

# Caracterización físico-química de materiales microporosos y evaluación de sus propiedades catalíticas

Sánchez Viveros José Manuel<sup>1\*</sup>, Zacahua Tlacuatl Gregorio<sup>2</sup>, Hernández Pérez Isaías<sup>3</sup>,  
Chávez Rivas Fernando<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ESFM-IPN, Departamento de Física, Av. IPN S/N, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C. P. 07738, México.

<sup>2</sup>ESIQIE-IPN, Laboratorio de Posgrado, Av. IPN S/N, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C. P. 07738, México.

<sup>3</sup>UAM, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C. P. 02200, México.

\*Autor para correspondencia: sac\_viveros@yahoo.com.mx

## Recibido:

16/junio/2017

## Aceptado:

31/agosto/2017

## Palabras clave

Fotocatálisis, absorción atómica, rayos X

## Keywords

Photocatalysis, atomic absorption, X-ray

## RESUMEN

Se presenta la caracterización por difracción de rayos X y espectroscopía de absorción atómica de zeolitas calcinadas, provenientes de Etna, Oaxaca. También se lleva a cabo un estudio de prueba catalítica en la fotodegradación del colorante negro reactivo 5. El análisis de las señales de difracción de rayos X de las zeolitas, muestran corrimientos hacia ángulos mayores y/o menores de las fases, esto se asocia a cambios del volumen de la celda. Por medio de absorción atómica se identificó que los elementos Ca, Mg, Fe, Si y Al están presentes en las zeolitas. El estudio de las propiedades catalíticas de las zeolitas, se basó en la reacción de fotodegradación del colorante, a través de espectroscopía de UV-vis, particularmente fue monitoreada la disminución de las bandas características de absorción, en 595 y 310 nm. Se encontró que las muestras calcinadas a temperaturas altas tienen mayor eficiencia fotodegradante, ya que el tratamiento térmico mejora el proceso de catálisis de la reacción hasta la temperatura de 500 °C, mientras que a temperaturas mayores su efecto es contrario.

## ABSTRACT

In this work, X-ray diffraction and atomic absorption spectroscopy of calcined natural zeolites, from Etna, Oaxaca, is reported. Photodegradation reaction of reactive black 5 dye is studied with goal to have a catalytic test. Patterns X-ray diffraction of zeolites shows that peaks shifts towards major and/or minor angles, this indicate that there are changes in volume of unit cell. By using atomic absorption spectroscopic it is identified the chemical elements of Ca, Mg, Fe, Si and Al as characteristic constituents of the zeolites. Study of catalytic properties of the natural zeolites was carried out in the degradation photoreaction of dye, through UV-vis spectroscopy the reduction of characteristic absorption bands was monitored at 595 and 310 nm. It was found that calcined zeolites at high temperatures have higher photodegradation efficiency, due to the thermal treatment that improves catalysis process of chemical reaction until the temperature of 500 °C, while at higher temperatures its effect is reverse.

## Introducción

Las zeolitas naturales son minerales cristalinos que están basados en estructuras de aluminosilicatos, los cuales tienen cavidades y canales bien definidos, que alojan moléculas de agua, iones alcalinos y alcalinotérreos (Na, K, Ca, Mg) en su interior; el contenido de cationes en las zeolitas, hace posible el intercambio iónico con otros cationes metálicos como la plata, oro, cobre níquel, entre otros, lo que posibilita que exista una apreciable recuperación de materiales valiosos (Wang y Peng, 2010). Debido a su gran porosidad (microporos), las zeolitas tienen una gran área superficial interna, que contribuye a mejorar su capacidad de adsorción, haciendo que su utilidad sea ampliamente conocida y sea ocupada para adsorber metales pesados como arsénico, plomo, cromo (Erdem et al., 2004). En el área de catálisis, su uso está mermado, debido al alto contenido de impurezas como feldespatos, óxidos de hierro, cuarzo, etc.; esta desventaja es considerable, por el hecho de que es necesario implementar procesos físico-químicos para purificar el mineral, provocando que su precio se eleve en el mercado y, no pueda competir con los catalizadores convencionales como el titanio, platino y paladio, que tienen ventajas superiores a las zeolitas naturales (Bosch y Shifter, 2003).

