



## LAS NANOTECNOLOGÍAS Y LA REMEDIACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

**María José Soto Miranda**

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez  
sotomajo90@gmail.com*

**José Domingo Rafael Castañeda Olvera**

*Universidad Tecnológica Fidel Velázquez  
jdomingo.castaneda@utfv.edu.mx*

**Ángel de Jesús Morales Ramírez**

*Centro de Investigación e Innovación Tecnológica-CIITEC  
amoralesra@ipn.mx*

### Resumen

*El objetivo central de esta investigación es aportar elementos para la investigación sobre la degradación de moléculas contaminantes presentes en cuerpos de agua a través de procesos fotocatalíticos, haciendo uso de titanosilicatos zeolíticos microporosos. A partir de métodos de química suave, se analizaron las posibilidades de sujetar el fotocatalizador a perlas poliméricas o de sílice mediante técnicas de caracterización fisicoquímica y estructural para analizar las propiedades finales del producto. Sostenemos que la elaboración de precursores de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  por el método sol-gel permitirá desarrollar partículas con estructura zeolítica, capaces de degradar contaminantes recalcitrantes presentes en cuerpos de agua y coadyuvar, con ello, a su remediación.*

*Palabras clave: Remediación de agua, Contaminación de agua, Nanotecnologías, Química suave.*

La compleja problemática medioambiental contemporánea presenta un amplio abanico de escenarios. Uno de los más preocupantes es aquel que se relaciona con la contaminación de los distintos cuerpos de agua alrededor del mundo. En este escenario, se han desarrollado nuevas tecnologías tendientes a eliminar estos contaminantes. Algunas de estas tecnologías utilizan métodos avanzados de oxidación (AOP)

para la paulatina degradación de microcontaminantes. El objetivo central de esta investigación es lograr la degradación de moléculas contaminantes presentes en agua potable por medio de procesos fotocatalíticos. Buscamos la obtención de polvos fotocatalizadores de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) a partir de métodos de química suave.



## Problemática general del agua

Datos de la UNESCO aseguran que, alrededor del mundo, cerca de 2.000 millones de personas (el 26% de la población) no disponen de agua potable y 3.600 millones (el 46%) carecen de acceso a un saneamiento gestionado de forma segura; esto es resultado de la contaminación de una gran mayoría de los cuerpos de agua en el planeta: ONU-Hábitat asevera que dos tercios de los ríos transfronterizos mundiales poseen algún grado de contaminación y el 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas (ONU-Habitat, 2023).

La Organización Mundial de la Salud, por su parte, define al agua contaminada como aquella que sufre cambios en su composición hasta quedar inservible. Las principales fuentes contaminantes incluyen bacterias, virus, parásitos, fertilizantes, pesticidas, fármacos, nitratos, fosfatos, entre otros. Al ser estos elementos libres de coloración, la contaminación puede no ser visible en muchas ocasiones. Aunado a esto, se encuentran algunos elementos provenientes de la actividad industrial, como pesticidas, antibióticos, colorantes, etc. (Iberdrola, 2022).

En este escenario, se han desarrollado nuevas tecnologías tendientes a eliminar estos contaminantes. Algunas de estas tecnologías utilizan métodos avanzados de oxidación (AOP) para la degradación de microcontaminantes. Esta se alcanza por una fuente de luz con longitudes de onda ultravioleta por debajo de los 385 nm., generando especies oxidativas altamente reactivas para catalizar contaminantes orgánicos, destacando entre estos el método fotocatalítico (Sanaullah *et al.*, 2019).

Este método es utilizado principalmente para la síntesis de fármacos y compuestos agroquímicos presentes en distintos cuerpos de

agua (Yuhang, 2021). Estas reacciones pretenden ahorrar el consumo de energía y mejorar la seguridad de los procesos. En este caso, se hace uso de transformaciones químicas que no se encuentran disponibles en la naturaleza, por lo que la mineralización de ciertos componentes es mayor (Zhenghui, 2022).

La literatura ha mostrado la eficacia de algunas reacciones de oxidación con titanosilicatos microporosos, colocándose como alternativas para llevar a cabo reacciones de oxidación en diferentes procesos. Los materiales zeolíticos presentan estructuras cristalinas aplicables a procesos de catálisis, dentro de las utilidades que se les da a estos materiales es la obtención de esferas porosas de titanosilicatos (Joaquín *et al.*, 2008).

