

Capítulo 6 Efecto de la exposición del colorante textil Rojo versatint en solución acuosa ante un plasma de aire a presión atmosférica

Chapter 6 Exposure effect of Versatint red textile dye in aqueous solution to an air plasma at atmospheric pressure

ALARCÓN-HERNÁNDEZ, Fidel Benjamín†*, FUENTES-ALBARRÁN, María del Carmen, GADEA-PACHECO, José Luis y MONTIEL-PALACIOS, Esteban

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc

ID 1^{er} Autor: *Fidel Benjamín, Alarcón-Hernández* / **ORC ID:** 0000-0002-2465-0898, **CVU CONACYT ID:** 131028

ID 1^{er} Coautor: *María Del Carmen, Fuentes-Albarrán* / **ORC ID:** 0000-0003-1308-1332, **CVU CONACYT ID:** 171814

ID 2^{do} Coautor: *José Luis, Gadea-Pacheco* / **ORC ID:** 0000-0001-9341-9289, **CVU CONACYT ID:** 160429

ID 3^{er} Coautor: *Esteban, Montiel-Palacios* / **ORC ID:** 0000-0001-8949-4112, **CVU CONACYT ID:** 96229

DOI: 10.35429/H.2022.9.80.93

F. Alarcón, M. Fuentes, J. Gadea y E. Palacios

* honorato@uaem.mx

S. Figueroa & J. Sierra (VV. AA.). Ingeniería y Materiales Aplicados al Medio Ambiente. Handbooks-TI - ©ECORFAN-Mexico, 2022.

Resumen

Se determinó el efecto generado en una solución de colorante Rojo Versantint (concentración inicial de 2.4×10^{-3} mg/L) tras ser expuesta a un plasma de aire a presión atmosférica (≈ 760 Torr). El estudio se realizó para cuatro diferentes tratamientos determinados por los valores de voltaje de generación del plasma (1000, 1500, 2000 y 2500 V), todos para una misma corriente eléctrica de 25 mA durante un intervalo de 150 minutos. Los efectos generados en la solución se monitorearon mediante medidas de espectrofotometría UV / VIS (absorbancia y porcentaje de degradación), pH, cambio de temperatura y bioensayos con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*). El máximo efecto para todos los tratamientos se observó al minuto 150 del tratamiento de 2500 V; alcanzando disminución de 62.0 % en absorbancia, equivalente a 62.2 % de degradación, 63.2 % para pH e incremento de 42.3 % de la temperatura. El porcentaje máximo de germinación de semillas se alcanzó al minuto 60 de los experimentos, llegando a un 90 % para el mismo tratamiento. En general, los experimentos muestran que, a mayor magnitud de los valores generadores del plasma, mayor eficiencia en la decoloración como función del tiempo, máxima disminución de pH, y menor tiempo de tratamiento para alcanzar el porcentaje máximo de germinación.

Decoloración, Plasma no térmico, Rojo versantint, Tratamiento de aguas

Abstract

The effect generated in a solution of Red versantint dye (initial concentration of 2.4×10^{-3} mg/L) after exposure to an air plasma at atmospheric pressure (≈ 760 Torr) was determined. The study was carried out for four treatments determined by the plasma generation voltage values (1000, 1500, 2000 and 2500 V), all for the same electric current of 25 mA for 150 minutes. The effects generated in the solution were monitored employing UV/VIS spectrophotometry measurements (absorbance and degradation percentage), pH, temperature change and bioassays with lettuce seeds (*Lactuca sativa*). The maximum effect for all treatments was observed at minute 150 of the 2500 V treatment, reaching a 62.0 % absorbance decrease, equivalent to 62.2% degradation, 63.2% pH and an increase of 42.3% in temperature. The maximum seed germination percentage was reached at minute 60 of the experiments, reaching 90% for the same treatment. The experiments show that the higher the magnitude of the plasma generating values, the higher the decolourization efficiency as a function of time, the maximum pH decrease, and the shorter the treatment time to reach the maximum germination percentage.

Decolourization, Non-thermal plasma, Red versantint, Water treatment

1 Introducción

El agua es de vital importancia para los seres vivos que habitan el planeta Tierra. En las últimas décadas, ésta ha sufrido un deterioro en su calidad debido a la presencia de diversos contaminantes que dificultan que los seres vivos realicen sus funciones de forma adecuada. La contaminación de los cuerpos de agua y su escasez en diferentes regiones del mundo ha impedido que el 20 % de la población mundial tenga acceso a agua segura y que el 40 % sufra de condiciones sanitarias inaceptables (Kurade *et al.*, 2019).

El agua es contaminada con diferentes sustancias durante las actividades agropecuarias, industriales y de servicio mediante las cuales los seres humanos adquieren diferentes satisfactores para cubrir sus necesidades.

El sector industrial, a pesar de ser un importante factor de desarrollo económico, es una de las principales causas del deterioro de la calidad del agua. Los efluentes industriales contienen una gran variedad de contaminantes que pueden causar daños al ambiente y la salud debido a su toxicidad, persistencia, bioacumulación, riesgo de ocasionar cáncer y producir mutaciones. En particular, la industria textil utiliza una gran variedad de compuestos químicos, entre ellos colorantes, durante las diferentes etapas de su proceso productivo. Esta industria consume una gran cantidad de agua potable, pues se utilizan aproximadamente 200 L de agua para fabricar 1 kg de producto (Khan y Malik, 2018) y sus grandes volúmenes de aguas residuales generados son descargados en los cuerpos de agua, generalmente, sin un tratamiento previo lo que provoca su contaminación.

Los colorantes presentes en los cuerpos de agua, incluso a concentraciones de 1 mg/L consumen oxígeno disuelto (Agrawal *et al.*, 2014), son visibles e indeseables, pues impiden la penetración de la luz solar, la cual es necesaria en el proceso fotosintético (Khan y Malik, 2018).

A nivel mundial, se producen anualmente más de 700,000 toneladas y 100,000 tipos de colorante (Park *et al.*, 2007, Ramírez-Montoya *et al.*, 2014, Nadaroglu *et al.*, 2019). Estos colorantes están diseñados para resistir la luz, el agua y agentes oxidantes por lo que son difíciles de degradar una vez que son liberados en los cuerpos de agua. De la producción anual de colorantes, más del 50% corresponde a azocolorantes (Sun *et al.*, 2007). Se estima que más del 10 % de los colorantes sintéticos utilizados se pierden en los efluentes durante las operaciones de manufactura y procesamiento (Sun *et al.*, 2007, Ramírez-Montoya *et al.*, 2014, Nasirian *et al.*, 2017).

Los colorantes pueden ser clasificados de acuerdo con su estructura química (azoicos, antraquinónicos, indigoides, entre otros) o por el método mediante el cual son aplicados al sustrato (ácidos, básicos, reactivos, directos, dispersos, entre otros) (Grcić *et al.*, 2014, Ramírez-Montoya *et al.*, 2014). En particular, el colorante textil Rojo versatint del grupo de los llamados poliméricos y clasificado como polimérico de polioxialquileno, es un contaminante de gran relevancia. Este tipo de colorantes se utiliza para registrar las fibras textiles mediante códigos en las maquinarias de operación durante su procesamiento, pero desaparecen en la etapa final sin agregar ninguna operación adicional y sin influir en el tono final de la tela, incluso si es blanca. Se caracterizan por tener moléculas grandes, altamente solubles en agua, que no pueden penetrar en la superficie de la fibra y pueden lavarse fácilmente durante el teñido y acabado acuoso normal. Se presentan en forma líquida o en polvo (Miley, 1996).