Por otro lado, el estudio de la degradación de tintes orgánicos de origen textil es de vital importancia, por el hecho de que impacta negativamente al medio ambiente y afecta el entorno sociodemográfico. Las industrias textiles son responsables de la contaminación de mantos acuíferos (ríos, lagos, lagunas, mares) por el vertido descontrolado de sus desechos. En la actualidad se descargan más de 150 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales al año (Ip et al., 2010), mientras que la producción anual de tintes es de 700 mil toneladas a nivel mundial. Aproximadamente el 2% (>14000 ton) proceden de procesos de fabricación (Easton, 1995); y alrededor del 9% (> 63000 ton), son derivados de la industria del color, los cuales se vierten continuamente en efluentes naturales, dando un total de casi 80 mil toneladas (Brown, 1987).

En los últimos años ha crecido el interés de buscar mejores métodos para degradar compuestos recalcitrantes, ya que los métodos tradicionales como: coagulación, osmosis inversa, floculación y adsorción con carbón activado; además de ser costosos, sólo generan un cambio de fase del contaminante, pero no logran transformarlo en un componente menos reactivo (Gohardshadi et al.,

2011; Pandey et al., 2007). Los tratamientos biológicos no son muy eficientes, porque la estructura del tinte es muy compleja y, se propicia la formación de compuestos intermediarios tales como las aminas aromáticas (Singh y Arora, 2011), que son muy tóxicas y producen cáncer de vejiga (Yazdanbakhsh et al., 2011). La fotocatalisis heterogénea es considerada como la alternativa del futuro de bajo costo, para la remediación de aguas contaminadas (Li et al., 2004).

Los colorantes azo se identifican por tener uno o más grupos azo, que consisten en dos átomos de nitrógeno unidos por un doble enlace (-N=N-), que corresponden a la clase más grande empleada en la industria textil. Adicionalmente, estos compuestos orgánicos, son los más problemáticos en la contaminación de ríos, lagos y mares (Lucas y Peres, 2006); por esa razón, en este estudio, se seleccionó el colorante negro reactivo 5 (RB5, por sus siglas en inglés) como contaminante representativo, con el propósito de removerlo del agua con ayuda conjunta de zeolitas naturales, radiación UV y radicales •OH.

En este trabajo, se determinan las características físico-químicas de materiales microporosos, de la familia de las zeolitas naturales, a través de las técnicas de difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía (AAS), además se describen sus propiedades de catálisis, cuando se emplea como catalizador en la reacción de óxido-reducción, del colorante orgánico textil RB5, en presencia de radiación ultravioleta ( $\lambda = 365, 302$  y  $254$  nm, respectivamente).

## Metodología

### Materiales

Las zeolitas en forma de rocas, se extrajeron del yacimiento de Etna, Oaxaca, México. Posteriormente se molieron en un mortero de cerámica hasta obtener polvos finos, los cuales fueron tamizados en una malla No. 150 (105  $\mu$ m de diámetro de partícula), y se clasificaron en cuatro conjuntos; tres de ellos, se sometieron a tratamientos térmicos de 250, 350 y 500°C, respectivamente, quedando uno solo como referencia (la muestra sin calcinar, 25 °C), el tiempo del proceso de calentamiento de las tres muestras, fue de cuatro horas en atmósfera de aire y presión atmosférica de la ciudad de México (P = 585 mmHg). El colorante RB5 (Figura 1) fue obtenido de la compañía química Sigma Aldrich (No. CAS: 17095-24-8).