Derivado de lo anterior, planteamos como objetivo central de esta investigación lograr la degradación de moléculas contaminantes presentes en agua potable por medio de procesos fotocatalíticos, haciendo uso de titanosilicatos zeolíticos microporosos.

Para tal fin, utilizaremos titanosilicatos zeolíticos soportados o anclados a una superficie polimérica o de sílice, la cual actuará como base del fotocatalizador, cuyo fin es degradar contaminantes presentes en agua a alta velocidad, con la finalidad de que la molécula se degrade al pasar por un filtro de uso común. Buscamos la obtención de polvos fotocatalizadores de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  a partir de métodos de química suave; con base en ello, se analizarán los métodos para poder sujetar el fotocatalizador a perlas poliméricas o de sílice a través de técnicas de caracterización fisicoquímica y estructural para analizar las propiedades finales del producto.



## Contaminación de cuerpos de agua

Una de las problemáticas ambientales con mayores repercusiones a nivel socioambiental está íntimamente vinculada con las formas en la que, en las sociedades contemporáneas, se hace uso del agua. En este trabajo, nos enfocaremos en una de sus etapas finales: su tratamiento.

Desde diversas ciencias se han venido proponiendo estrategias para la sanitización del agua contaminada, estrategias que se vinculan con el tipo de contaminación de los cuerpos de agua, los volúmenes contaminados, así como en el uso que se le dará al agua tratada.

Un alto porcentaje de los contaminantes más dañinos obtenidos a partir de procesos industriales son vertidos en efluentes de agua, por lo que esta suele contener compuestos o impurezas que, al no ser eliminados, son altamente dañinos para los ecosistemas y, desde luego, para la salud humana. De ahí la propuesta del uso de catalizadores para la degradación de estos contaminantes, pues no son visibles a simple vista.

La seguridad en el tratamiento de los cuerpos de agua está íntimamente relacionada con los contaminantes microbiológicos y químicos que se encuentran en ella, destacando los disruptores endócrinos, colorantes y los fármacos como contaminantes prioritarios (Chávez-Lizárraga, 2018).

De acuerdo con la literatura, los principales contaminantes son: por sólidos y gases ionizados disueltos; por sólidos y gases no ionizados disueltos; por materia de partículas separables; por microorganismos; y por pirógenos (Sanaullah *et al.*, 2019).

La descontaminación del agua ha generado el desarrollo de tecnología para el tratamiento de

agua, cuyo fin es realizar análisis físicos, químicos y microbiológicos de esta para aumentar la disponibilidad del recurso.

Uno de los materiales más utilizados en el tratamiento de aguas es el  $\text{TiO}_2$ . Este compuesto es sintetizado con otros óxidos metálicos o usado como titanosilicatos para aumentar sus propiedades fotocatalíticas, contribuyendo a la degradación de plaguicidas, colorantes, cianuros y formaldehidos.

Puesto que se requiere tratamiento de aguas en un filtro de uso común, se requiere diseñar un sistema que permita captar la luz proveniente de la lámpara UV en el mismo e incrementar la efectividad del fotocatalizador, así como el sistema en el que está dispuesto.

## Tratamiento de cuerpos de agua

Los procesos de oxidación avanzada buscan la descomposición de la materia orgánica en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  mediante el uso de componentes oxidantes como el radical hidroxilo. Algunos de los tratamientos por este método son: fotólisis, fotocatalisis, electrólisis, entre otros (Palomo de la Fuente, 2020).

La fotocatalisis es un proceso avanzado de oxidación fotoquímica en el que se emplea un semiconductor, normalmente cerámico, que presente estas propiedades catalíticas (Lorenzano, 2019).

Los tratamientos para potabilizar el agua se pueden clasificar de acuerdo con los componentes o impurezas por eliminar, los parámetros de calidad y el grado de tratamientos de agua. Analizaremos la fotocatalítica.