El tratamiento de las aguas residuales, que tiene como finalidad recuperar la calidad del agua a un determinado nivel que sea acorde con su uso posterior, se ha efectuado mediante diferentes métodos. Generalmente, hay dos formas de eliminar los colorantes del agua: mediante la separación de los colorantes del agua y mediante la destrucción de las moléculas de colorante (Zahrim y Hilal, 2013).

Las tecnologías fisicoquímicas que incluyen la adsorción en carbón activado, tecnologías de membrana, coagulación-floculación, filtración e intercambio iónico han sido usados para la remoción de colorantes. La adsorción es un método de bajo costo, simplicidad de diseño y con la capacidad para tratar soluciones concentradas (Sankar *et al.*, 1999, Ramírez-Montoya *et al.*, 2014, De Mattos *et al.*, 2019). La coagulación-adsorción genera grandes cantidades de lodos a los cuales también debe darse un tratamiento (Sun *et al.*, 2007, Zahrim y Hilal, 2013). Estos métodos tradicionales de remoción únicamente transfieren los compuestos orgánicos de la fase líquida a la sólida, la cual requiere un tratamiento posterior e involucra la regeneración del adsorbente (o del medio filtrante), o reemplazo de la membrana, lo que incrementa los costos totales del tratamiento (Nasirian *et al.*, 2017).

Entre los métodos que destruyen las moléculas de colorante se encuentran los procesos biológicos y los procesos avanzados de oxidación. Los tratamientos biológicos son rentables, producen menos lodos y son ambientalmente amigables. Sin embargo, algunos colorantes sintéticos son tóxicos, recalcitrantes y no biodegradables (Sankar *et al.*, 1999, Vedaraman *et al.*, 2013, Kanagaraj *et al.*, 2015, Kurade *et al.*, 2019) o contienen sustituyentes (por ejemplo, grupos nitro y sulfónico) que no son susceptibles de degradación mediante procesos biológicos convencionales (Park *et al.*, 2007). Los procesos avanzados de oxidación se caracterizan por la generación de radicales $\bullet\text{OH}$. Esta especie es muy reactiva y poco selectiva, ataca a la mayoría de las moléculas orgánicas con velocidades del orden de $10^6 - 10^9 \text{ dm}^3/\text{mol s}$ (Sadik y Shama, 2002, Nasirian *et al.*, 2017).

Los procesos avanzados de oxidación como fotólisis, UV/H₂O₂ (Sadik y Shama, 2002, Shu y Chang, 2005, Grcić *et al.*, 2014), UV/O₃ (Shu y Chang, 2005), Fenton (Sun *et al.*, 2007), fotoFenton (Grcić *et al.*, 2014), ozonización (Shu y Chang, 2005, Vedaraman *et al.*, 2013, Panda y Mathews, 2014), fotocatalisis heterogénea (Nasirian *et al.*, 2017) y plasma tienen la capacidad de decolorar completamente y mineralizar los colorantes en un corto tiempo de reacción y con un bajo costo de tratamiento (Grcić *et al.*, 2014). La ozonización ha sido aplicada en la oxidación y degradación de compuestos refractarios. El ozono ocasiona la ruptura de los enlaces conjugados de los grupos cromóforos del azocolorante lo que provoca la remoción del color y genera compuestos orgánicos oxigenados de bajo peso molecular que son fácilmente biodegradados (Vedaraman *et al.*, 2013). Sin embargo, el alto costo ocasionado por las dificultades de transferencia de masa derivado de la baja solubilidad del ozono limita su aplicación (Panda y Mathews, 2014).

El proceso Fenton homogéneo es una tecnología de oxidación catalítica que usa una mezcla de iones ferrosos y peróxido de hidrógeno en solución acuosa. La velocidad de degradación de los contaminantes se ve incrementada con el uso de luz UV (proceso fotoFenton). La luz UV, además de generar radicales hidroxilo adicionales, permite reciclar el catalizador ferroso mediante la reducción de Fe^{3+} (Grcić *et al.*, 2014).

Los procesos Fenton tienen las siguientes ventajas: bajos costos, los reactivos utilizados no son tóxicos, no tiene limitaciones de transferencia de masa y simplicidad de tecnología (Sun *et al.*, 2007). Sin embargo, la dificultad para recuperar el catalizador, al final del tratamiento, es una desventaja que se debe superar (Días *et al.*, 2016).

La fotocatalisis heterogénea es una tecnología utilizada en la degradación de colorantes en la cual, comúnmente, se utiliza TiO_2 como fotocatalizador debido a su alta reactividad, a que no es tóxico, a su gran estabilidad fisicoquímica y bajo precio. A pesar de todas estas ventajas, este catalizador tiene dos grandes limitaciones en su actividad fotocatalítica: requiere activarse con radiación UV y la alta recombinación de los pares electrón-hueco generados. Otra limitación de este proceso incluye la recuperación de las partículas de TiO_2 después del tratamiento (Nasirian *et al.*, 2017).

Nuevas tecnologías de oxidación como irradiación con haces de electrones y plasmas no térmicos están siendo desarrolladas para abordar el problema de contaminación del agua o mejoradas con la finalidad de incrementar la eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales.

En el tratamiento con plasma se pueden generar moléculas (por ejemplo, ozono o H_2O_2) o especies de vida corta (radical $\cdot\text{OH}$, ion OH^+ , hidrógeno atómico y radicales de oxígeno atómico) que pueden reaccionar con las moléculas de contaminante presentes en agua lo que incrementaría su eficiencia (Panda y Mathews, 2014).

Considerando esto último, en este trabajo, se expusieron soluciones acuosas del colorante Rojo versatint a plasmas no térmicos de diferentes potencias y generados a presión atmosférica, con la finalidad de observar y cuantificar experimentalmente las diferencias en el efecto de la decoloración del contaminante, así como de las demás variables de interés. Entender el proceso mediante el cual se puede conseguir la disminución gradual de la coloración, así como del porcentaje de toxicidad en la solución, permitirá conocer una metodología para el tratamiento mediante el uso de plasmas fríos de aguas residuales, con estas características.

Las técnicas utilizadas para determinar los cambios generados en el contaminante de estudio, se detallan en la sección de metodología. De igual manera se presenta un esquema del dispositivo experimental utilizado en el que se detallan las partes que lo conforman. La sección de resultados muestra mediante gráficos de absorbancia, degradación, pH, cambio de temperatura y bioensayos de toxicidad realizados con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*), los porcentajes obtenidos de los cambios generados. Finalmente, en la sección de conclusiones se presentan las observaciones más relevantes, pero no únicas de lo obtenido mediante cada estudio.