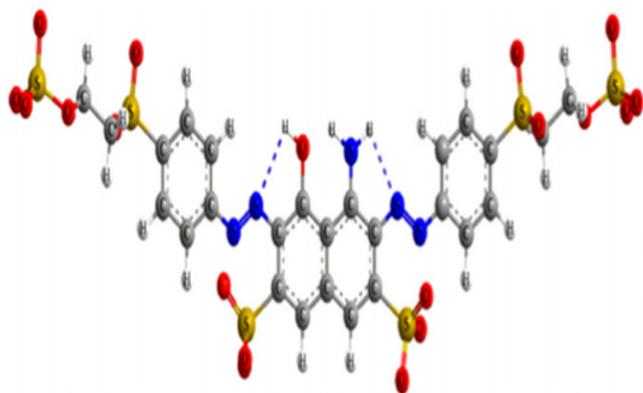


Figura 1. Estructura molecular del colorante negro reactivo 5 (Ip et. al., 2010).

### Caracterización

La técnica analítica de DRX se utilizó para determinar el contenido de las fases mineralógicas de las zeolitas naturales, además fue llevado a cabo un análisis elemental por medio de espectroscopía de absorción atómica, mientras que la evaluación de sus propiedades catalíticas fue monitoreada con la reacción de descomposición del RB5 por espectroscopía UV-vis.

### Difracción de rayos X

Los patrones de difracción de las zeolitas se llevaron a cabo en un difractómetro de polvos Rigaku modelo Miniflex 600, con un monocromador de grafito, usando radiación tipo  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), con un potencial eléctrico de 40 kV e intensidad de corriente de 15 mA; el tamaño de paso se fijó en  $0.001^\circ$  y la velocidad de barrido fue de  $2^\circ/\text{min}$ , en un intervalo de la posición angular de  $5^\circ$  a  $40^\circ$ .

### Espectroscopía de absorción atómica

La determinación composicional química de los materiales se llevó a cabo con un espectrómetro de absorción atómica Pekín Elmer Analyst 200. Previo al análisis, las zeolitas se tuvieron que cribar con una malla No. 150 (U.S. Standar Sieve), los polvos obtenidos fueron activados en un horno a una temperatura de 300 a 350 °C durante 3 horas, además las mediciones fueron hechas por triplicado y, se reportan en porcentaje de óxidos metálicos, la preparación de las muestras se basa en el método de determinación de metales en arcillas descrito en (Sánchez, 2017).

### Evaluación catalítica

El empleo de zeolitas naturales calcinadas a 250, 350 y 500 °C y la muestra referencia, en la reacción de

oxidación del colorante orgánico RB5, fue llevado a cabo en un reactor intermitente; el cual fue irradiado durante 3 horas, con diferentes fuentes de luz UV ( $\lambda = 365, 302$  y  $254 \text{ nm}$ ).

### Espectroscopía UV-vis

Para seguir el curso de la reacción de fotocatalisis se empleó un espectrómetro UV-vis Varian, Cary 1G, con lámpara de Tungsteno y Deuterio, en un rango de longitud de onda de 900 a 190 nm, con velocidad de barrido constante de 600 nm/min, y una precisión de  $\lambda \pm 0.2 \text{ nm}$  (Zhan et. al., 1998).

### Reacción de fotodegradación

Las condiciones del sistema de reacción consisten en preparar una disolución de colorante RB5 de 100 ppm en un volumen de 250 mL de agua destilada, agregando 50 mg de muestra de zeolita, manteniendo agitación constante de 360 rpm; el pH se fijó en un rango de 2.5 a 3 al adicionar 7 gotas de HCl 2 N; para comenzar y activar la reacción, se agregaron 0.5 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e inmediatamente se prendieron las 2 lámparas UV (Figura 2).