## Fotocatálisis

Esta técnica de degradación es utilizada en el tratamiento de aguas residuales y aire contaminado, principalmente en la eliminación y/o mineralización de fenoles, plaguicidas y compuestos refractarios tóxicos. Su aplicación es necesaria cuando el contaminante no tiene la capacidad de capturar fotones por sí mismo (Moreno y Zapata, 2020). Se hace uso, entonces, de un catalizador capaz de acelerar la oxidación del contaminante, por medio de absorción de la radiación. Durante este proceso se llevan a cabo cambios energéticos a nivel molecular donde se producen los radicales hidroxilos, dando lugar a las especies reactiva y oxidante respectivamente (Gelover, 2010). Algunos de los fotocatalizadores más utilizados en la fotocatálisis heterogénea son:  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SbO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnS}$ , entre otros.

Debido a que el espectro de la luz visible tiene un rango de energía de  $2.2 \text{ eV}$  a  $3.2 \text{ eV}$ , y al requerir una longitud de onda para la activación del fotocatalizador entre  $564$  y  $388 \text{ nm}$ , es necesario diseñar semiconductores con bandas de energía en la visión visible del espectro solar ( $400 \text{ nm}$ ) (Quiroz, 2019).

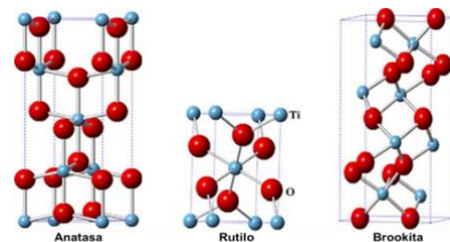
## Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ )

Por su parte, el  $\text{TiO}_2$  es el material más utilizado dentro de los procesos de oxidación avanzada. El  $\text{TiO}_2$  es un óxido metálico que posee propiedades fotoconductoras y fotocatalíticas cuando es excitado con luz UV en un rango de longitud de onda que va de los  $300$  a  $400 \text{ nm}$ . Debido a esta característica es utilizado en la degradación de colorantes sintéticos (Leguizamón *et al.*, 2010).

Este cerámico es un semiconductor anfótero del tipo n, es decir, puede reaccionar en una solución como ácido o como base. Además, se presenta en

tres diferentes fases cristalográficas: anatasa, rutilo y brookita (Figura 1), las dos primeras con estructura tetragonal, además un ancho de banda de  $3.2$  y  $3.0 \text{ eV}$  respectivamente, mientras que la última fase tiene una estructura ortorrómbica (Hernández, 2008).

Figura 1. Estructuras cristalinas de  $\text{TiO}_2$



Actualmente, se encuentra dentro de los semiconductores más investigados dentro de la mineralización de compuestos orgánicos, degradación de productos farmacéuticos y del teñido (Mejía, 2007). Se ha demostrado que, dentro de sus características, las que más sobresalen son: su inercia biológica y química, su estabilidad ante la fotocorrosión y la corrosión química, su poder oxidante y, sobre todo, su bajo costo (Shifu y Yunzhang, 2006).

En las últimas décadas se ha trabajado en la mejora efectiva de los fotocatalizadores. Entre las opciones más utilizadas se encuentran el dopaje, la síntesis con otros semiconductores e, inclusive, la síntesis con materiales adsorbentes que ayuden a modificar sus propiedades; entre estos, se encuentran la sílice, las zeolitas, diversos polímeros, etc.

Los sitios aislados son conocidos como la fase activa de los catalizadores heterogéneos, por lo que la reducción de tamaño de la partícula se vuelve de mayor interés. Mediante la síntesis de titanosilicatos se busca obtener una mayor



selectividad del producto, estabilidad y rendimiento (Prada, 2021).

El uso de los precursores de titanio y silicio permiten obtener materiales zeolíticos que presentan estructuras cristalinas constituidas por canales y cavidades moleculares, los cuales permiten llevar a cabo procesos de intercambio iónico, adsorción y catálisis, obtenidos a partir de un tratamiento hidrotérmico con un control de temperatura, tiempo de reacción y agitación de los precursores (Hernández, 2020).