2 Metodología Experimental

Preparación de la solución de estudio

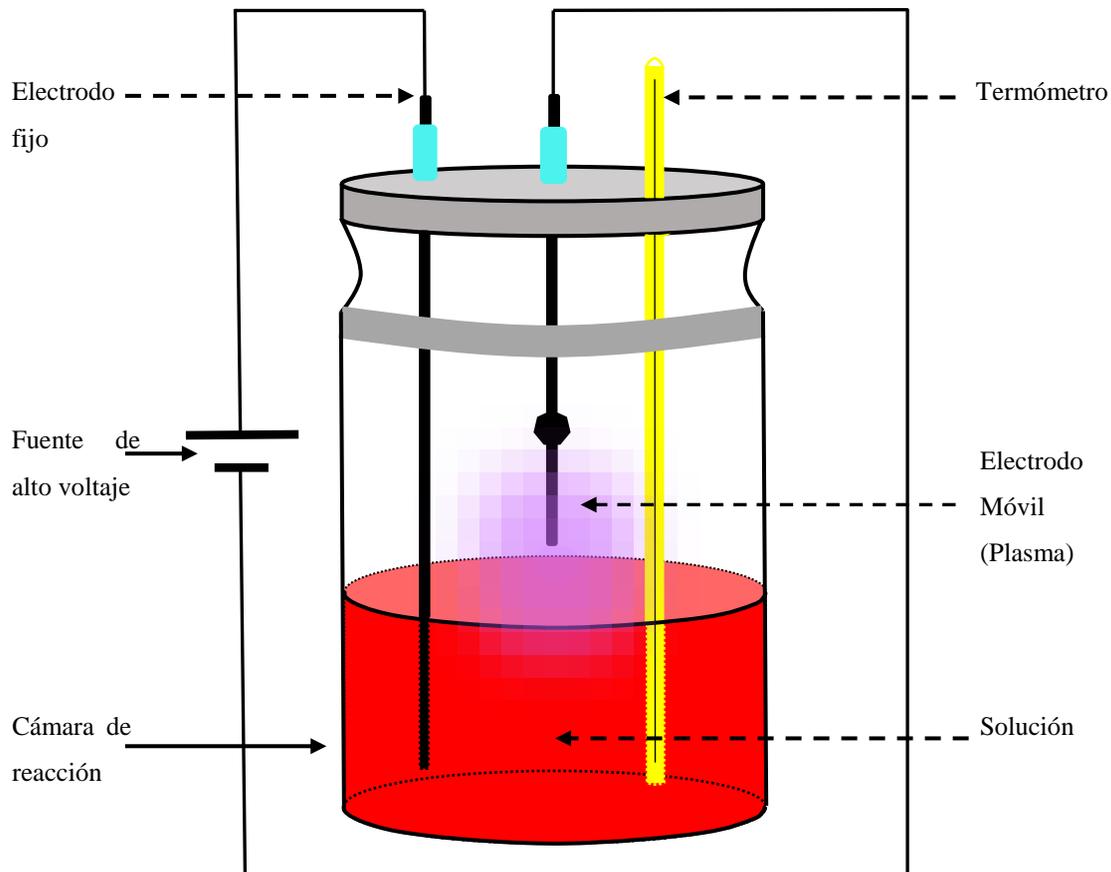
Para la realización del presente experimento se prepararon 3600 mL de una disolución acuosa del colorante Rojo versatint, a una concentración inicial y de trabajo de 2.4×10^{-3} mg/L. La disolución (3600 mL) se almacenó a 14°C para su posterior uso. En cada experimento se requieren 300 mL (se hicieron tres repeticiones por tratamiento, fueron cuatro tratamientos). Los valores que se informan como resultados son el valor promedio de lo obtenido en cada repetición.

El valor elegido de 2.4×10^{-3} mg/L responde a la posición intermedia de tal valor en la curva de calibración realizada para la absorbancia. Valores mayores de concentración del colorante podrían ser descritos con menor precisión por la ecuación obtenida.

Sistema Experimental

Un esquema del sistema experimental utilizado para la exposición de la solución de interés ante el plasma de aire se muestra en la Figura 2.1. Está formado por una cámara de vidrio de sellado hermético con capacidad de 1.0 L, dos electrodos de tungsteno, un termómetro de mercurio y una fuente de alto voltaje. Este tipo de diseño experimental por la configuración de la posición de los electrodos se conoce como sistema híbrido. En estos, un electrodo se sumerge en líquido (solución a tratar) y el otro permanece en un gas (en este caso aire) (Grymonpré *et al.*, 2004).

Figura 2.1 Esquema del dispositivo experimental



Fuente de Consulta: Imagen Propia

La exposición de la solución a tratar ante el plasma de aire se realiza mediante el depósito de 300 mL en la cámara de vidrio. Un electrodo fijo es inmerso en la solución y el otro (móvil) se sitúa a una distancia de entre dos y cinco milímetros de la superficie. Es en este segundo electrodo dada la característica de movilidad, donde se lleva a cabo la generación del plasma. Este electrodo se ajusta en distancia a la superficie de la solución de estudio hasta obtener un plasma visualmente estable. Cuando el plasma es generado, se vigila la continuidad de éste durante todo el tratamiento.

El plasma no térmico se genera utilizando una fuente de alto voltaje (SPELLMAN SL600), mediante el ajuste de los valores correspondientes de diferencia de potencial y corriente eléctrica. Los parámetros utilizados para cada uno de los tratamientos se muestran en la Tabla 2.1. Esto se hace para cada tratamiento a presión atmosférica (≈ 760 Torr).

Tabla 1.1 Parámetros considerados para la realización del presente experimento

Tratamiento	Tiempo de exposición (minutos)	Concentración (mg/L)	Corriente (mA)	Voltaje (volts)
T1	150	2.4×10^{-3}	25	1000
T2	150	2.4×10^{-3}	25	1500
T3	150	2.4×10^{-3}	25	2000
T4	150	2.4×10^{-3}	25	2500

Los parámetros mostrados en esta tabla son los utilizados para la realización de los experimentos de la solución en estudio. Volumen de solución utilizada: 300 ml.

Toma de muestras y medidas de parámetros de interés

Iniciado el proceso de exposición al plasma, la medida o determinación de parámetros de interés se realiza cada 15 minutos. Para hacerlo, se detiene el tratamiento, se mide la temperatura (el sistema cuenta con un termómetro de mercurio que se sitúa dentro de la solución con contaminante que permite verificar la temperatura mientras se lleva a cabo el proceso), se extrae una muestra para medir la absorbancia (espectrofotómetro Hach DR 3900), el pH (potenciómetro HI 9813-6N) y realizar los bioensayos de toxicidad (porcentaje de germinación de semillas de lechuga *Lactuca sativa*).

Realizado lo anterior se reanuda la exposición de la solución al plasma de aire repitiendo este procedimiento hasta alcanzar 150 minutos y concluir el experimento. En particular, el cambio de concentración y porcentaje de degradación del contaminante de interés en la solución se determina en términos de la absorbancia y la curva de calibración de concentración.

