AZUL CORAZOL RD
en casos extremos hasta
40 g/l

Mezclas de fibras celulósicas y de poliéster

0,1 – 30 g/l AZUL CORAZOL RD

Fibras sintéticas

0,1 – 30 g/l AZUL CORAZOL RD

Preparación de los baños de foulardado

AZUL CORAZOL RD se diluye con 10 hasta 20 veces la cantidad de agua fría o tibia mediante agitación. Después se agrega los otros auxiliares en forma diluida.

ANEXO 10: Informe Técnico de Laboratorio de Materiales PUCP

LABORATORIO DE MATERIALES

Departamento de Ingeniería
Sección Ingeniería Mecánica



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

CON SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

MAT-FEB-0300/2016

INFORME TÉCNICO

Número Total de Páginas: 5

SOLICITADO POR : PABLO DIAZ BRAVO
REALIZADO POR : Dr. Francisco Rumiche
MUESTRA : Partículas de óxido de zinc
FECHA DE EMISIÓN : 2016.03.07.

1. ANTECEDENTES

Se suministró al Laboratorio de Materiales PUCP una muestra de partículas de óxido de zinc con la finalidad de realizar una evaluación mediante microscopía electrónica de barrido para establecer las dimensiones características y la distribución de tamaño.

2. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

Se obtuvo una muestra que fue disuelta y sometida a vibración por ultrasonido en alcohol por 15 minutos, con la finalidad de evitar la aglomeración de partículas. Luego de ello, se depositó una gota de la muestra sobre una cinta adhesiva de carbono, la que a su vez se adhirió a un portamuestras, dejándose secar el conjunto a temperatura ambiente. El análisis de tamaño se realizó empleando un microscopio electrónico de barrido FEI modelo Quanta 650, operando a 30 kV. Se obtuvieron imágenes a diversas imágenes magnificaciones. Se seleccionaron 4 imágenes a 6000X las cuales fueron empleadas para realizar la medición del tamaño característico de las partículas. Se analizaron un total de 150 partículas y se obtuvo la distribución y resultados estadísticos realizando un análisis con el software OriginLab.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- a) La Figura 1 presenta 2 imágenes de la muestra a 800X, en las que se puede apreciar de manera general la morfología de las partículas. Se puede apreciar que aún a pesar de haber sometido la muestra a vibración por ultrasonido, ésta mantiene un contenido importante de partículas aglomeradas. Sin embargo, se pueden apreciar también partículas individuales. Esto se puede apreciar en detalle en la Figura 2, en donde se muestran imágenes de dos regiones aleatorias (región 1 y región 2) en la muestra (imágenes a 1500X (izquierda) y 3000X (derecha)). Las partículas exhiben forma variable.

1 de 5

Av. Universitaria 1801 - San Miguel
Lima - Perú
www.pucp.edu.pe

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono: (51) 1 426 4000
Teléfono: (51) 1 426 4000
Anexo: 1642

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

Rozas

ROZAS GALLEGOS, CAROLINA
Ingeniera de Laboratorio de Materiales



AA-E3E2Z

LABORATORIO DE MATERIALES

Departamento de Ingeniería
Sección Ingeniería Mecánica



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

CON SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

- b) La Figura 3 presenta las imágenes a 6000X que sirvieron para determinar el tamaño de las partículas. Se realizó una medida de la dimensión característica en 4 regiones aleatorias de la muestra. Se obtuvo la dimensión para un total de 126 partículas; cabe indicar que para efectos de distribución de tamaño solo se consideró como partículas individuales a aquellas con una dimensión menor a $2 \mu\text{m}$, dado que se evidenció que tamaños mayores obedecían a una aglomeración de partículas.
- c) La Figura 4 muestra el histograma correspondiente a la distribución de dimensión característica (tamaño) y la curva de acumulación de cuentas. El tamaño promedio de las partículas es de $0.908 \mu\text{m}$ (908 nm), con una desviación estándar de $\pm 0.427 \mu\text{m}$. El mínimo y máximo tamaño de partícula registrado fue $0.288 \mu\text{m}$ (288 nm) y $1.997 \mu\text{m}$, respectivamente.

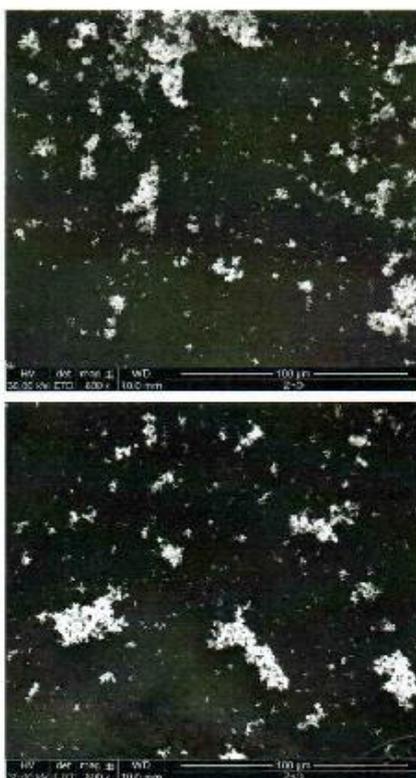


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de la muestra a 800X

2 de 5

Av. Universitaria 1801 - San Miguel
Lima - Perú
www.pucp.edu.pe

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

TELÉFONO: (51) 1 624 7000 FAX: (51) 1 624 2855
ANILIA ROZAS GALLEGOS 123030
Sección Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Materiales