Los titanosilicatos consisten en unidades tetraédricas de  $\text{SiO}_4$  y poliedros  $\text{TiO}_n$  ( $n=5, 6$ ). Su manera de conexión determina el tipo de topología de la estructura. Los átomos de titanio incorporados en la estructura pueden tener coordinación tetraédrica ( $\text{TiO}_4$ ) octaédrica ( $\text{TiO}_6$ ), pentaédrica o combinaciones de las anteriores. Al igual que las zeolitas, en su estructura hay cationes para compensar la carga negativa de la estructura y moléculas de agua (Joaquín *et al.*, 2008).

El descubrimiento de este nuevo grupo de prometedores materiales ha estimulado los esfuerzos para la síntesis de nuevos titanosilicatos con propiedades ácido-base y estéricas adaptadas a nuevas aplicaciones. La optimización de las propiedades de los titanosilicatos conocidos y el desarrollo de nuevas estructuras titanosilíceas se facilita mediante el entendimiento de sus estructuras cristalinas, de las geometrías de coordinación y configuración de los enlaces Ti-Si en la estructura de enlaces covalente.

Las aplicaciones tradicionales de los sólidos porosos incluyen intercambio iónico, adsorción (para separación) y catálisis, además surge el interés en trabajar con los mismos debido a su capacidad para interactuar con otros átomos en la mayor parte del material (Romero, 2013).

La distribución de tamaños, formas y volumen de los espacios porosos en estos materiales determina su capacidad para desarrollar la función deseada más adelante (Leguizamón *et al.*, 2010). En la actualidad, muchas investigaciones se centran en conseguir la uniformidad del tamaño, forma y volumen de los poros para dirigir estos materiales a propiedades de aplicación superiores (Prada, 2021). Dentro de estas, se encuentra la separación y degradación de contaminantes presentes en cuerpos de agua, entre los que destacan los pesticidas y colorantes textiles como el naranja de metilo o azul de metileno (Romero, 2013).

Estos sólidos porosos suelen estar constituidos por compuestos como la sílice y la titanía, los cuales crean materiales cristalinos como las zeolitas, los cuales permiten que el contaminante entre en contacto con un área superficial mayor, lo cual potencia la degradación de estos contaminantes.

Es por ello por lo cual se utilizan moléculas modelo como la del azul de metileno, estas altamente estudiadas por su composición química y estructural. Al tener una estructura química tres anillos aromáticos, resulta difícil su degradación por métodos naturales.

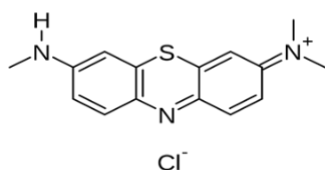
### **Azul de metileno**

El azul de metileno es un colorante en forma de polvo cristalino de color verde oscuro e inodoro, del tipo azo o xenobióticos. Tiene una masa molecular de  $373.9 \text{ g mol}^{-1}$ , es altamente estable en el aire y al ser disuelto en agua tiñe la solución de color azul. Es usado en la industria textil para el teñido de prendas, además es usado como un agente antipalúdico y tinte (Pawar y Lee, 2015).

La degradación del azul de metileno como colorante sintético parte de la ruptura de sus

enlaces más débiles, por lo que la molécula de este compuesto disminuye su complejidad. A partir del tiempo en contacto con un catalizador y la luz UV, se lleva a cabo la degradación del material por fotocatalisis (Quiroz, 2019) (Figura 2).

Figura 2. Estructura molecular de AM



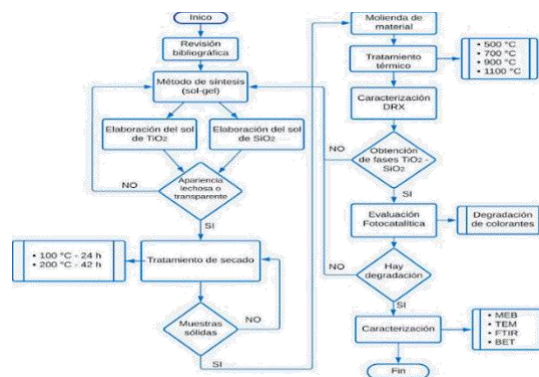
El azul de metileno, en solución acuosa, se degrada cuando entra en contacto con una superficie fotocatalíticamente activa mediante irradiación UV (natural o artificial). El colorante, al ser considerado dentro del grupo de los fotosensibilizadores, tiene una excitación por la luz UV en el intervalo de 585 a 670 nm, con un máximo de absorbancia ( $\lambda_{max}$ ) en 664 nm (Stick y Blanco, 2017).