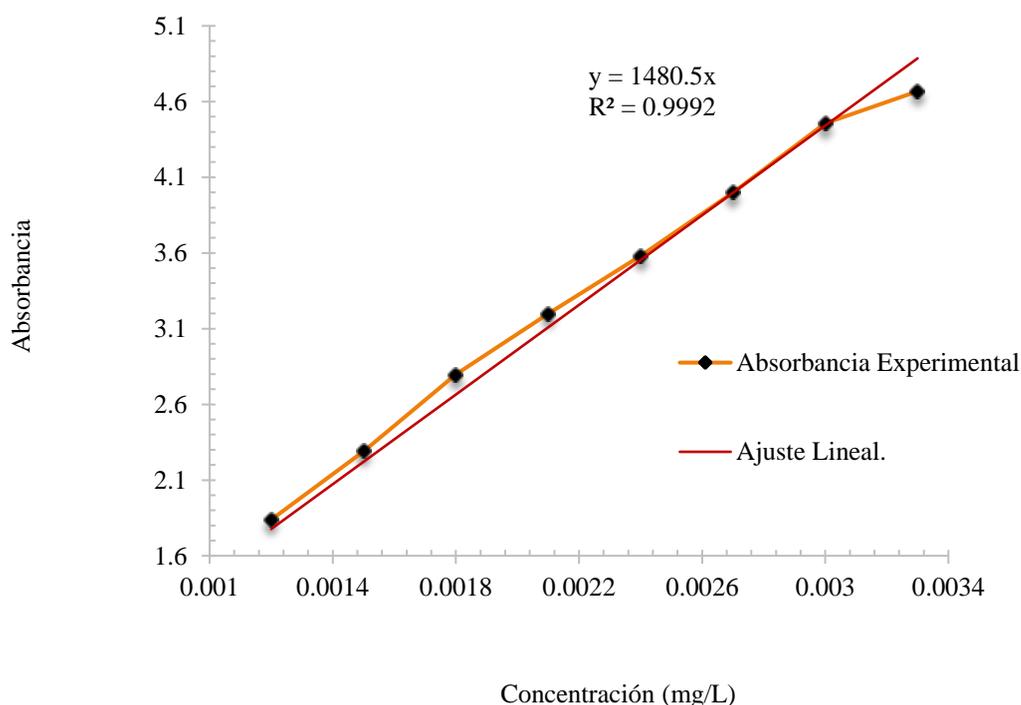
Bioensayos de toxicidad.

Los bioensayos de toxicidad se realizan siguiendo la metodología establecida en este tipo de procesos (Sobrero y Ronco, 2004). Se utilizan semillas sin curar (sin fungicidas o plaguicidas) de lechuga de la especie *Lactuca Sativa* y con un porcentaje de germinación mayor al 90 %. En esta investigación se hicieron tres repeticiones por cada tratamiento, se utilizó un control negativo (agua destilada) y un control positivo (solución de Rojo versatint a una concentración de 2.4×10^{-3} mg/L sin exponer al plasma). Las semillas se hidrataron cuando la solución tratada alcanzó la temperatura ambiente (23 ± 0.5 °C).

Curva de calibración

En el Gráfico 2.1 se presenta la curva de calibración utilizada del colorante Rojo versatint, cuya ecuación de ajuste sin ordenada al origen es $y = 1480.5x$. La curva de calibración relaciona los valores de absorbancia con las concentraciones en mg/L del colorante de interés a una longitud de onda $\lambda = 477$ nm (valor experimental donde la absorbancia es máxima). Se obtuvo realizando ocho diferentes diluciones de una solución con concentración conocida de colorante.

Gráfico 2.1 Curva de calibración



Fuente de Consulta: Imagen Propia

Porcentaje de degradación

El porcentaje de degradación es calculado mediante la Ecuación 1.

$$\% \text{ Degradación} = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \times 100 \% \quad (1)$$

Donde C es la concentración del colorante de interés a un cierto tiempo de tratamiento y C_0 es la concentración inicial del colorante sin tratamiento. Los valores de concentración de la solución se relacionan con la absorbancia respectiva mediante una función lineal, obtenida a través de la curva de calibración, Ecuación 2.

$$C = A/1480.5 \quad (2)$$

Donde A es la absorbancia de la solución medida a un cierto tiempo de tratamiento.

3 Resultados y Discusión

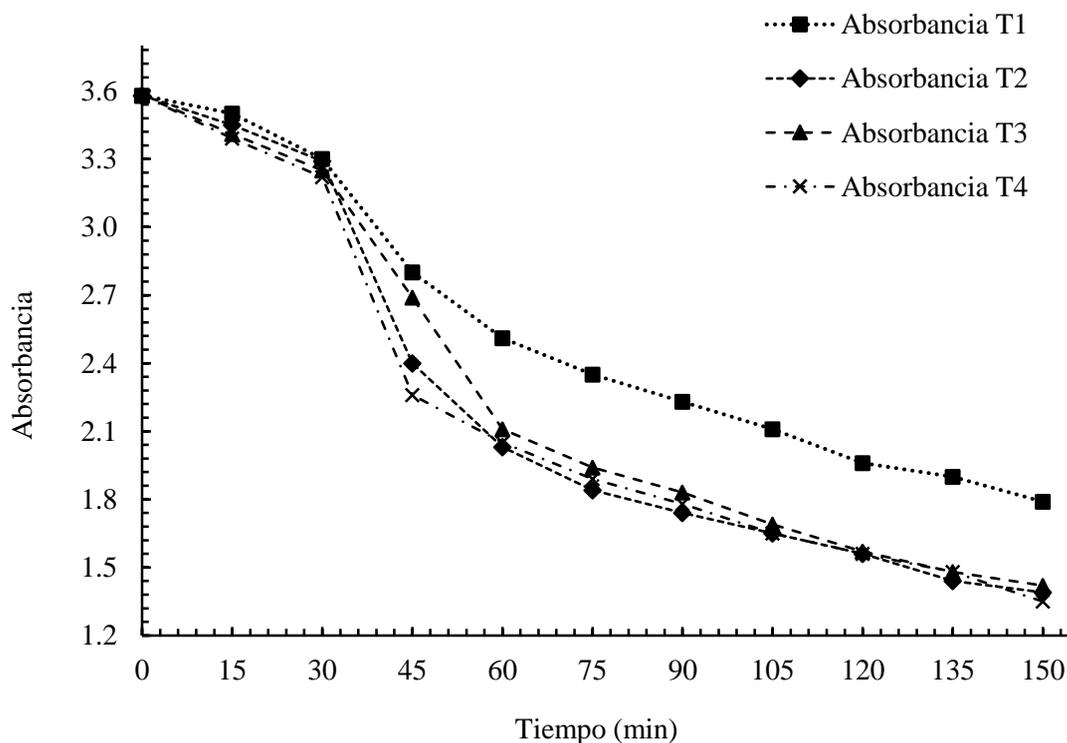
Los tratamientos (T) por plasma a presión atmosférica de la solución de colorante Rojo versatint muestran resultados específicos. Se presenta a continuación lo obtenido respecto del cambio de absorbancia, porcentaje de degradación, pH, temperatura y bioensayos de toxicidad.