AA-57675

LABORATORIO DE MATERIALES

 Departamento de Ingeniería
 Sección Ingeniería Mecánica

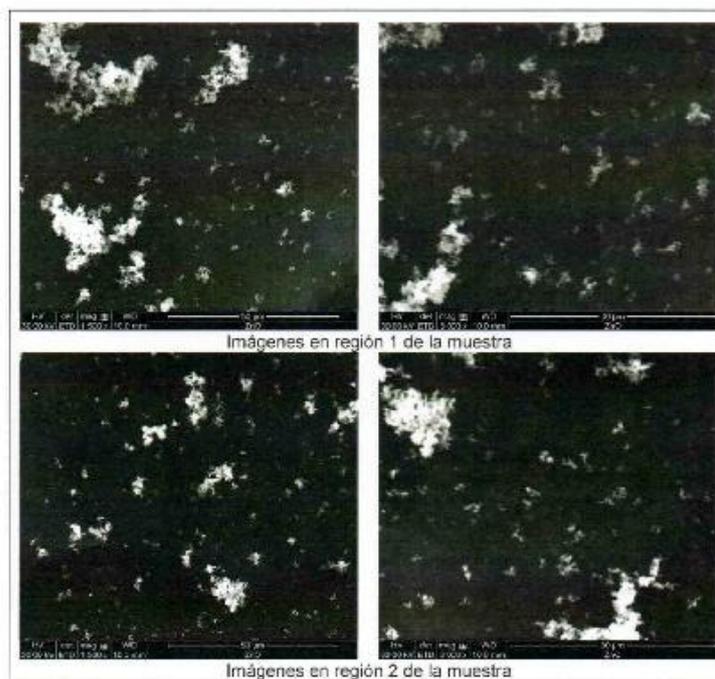
**PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ**
CON SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica en dos regiones aleatorias de la muestra (región 1 y región 2).

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 Sección Ingeniería Mecánica


 MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123020
 Jefe de Laboratorio de Materiales


AA-93828

3 de 5

 Av. Universitaria 1801 - San Miguel
 Lima - Perú
 www.pucp.edu.pe

 Apartado Postal
 N° 1761 Lima 100 - Perú
 labmat@pucp.edu.pe

 Teléfono:
 (51) 626 - 2000
 Anexo: 4842

 Telefax:
 (51) 626 - 2855

LABORATORIO DE MATERIALES

 Departamento de Ingeniería
 Sección Ingeniería Mecánica

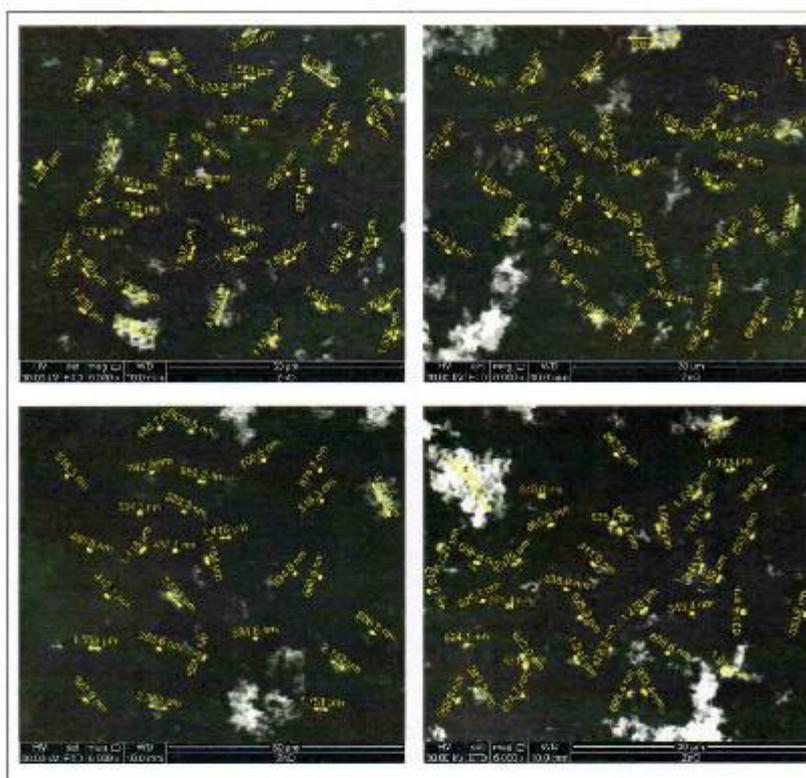
**PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ**
CON SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025


Figura 3. Medición de tamaño de partículas en 4 regiones aleatorias de la muestra (imágenes a 6000X).