### Metodología

En este trabajo se llevó a cabo la elaboración de los soles, usando como precursores al  $TiO_2$  y el  $SiO_2$ .

La metodología consta de diferentes etapas que es necesario seguir para llevar a cabo la elaboración y caracterización de las zeolitas (Figura 3).

Figura 3. Metodología



Para comenzar se elaboraron diferentes muestras, siguiendo parámetros de síntesis, caracterización y evaluación fotocatalítica de óxidos mixtos titanio-silicio (Tabla 1).

Tabla 1. Reactivos para la elaboración de titanosilicatos

Titanosilicatos	Cantidades	Degradación
Fuente de Silicio - TEOS	<b>ETAPA 1 Hidrolización del TEOS</b>	Fotocatalisis de metanol con 3 lámparas de luz negra de 4 w
Fuente de Titanio - etóxido, isopropóxido y butóxido.	TEOS: $H_2O = 1:20$	
Solventes - etanol, isopropanol	TEOS: Solvente = 1:8	
	TEOS: $HCl = 1:0.4$	
	<b>ETAPA 2 Hidrolización del alcóxido</b>	
	Ti (OR) <sub>4</sub> : $H_2O = 1:12$	
	Ti (OR) <sub>4</sub> : Solvente = 1:14	
	Ti (OR) <sub>4</sub> : $HCl = 1:1$	

### Proceso de síntesis por etapas

Se llevó a cabo la revisión de la reactividad entre el TEOS y el alcóxido de titanio durante la hidrólisis y la condensación durante la elaboración del sol-gel. El proceso de hidrólisis de cada alcóxido es realizado por separado.

En cada etapa, se mezcló el solvente orgánico HCl, se adicionó a este sol agua destilada mezclada con HCl, gota a gota. El tiempo de gelación se determinó en 14 h. (procedimiento por separado).

Una vez obtenidos ambos soles, el sol de TEOS se adicionó al sol del alcóxido para formar un sol



transparente de  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ . Estos fueron mezclados posteriormente durante 1 h; la solución se llevó al horno a  $65\text{ }^\circ\text{C}$  con la finalidad de obtener un gel transparente. Posteriormente, el gel llevó un proceso de secado a  $110\text{ }^\circ\text{C}$  para obtener un xerogel. Por último, el xerogel se sinterizó a  $500\text{ }^\circ\text{C}$  durante dos horas para obtener los óxidos mixtos de  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ .

Cabe mencionar que este proceso de síntesis se llevó a cabo para cada una de las muestras realizadas.

De acuerdo con los cálculos realizados para llevar a cabo esta síntesis se obtuvieron las siguientes relaciones en volumen de cada uno de los reactivos utilizados. En la primera etapa, se trabajó con el sistema  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  y de  $\text{TiO}_2\text{-2SiO}_2$ ; las cantidades en el segundo caso se multiplican por la cantidad de moléculas a utilizar (Tabla 2).

Tabla 2. Volumen de reactivos a utilizar

TiO <sub>2</sub>	
Reactivo	Cantidad (mL)
Butóxido de Titanio	15.29
Isopropanol	48
Agua	9.72
Ácido clorhídrico	0.11
SiO <sub>2</sub>	
TEOS	10
Isopropanol	16
Agua	26.9
Ácido clorhídrico	0.00044

Las etapas realizadas fueron las siguientes:

- Elaboración de soles  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ . En este caso se elaboraron por separado los soles para la obtención de cada uno de los compuestos.
- Las mezclas realizadas llevan un tiempo de agitación de 24 h c/u. Al final del tiempo de agitación se observó que en uno de los soles de  $\text{SiO}_2$ , tuvo lugar la evaporación de este y a su vez hubo una aligera formación de cristales

- Una vez transcurrido el tiempo de agitación se procedió a realizar la mezcla de precursores

- En este caso se observó cómo se llevó a cabo el mezclado de cada uno de los geles, dándole una apariencia lechosa y espesa en el caso de la muestra de  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ .

- Una vez obtenidos estos resultados, se optó por realizar dos muestras diferentes, en este caso se realizó únicamente el sol del precursor de Ti, esto con la finalidad de observar la fase que se obtiene sin el segundo precursor.