Absorbancia

El Gráfico 3.1 muestra el cambio de absorbancia de la disolución acuosa del colorante en estudio como función del tiempo de exposición a un plasma de aire a presión atmosférica para diferentes valores de voltaje y una corriente eléctrica fija generadora del plasma.

El comportamiento de la absorbancia de la solución de interés tras ser expuesta al plasma generado en la interfase aire-agua a presión atmosférica, tiene una tendencia decreciente en función del tiempo de exposición y del valor del voltaje de generación del plasma. La disminución del valor de la absorbancia está directamente relacionada con el voltaje aplicado en cada uno de los tratamientos, a mayor voltaje aplicado mayor disminución de la absorbancia en el tiempo.

Gráfico 3.1 Cambio de absorbancia



Fuente de Consulta: Imagen Propia

Al final de los tratamientos (T1, T2, T3 y T4), el valor de la absorbancia disminuye como función de la corriente de 3.58 a 1.79, 1.39, 1.42 y 1.35 respectivamente, lo que muestra la eficiencia de cada uno de los procesos.

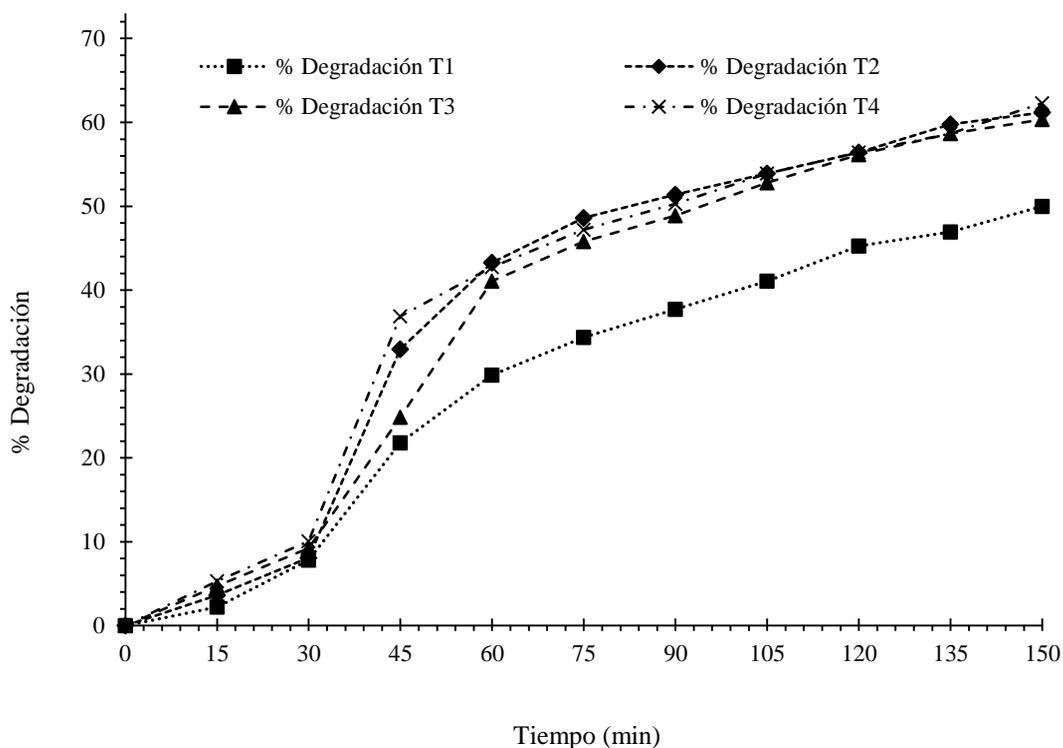
La curva del cambio de absorbancia para cada uno de los tratamientos se caracteriza por dividirse en tres regiones dependientes del tiempo de exposición y del voltaje de generación del plasma. La primera muestra un cambio ligero del valor de la absorbancia, corresponde a los primeros treinta minutos de exposición de los cuatro tratamientos. La segunda región, es en la que se genera la mayor disminución de los valores de absorbancia a mayor rapidez de todo el tiempo de exposición. Se observa del minuto treinta al minuto sesenta para todos los tratamientos. Finalmente, la última región de la curva se caracteriza por mostrar un comportamiento asintótico y un menor cambio de los valores de absorbancia en el tiempo. Se presenta del minuto sesenta en adelante.

En general, suministrar energía al sistema experimental mediante el plasma genera la disminución de la absorbancia, lo que indica que hay ruptura de los grupos cromóforos que dan color a la solución (Alarcón *et al.*, 2022)

Porcentaje de degradación

El Gráfico 3.2 muestra el comportamiento del porcentaje de degradación en función del tiempo de exposición de la solución al plasma y las características de cada tratamiento. El porcentaje de degradación aumenta de manera específica a medida que el tiempo de exposición al plasma es mayor para cada tratamiento, así como en función del tratamiento.

Gráfico 3.2 Porcentaje de degradación



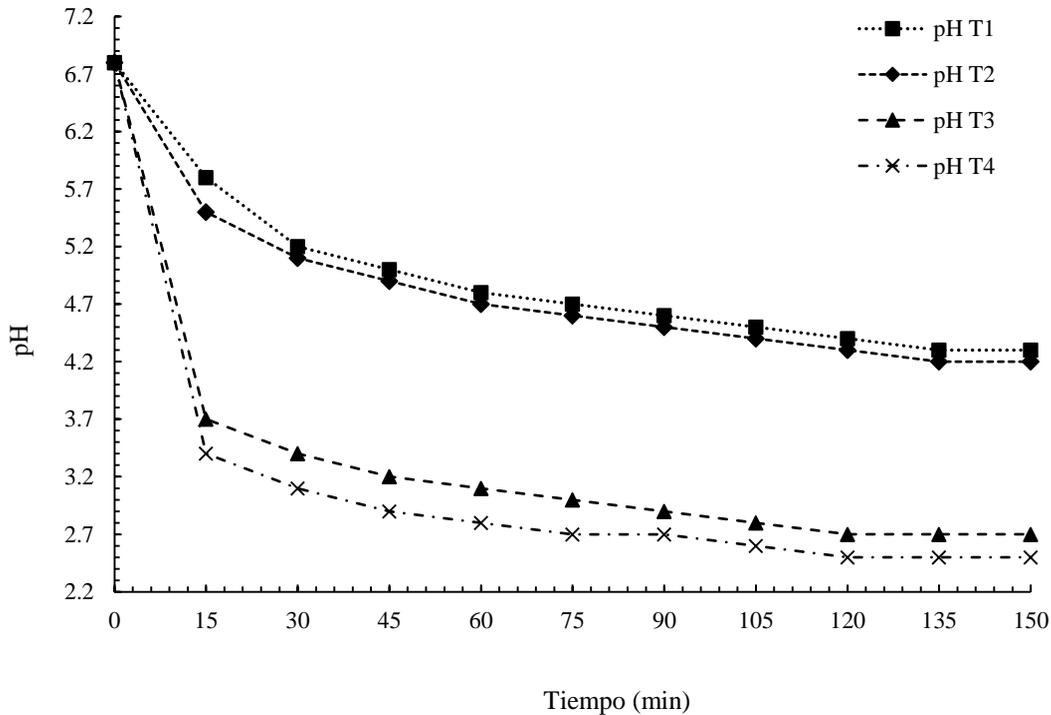
Fuente De Consulta: Imagen Propia

Se observa que, para todos los tratamientos, el porcentaje de degradación presenta un comportamiento muy parecido y de diferente magnitud, alcanzando valores de 50 %, 61.1 %, 60.3 % y máximo de 62.2 %. De manera general, es el tratamiento (T4), el que muestra mayor eficiencia en la degradación durante la mayor parte del tiempo de exposición.

pH.