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 Sección Ingeniería Mecánica

 MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123020
 Jefe de Laboratorio de Materiales


4 de 5

 Av. Universitaria 1801 - San Miguel
 Lima - Perú
 www.pucp.edu.pe

 Apartado Postal
 N° 1761 Lima 100 - Perú
 labmat@pucp.edu.pe

 Teléfono
 (511) 626 - 2000
 Anexo: 4842

 Telefax
 (511) 626 - 2855

LABORATORIO DE MATERIALES

Departamento de *Ingeniería*
Sección *Ingeniería Mecánica*



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

CON SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

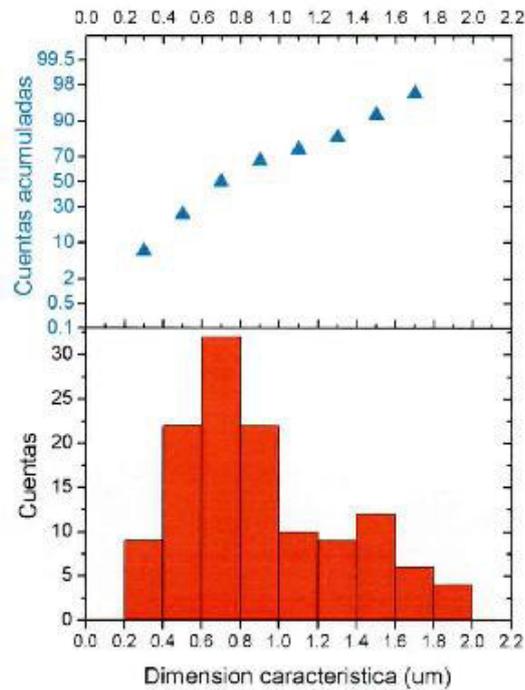


Figura 4. Histograma de distribución de tamaño de las partículas y acumulación de cuentas.

3. CONCLUSIONES

- El tamaño promedio de partícula es de $0.908 \mu\text{m}$ (908 nm) $\pm 0.427 \mu\text{m}$
- El 76% de las partículas observadas exhiben un tamaño entre 0.5 y $0.9 \mu\text{m}$.
- Las partículas no presentan una forma definida.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

MSC. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123020
Jefe de Laboratorio de Materiales



5 de 5

ANEXO 11: MATRIZ DE CONSISTENCIA

DEGRADACION DE COLORANTES DIRECTOS Y REACTIVOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE LA FOTOCATALISIS SOLAR HETEROGENEA					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES		
			TIPO	DIMENSION	INDICADOR
¿Los colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil podrán ser degradados mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando el óxido de zinc como catalizador?	Determinar la cinética de degradación de colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando el óxido de zinc como catalizador.	Si se degrada la concentración de los colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador, entonces, es posible conocer la cinética de reacción.	DEPE NDIEN TE	Degradación de la concentración del colorante.	mg/L o ppm
ESPECIFICOS	ESPECIFICOS	ESPECIFICOS			
¿Cuál serán los parámetros cinéticos de la degradación de los colorantes directos y reactivos en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea usando el óxido de zinc como catalizador?	Obtener los parámetros cinéticos de la degradación de los colorantes directos y reactivos en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador.	H1: Si existe la degradación de la concentración de los colorantes directos y reactivos utilizados por la industria textil mediante la fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc como catalizador, entonces se pueden obtener los parámetros de la reacción.	INDEP ENDIE NTES	tiempo de reacción y concentración del colorante	Orden, constante cinética y constante de adsorción
¿Influye la concentración inicial del colorante en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea, usando óxido de zinc como catalizador?	Evaluar el efecto de la concentración inicial del colorante en el proceso de la fotocatalisis solar heterogénea usando como catalizador el óxido de zinc.	H2: Si al variar la concentración inicial de los colorantes, el proceso de degradación foto catalítica solar heterogénea es distinta, entonces hay un efecto sobre el proceso foto catalítico.		tiempo de reacción y concentración inicial del colorante	Minutos, mg/L o ppm

¿Influye la concentración de foto catalizador óxido de zinc, en el proceso de la fotocátalisis solar heterogénea?	Evaluar el efecto de la concentración de foto catalizador óxido de zinc, en el proceso de la fotocátalisis solar heterogénea.	H3: Si al variar la concentración del foto catalizador, la degradación de la concentración del colorante durante el proceso foto catalítico son distintas, entonces hay un efecto de esta variable en el proceso fotocatalítico.	tiempo de reacción y concentración del catalizador	Minutos mg/L o ppm
---	---	--	--	-----------------------------