- En este caso, se observó el sol con una coloración transparente y amarillenta, dada por el butóxido de titanio. Se procedió a dejar en agitación por 24 h para lograr la incorporación de todos los componentes.

- A cada una de las muestras obtenidas se les dio un tratamiento de secado de 24 h a  $100\text{ }^\circ\text{C}$

- Los tratamientos térmicos se llevaron a cabo por 2 h a las siguientes temperaturas: 500, 700, 900 y  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , todas estas para las muestras obtenidas.

### Degradación por fotocatalisis

El procedimiento para la elaboración de las pruebas fotocatalíticas de acuerdo con la norma NMX-C-516-ONNCCE- 2016, los productos fotocatalíticos requieren ser evaluados a una concentración de azul de metileno a  $20\text{ }\mu\text{m}$ , como se describe a continuación:

- Pesaje de polvo (2 g) y medición de azul de metileno (20 mL) en un vaso de precipitado.
- Mantener agitación de la muestra en oscuridad por 30 minutos para evitar desorción en la medición. Una vez transcurrido el periodo en

oscuridad la muestra es irradiada con la lampara de luz UV.

- Cada 20 minutos durante 2 h se toma una alícuota de 6 mL de la muestra original expuesta a radiación UV, con ayuda de una pipeta graduada y la perilla de 3 vías. Las muestras son centrifugadas para lograr la sedimentación del polvo.

Polvo cohesivo: centrifugar 10 - 15 minutos

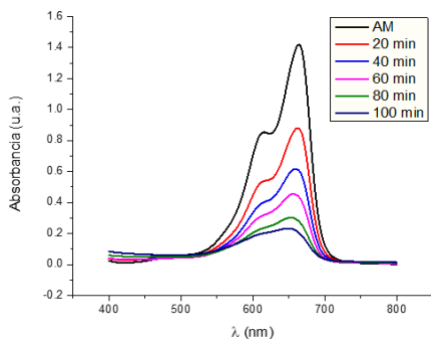
Polvo no cohesivo: centrifugar 5 minutos

- Una vez centrifugada la muestra, se coloca en una celda de vidrio y se analizan en el espectrofotómetro UV-Vis, calibrado a una longitud de onda entre 400 y 800 nm. El pico más alto de la curva de degradación corresponde a la longitud de onda en la que degrada el reactivo a degradar (AM: 665nm).

$$\text{porcentaje de degradación} = \frac{\text{absorbancia final}}{\text{absorbancia inicial}} \times 100$$

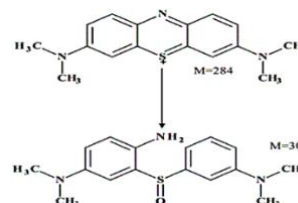
Para analizar el porcentaje de degradación de AM en solución acuosa, se hace uso de la gráfica de absorbancia obtenida, con los datos arrojados a una longitud de onda de 665 nm, intensidad a la que se degrada el AM (Figura 4).

Figura 4. Degradación de AM (referencia)



La degradación del colorante se muestra como la estructura química tienen un rompimiento en sus enlaces más débiles (Figura 5).

Figura 5. Degradación de la película de AM



En el estudio realizado se lleva a cabo la ruptura del primer enlace de la molécula del AM, este correspondiente al que le da coloración al contaminante.

## Conclusiones

Las muestras obtenidas hasta el momento se presentan como polvos finos con coloración blanca con forme aumenta la temperatura de tratamiento térmico.

Los tratamientos de secado pueden variar entre los 100 y 200 °C, por lo que es necesario realizar evaluaciones respecto a la humedad de las muestras.

Se realizaron tratamientos térmicos a diferentes temperaturas, las cuales van desde los 500 hasta los 1100 °C. cada una de ellas analizada por difracción por rayos x. siendo amorfas en cada caso las muestras de menor temperatura.

Los compuestos obtenidos en las fases abarcan TiO<sub>2</sub> en fase anatasa y rutilo, al igual que SiO<sub>2</sub> en fase tridimita y zeolita.

La degradación de AM por fotocatalisis arroja que hay muestras que degradan hasta el <90% del colorante.