El Gráfico 3.3 muestra el comportamiento que experimenta el cambio de pH de la solución acuosa al ser expuesta a un plasma no térmico a presión atmosférica (~760 Torr) con variación en la magnitud del voltaje.

Gráfico 3.3 Comportamiento del cambio de pH de la solución de colorante Rojo versatint, como función del tiempo de exposición a plasma no térmico y del valor del voltaje



Fuente de Consulta: Imagen Propia

En particular, los valores de pH de la solución muestran una disminución conforme pasa el tiempo de exposición a cada tratamiento. Sucede para todos los tratamientos y es mayor conforme el voltaje generador del plasma incrementa. En general la solución aumenta su nivel de acidez.

El cambio de pH para los tratamientos a presión atmosférica muestra dos comportamientos específicos. El primero donde la disminución de pH es rápida y sucede en los minutos iniciales de tratamiento. Baja de 6.8 a 5.8, 5.5, 3.7 y 3.4 para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente a 15 minutos de iniciada la exposición al plasma. En los minutos siguientes el pH sigue disminuyendo para todos los tratamientos, pero de manera más lenta, alcanzando en el resto del tiempo de exposición valores de 4.3, 4.2, 2.7 y 2.5 en correspondencia con el mayor valor del voltaje de generación del plasma respectivamente.

Se destaca que el valor mínimo de pH (2.5) se observa en el tiempo o intervalo final del cuarto tratamiento; esto es, cuando se aplica una intensidad de voltaje de 2500 V durante 150 minutos de exposición a presión atmosférica (~760 Torr). Dadas las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el presente experimento, donde la solución en estudio está en interacción directa con el aire circundante y la temperatura aumenta conforme pasa el tiempo de exposición al plasma, múltiples procesos químicos se presentan. El aire contiene CO₂, compuesto que al reaccionar con el sistema contribuye a una mayor generación de radical hidronio, tal como se muestra en las ecuaciones 1-3.

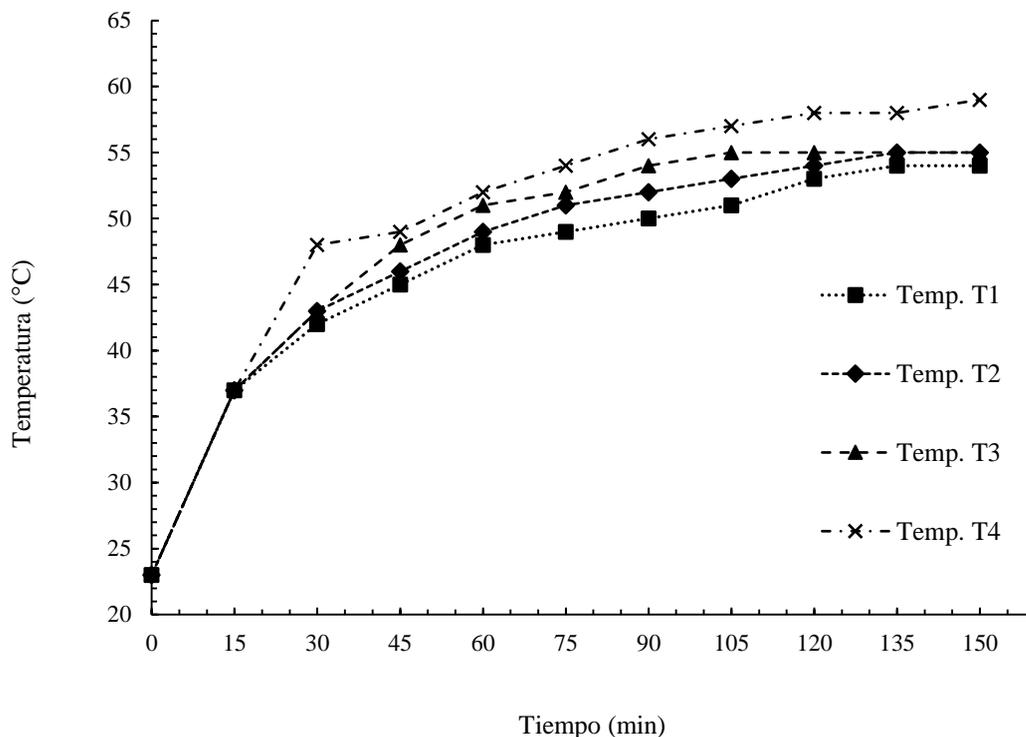


Los plasmas no térmicos de descarga eléctrica en interacción con superficies de agua y presencia de aire inducen el cambio de pH de la solución (Brisset, 1990, Burlica, 2008), esto; debido a la generación de HNO_3 , HNO_2 , y otros subproductos que pueden formarse en plasmas de aire húmedo o agua. Se ha observado que en sistemas de descarga híbridos se forman NO y NO_2 a través de las reacciones de electrones energéticos con N_2 y O_2 en la fase gaseosa (Sathiamoorthy, 1999), los cuales reaccionan con H_2O formándose HNO_3 y HNO_2 que disminuyen el pH (Burlica, 2006).

Cambio de temperatura

Se observa en el Gráfico 3.4 que a medida que aumenta el tiempo de exposición al plasma, el cambio de temperatura muestra dos comportamientos específicos. El primero en el que el aumento de temperatura es relativamente rápido y el segundo en el que dicho crecimiento es más lento.

Gráfico 3.4 Porcentaje de degradación



Fuente de Consulta: Imagen Propia

Se muestra un cambio de temperatura creciente y asintótico para todos los tratamientos. Tal comportamiento se acentúa a medida que aumenta la potencia eléctrica de generación de plasma.

En los primeros cuarenta y cinco minutos de tratamiento, la temperatura de la solución del presente experimento aumenta relativamente rápido, pasando de 23 °C a 45 °C, 46 °C, 48 °C y 49 °C, respectivamente. A partir de estos valores, el cambio de temperatura es más lento, alcanzando temperaturas de 54 °C, 55 °C, 55 °C y 59 °C al final de los tratamientos.

El comportamiento del cambio de temperatura tiene explicación en términos de los procesos físicos que se llevan a cabo en la solución tras su exposición al plasma.

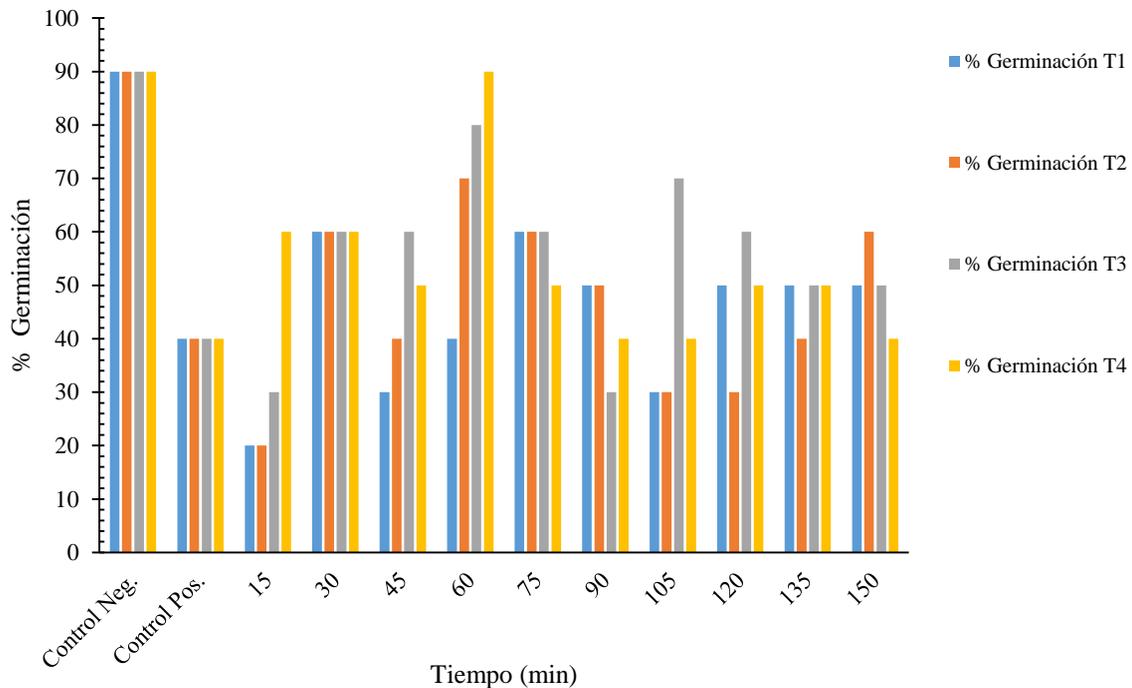
En la primera parte, ocurre un proceso casi exclusivamente de calentamiento y sin evaporación de agua, lo que determina que el cambio de temperatura sea relativamente rápido (toda la energía suministrada eleva la temperatura), mientras que para la segunda parte, se empiezan a observar dos procesos simultáneos, un proceso de calentamiento y a la vez otro de evaporación, lo cual hace que la temperatura no se eleve con la misma rapidez que en la primera parte.

El aumento de temperatura no necesariamente influye en el proceso de decoloración de los colorantes mediante esta metodología (Alarcón *et al.*, 2022), es más claramente el aumento de la potencia eléctrica generadora del plasma.

Porcentaje de Germinación

Se muestra el porcentaje de germinación que se logró obtener de las semillas de lechuga *Lactuca sativa* después de ser hidratadas con una solución acuosa de colorante Rojo versatint, la cual fue sometida a tratamientos de plasma con variación en el voltaje aplicado. Gráfico 3.5.

Gráfico 3.5 Porcentaje de germinación



Fuente de Consulta: Imagen Propia

En la gráfica anterior (Gráfico 3.5) se puede observar que el porcentaje de germinación de las semillas hidratadas con agua destilada (control negativo) alcanzaron un 90 % en promedio, mientras que las hidratadas con solución de interés sin tratar (control positivo), solo alcanzaron un 40 %. Este dato indica que la solución de estudio es tóxica de inicio. Comparando esta última con los porcentajes de germinación respecto de las semillas hidratadas con la solución tratada a los diferentes tiempos de exposición, se puede observar un cambio evidente en la germinación.

En general el cambio del porcentaje de germinación es diferente para cada tratamiento. Se observa que a medida que aumenta el tiempo de exposición al plasma, el porcentaje de semillas germinadas aumenta hasta alcanzar un máximo. Es para los primeros 15 minutos de exposición para los tratamientos de T1, T2 y T3, en donde se registran los porcentajes más bajos de germinación. Este resultado podría estar en relación directa con la cantidad de contaminante (Rojo versatint) que existe en la solución al inicio de cada tratamiento y de los subproductos químicos que se generan por la exposición al plasma.

Por otra parte, es en el tiempo de exposición de 60 min y para los tratamientos T3 y T4 donde se podría decir que el porcentaje de germinación es adecuado, alcanzando y rebasando el 80 % como lo establecen los estándares aceptables de toxicidad.

Cabe mencionar que, si bien el porcentaje más alto de germinación de los cuatro tratamientos pertenece al tratamiento T4 con un 90% de germinación, es solo a los 60 minutos donde se observa tal comportamiento. Es decir, es en este tiempo y para ese tratamiento donde se conjugan valores adecuados de todos los parámetros involucrados para que ello ocurra. Para este tratamiento a ese tiempo de exposición, se tiene un valor equivalente de concentración del colorante utilizado de 1.38×10^{-3} mg/L y corresponde a una degradación del 42.7 %.

4 Agradecimiento

Los autores agradecen al Ing. Jorge Cleto Diaz por el apoyo experimental proporcionado y a la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, por las facilidades proporcionadas para la realización de esta investigación.

5 Conclusiones

Se determinaron los cambios generados en una solución de colorante Rojo versatint sometida a tratamientos de plasma de aire a presión atmosférica. Se hizo para cuatro potencias eléctricas de generación del plasma a través del cambio de voltaje a una corriente fija (1000, 1500, 2000 y 2500 V, todos para una misma corriente eléctrica de 25 mA durante un intervalo de 150 minutos).

Los cambios se evaluaron respecto de la absorbancia, el porcentaje de degradación, el pH, la temperatura y la toxicidad.

Los valores de máximo efecto alcanzado corresponden al tratamiento T4 (2500 V) y a un tiempo de exposición de 150 minutos. Para este tratamiento la temperatura subió un 42.3 %, mientras que la absorbancia disminuyó un 62.0 %, equivalente a un 62.2 % de degradación, así como un decremento de 63.2 % de pH. El porcentaje máximo de germinación de semillas se alcanzó al minuto 60 de los experimentos, llegando a un 90 % para el mismo tratamiento.

Se concluye que los plasmas implementados como en la presente investigación, son una buena opción para decolorar y cambiar la toxicidad de una solución de Rojo versatint de manera controlada. A mayor magnitud de los valores generadores del plasma, mayor eficiencia en la decoloración como función del tiempo, máxima disminución de pH, y menor tiempo de tratamiento para alcanzar el porcentaje máximo de germinación.

Sugerencia de investigación

Dados los valores de cambio (toxicidad en particular) en la solución de interés bajo el intervalo de tiempo realizado (150 min), se plantea la implementación de iguales experimentos a intervalos de toma de medidas menores (5 min).

Lo anterior con el fin de obtener con mayor detalle las curvas de cambio de las diferentes variables y observar los máximos de cada una de ellas. También se sugiere utilizar un gas diferente al aire para generar el plasma, podría ser dadas las reacciones químicas que ocurren en el proceso de degradación del contaminante: hidrogeno, nitrógeno u oxígeno.