## Referencias

- Chávez-Lizárraga, G. (2018). Nanotecnología, una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas, *Selva Andina Res. Soc.*, 9(1): 52-61.
- Gelover, S. (2010). *Eliminación de contaminantes orgánicos emergentes mediante fotocátalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub>, empleando luz solar*. México: Coordinación de tratamiento y calidad del agua.
- Hernández J. (2008). Síntesis y caracterización de nanopartículas de N-TiO<sub>2</sub>-Anatasa, *Sociedad mexicana de Ciencia y tecnología, Superficies y vacío*, 21(4): 1-25.
- Hernández, J. (2020). *Catalizadores micro y nanoestructurados para la oxidación de hidrocarburos y producción de hidrógeno*. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad d' Alacant.
- Iberdrola (2022). *La contaminación del agua: cómo no poner en peligro nuestra fuente de vida*. Disponible en <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-agua#:~:text=Los%20principales%20contaminantes%20del%20agua,fecales%20y%20hasta%20sustancias%20radioactivas>
- Joaquín, C., Santamaria, R. y Téllez, A. (2008). *Procedimiento de obtención de esferas de titanio silicatos*, España: Patente N° WO 2008/119856 A1.
- Leguizamón, J., Quiñones, C. y Espinosa, H. (2010). TiO<sub>2</sub> photosensibilization with a commercial dye for photodegradation of organic water pollutants, *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica* 45: 185-210.
- Lorenzano, B., Márquez, K. y Yáñez R. (2019). Reactor para tratamiento de aguas residuales por fotocátalisis heterogénea, *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales* 6(2), 145-167.
- Mejía, M. (2007). Incremento de la sensibilidad espectral del TiO<sub>2</sub> mediante modificación química con Fe<sup>3+</sup> y Al<sup>3+</sup>, *Scientia et Technica* 13(36): 26-34.
- Moreno, X. y Zapata, A. (2020). Fotocátalisis heterogénea alternativa para tratar aguas contaminadas con metomil en el municipio de Urao, *Antioquía* 14: 33-58.
- ONU-Habitat (2023). Agua y saneamiento. Disponible en <https://unhabitat.org/es/node/3761>
- Palomo de la Fuente, E. (2020). *Diseño y optimización de reactores compactos para el tratamiento de aguas residuales por fotocátalisis con nanotubos de TiO<sub>2</sub>*. Proyecto Fin de grado (UPM), Madrid.
- Pawar, R. y Lee, C. (2015). Heterogeneous Nanocomposite-Photocatalysis for Water Purification, *Heterogeneous Photocatalysis* 24(5): 345-367.
- Prada, A. (2021). *Evaluación de la efectividad del uso del fotocatalizador TiO<sub>2</sub> para la remoción de gases contaminantes tipo NO<sub>x</sub> en el aire*. Colombia: Fundación Universidad de América.
- Quiroz, X. (2019). *Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO<sub>2</sub> dopado con Mn<sup>2+</sup>*. Tesis de Maestría. México: UNAM.
- Romero, D. (2013). *Desarrollo de Fotocatalizadores TiO<sub>2</sub> Dopados con Tierras Raras y su Aplicación en la Oxidación de  $\alpha$ -Metiltestosterona*. Chihuahua: CIMAV.
- Sanaullah K., Murtaza S., Sohail, M., Luqman A. y Mazhar A. (2019). Advanced Oxidation and Reduction Processes, *Advances in Water Purification Techniques*, 135-164.
- Shifu, C. y Yunzhang, L. (2006). Study on the photocatalytic degradation of glyphosate by TiO<sub>2</sub> photocatalyst, *Chemosphere* 1011: 345-356.
- Stick, F. y Blanco, B. (2017). *Decoloración y degradación de azul de metileno presente en*



*agua*. Colombia: Departamento de Ingeniería Ambiental.

Yuhang Ch. (2021). Tuning the gas-liquid-solid-segmented flow for enhanced heterogeneous photosynthesis of Azo- compounds, *Chemical Engineering Journal*, 156-178.

Zhenghui W. (2022). Membrane-based TBADT recovery as a strategy to increase the sustainability of continuous-flow photocatalytic HAT transformations, *Nature communications*, 89-110