6 Referencias

- Agrawal, S., Tipre, D., Patel, B. y Dave, S. (2014). Optimization of triazo Acid Black 210 dye degradation by *Providencia* sp. SRS82 and elucidation of degradation pathway. *Process Biochemistry*, 49, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.10.006>
- Alarcón, F.B., Fuentes, M. C., Gadea, J.L., Tlatelipa, A. y Cañete V. (2022). Evaluation of the degradation process of Diethyl (3H-1-Ethoxy-3-phenoxazinylidene) Ammonium Chloride in water, after exposure to nonthermal plasma at atmospheric pressure. *Journal of Chemistry*, Vol. 2022, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/4486227>
- Alarcón, F.B., Montiel, E., Fuentes, M. C., Tabarez, A., Gadea, J.L. y Tlatelipa, A. (2022). Behavior of the AB52 dye degradation in liquid medium by different electrical power non-thermal plasma at atmospheric pressure. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 21, 2, 1-12. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA2793>
- Brisset, J.L., Lelievre, J., Doubla, A. y Amouroux, J. (1990). Interactions with aqueous solutions of the air corona products. *Revue de Physique Appliquée*, 25 (6), 535–543. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01990002506053500>

- Burlica, R., Kirkpatrick, M.J. y Locke, B.R. (2006). Formation of reactive species in gliding arc discharges. *Journal of Electrostatics*, 64 (1), 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.12.007>
- Burlica, R., y Locke, B.R. (2008). Pulsed plasma gliding-arc discharges with water spray. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44 (2), 482–489. <http://doi.org/10.1109/TIA.2008.916603>
- De Mattos, N.R., de Oliveira, C.R., Brogliato-Camargo, L.G., da Silva, R.S.R y Lassarote-Lavall, R. (2019). Azo dye adsorption on anthracite: A view of thermodynamics, kinetics and cosmotropic effects. *Separation and Purification Technology*, 209, 806–814. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.027>
- Dias, F.F., Oliveira, A.A.S., Arcanjo, A.P., Moura, F.C.C. y Pacheco, J.G.A. (2016). Residue-based iron catalyst for the degradation of textile dye via heterogeneous photo-Fenton. *Applied Catalysis B: Environmental*, 186, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.12.049>
- Grčić, I., Papić, S., Mesec, D., Koprivanac, N. y Vujević, D. (2014). The kinetics and efficiency of UV assisted advanced oxidation of various types of commercial organic dyes in water. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 273, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.09.009>
- Grymonpré, D.R., Finney, W.C., Clark, R.J. y Locke, B.R. (2004). Hybrid gas liquid electrical discharge reactors for organic compound degradation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43 (9), 1975–1989. <https://doi.org/10.1021/ie030620j>
- Kanagaraj, J., Senthilvelan, T. y Panda, R.C. (2015). Biodegradation of azo dyes in industrial effluent: an eco-friendly way toward green technology. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 331–341. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0783-y>
- Khan, S. y Malik, A. (2018). Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 4446–4458. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0783-7>
- Kurade, M.B., Waghmode, T.R., Xiong, J.–Q., Govindwar, S.P. y Jeon, B.–H. (2019). Decolorization of textile industry effluent using immobilized consortium cells in upflow fixed bed reactor. *Journal of Cleaner Production*, 213, 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.218>
- Miley, J. (1996). Polymeric colorants. *Pure & Appl. Chem*, Vol. 68, No. 7, 1423–1428.
- Nadaroglu, H., Mosber, G., Gungor, A.A., Adiguzel, G. y Adiguzel, A. (2019). Biodegradation of some azo dyes from wastewater with laccase from *Weissella viridescens* LB37 immobilized on magnetic chitosan nanoparticles. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100866>
- Nasirian, M., Bustillo-Lecompte, C.F. y Mehrvar, M. (2017). Photocatalytic efficiency of Fe₂O₃/TiO₂ for the degradation of typical dyes in textile industries: Effects of calcination temperature and UV assisted thermal synthesis. *Journal of Environmental Management*, 196, 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.030>
- Panda, K.K. y Mathews, A.P. (2014). Ozone oxidation kinetics of Reactive Blue 19 anthraquinone dye in a tubular in situ ozone generator and reactor: Modeling and sensitivity analyses. *Chemical Engineering Journal*, 255, 553–567. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.071>
- Park, C., Lee, M., Lee, B., Kim, S.-W., Chase, H.A., Lee, J. y Kim, S. (2007). Biodegradation and biosorption for decoloration of synthetic dyes by *Funalia trogii*. *Biochemical Engineering Journal*, 36, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.06.007>
- Ramírez-Montoya, L.A., Hernández-Montoya, V. y Montes-Morán, M.A. (2014). Optimizing the preparation of carbonaceous adsorbents for the selective removal of textile dyes by using Taguchi methodology. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 109, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.07.018>

- Sadik, W. y Shama, G. (2002). UV-Induced decolourization of an azo dye by homogeneous advanced oxidation processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 80, 310–314. <https://doi.org/10.1205/095758202321154943>
- Sankar, M., Sekaran, G., Sadulla, S. y Ramasami, T. (1999). Removal of diazo and triphenylmethane dyes from aqueous solutions through an adsorption process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 74, 337–344. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199904\)74:4<337::AID-JCTB39>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199904)74:4<337::AID-JCTB39>3.0.CO;2-U)
- Sathiamoorthy, G., Kalyana, S., Finney, W.C., Clark, R.J. y Locke, B.R. (1999). Chemical reaction kinetics and reactor modeling of NO_x removal in a pulsed streamer corona discharge reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38 (5), 1844–1855. <https://doi.org/10.1021/ie980544y>
- Shu, H.-Y. y Chang, M.-C. (2005). Decolorization effects of six azo dyes by O₃, UV/O₃ and UV/H₂O₂ processes. *Dyes and Pigments*, 65, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.06.014>
- Sobrero, M.C. y Ronco A.E. (2004). 4.4: Protocolos de Prueba. Bioensayo de Toxicidad Aguda con Semillas de Lechuga (*Lactuca sativa*). En: *Ensayos Toxicológicos y Métodos de Evaluación de Calidad de Aguas. Estandarización, Intercalibración, Resultados y Aplicaciones*. (G. Castillo, Ed.). Edición conjunta IDRC, SEMARNAT, IMTA, México, pp. 71-79.
- Sun, J.-H., Sun, S.-P., Wang, G.-L. y Qiao, L.-P. (2007). Degradation of azo dye Amino black 10B in aqueous solution by Fenton oxidation process. *Dyes and Pigments*, 74, 647–652. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.04.006>
- Vedaraman, N., Shamshath-Begum, S. y Srinivasan, S. V. (2013). Response surface methodology for decolourisation of leather dye using ozonation in a packed bed reactor. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 607–616. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0544-8>
- Zahrim, A.Y. y Hilal, N. (2013). Treatment of highly concentrated dye solution by coagulation/flocculation - sand filtration and nanofiltration. *Water Resources and Industry*, 3, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2013.06.001>