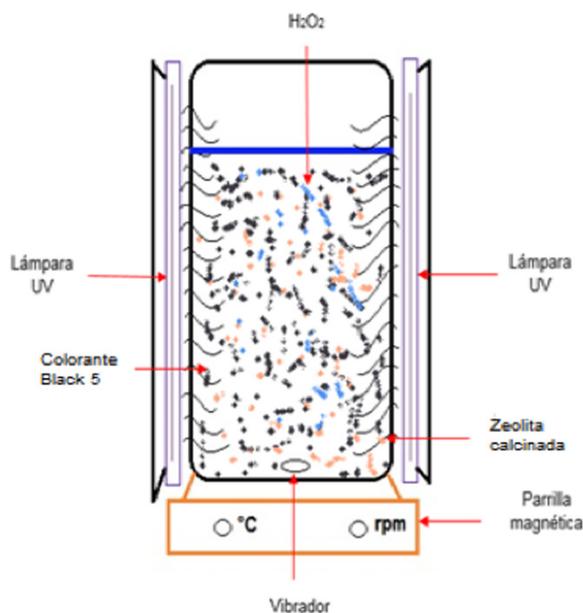


Figura 2. Esquema elemental del reactor foto-catalítico.

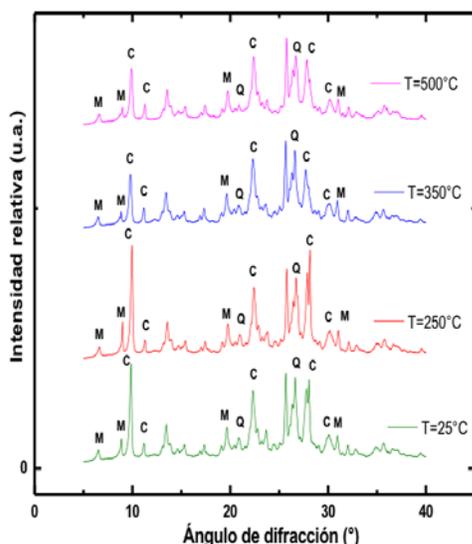
## Resultados y discusión

### Caracterización estructural

El difractograma de rayos X de la muestra de referencia y las muestras calcinadas a 250, 350 y 500 °C, se presenta en la Figura 3. En base a las cartas de difracción del ICDD

(International Centre for Diffraction Data) se identificó que el conjunto de muestras zeolíticas son cristalinas y está compuesto por las fases de clinoptilolita (025-1349), mordenita (60-239) y cuarzo- $\alpha$  (033-1161).

El patrón de difracción contiene una componente amorfa acentuada en el rango de 18 a 32° (2 $\theta$ ), que tiene forma de bulto no uniforme, situada debajo de las señales de difracción, principalmente está constituida de SiO<sub>2</sub> (vidrio), que al no tener un orden regular de sus átomos, no puede difractar los rayos X; mientras que la clinoptilolita, mordenita y cuarzo- $\alpha$ , si lo pueden hacer, por que su estructura cumple la ley de Bragg, es decir, sus átomos llevan un orden periódico, y esto, se evidencia cuando aparecen bandas estrechas, afiladas e intensas, en el difractograma de la muestras.



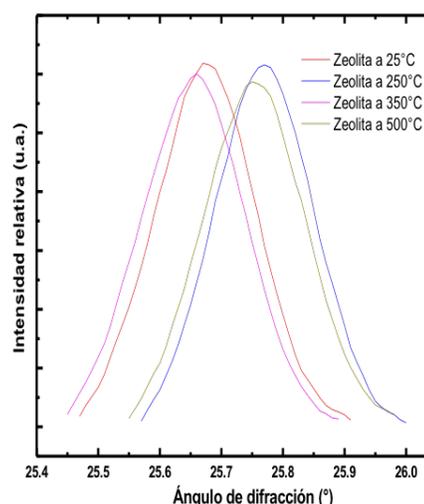
**Figura 3.** Patrones DRX de las muestras zeolíticas a 25, 250, 350 y 500 °C, respectivamente. Con las fases identificadas como: M = Mordenita, C = Clinoptilolita y Q = Cuarzo- $\alpha$ .

Las fases cristalinas mayoritarias corresponden a la clinoptilolita y mordenita; y la fase no zeolítica asociada al cuarzo- $\alpha$  se halla en menor proporción, las señales de difracción no señaladas se asocian a otras fases tales como: feldspatos y heulandita (Zacahua, 2011). No fue posible determinar señales asociadas a óxidos de hierro, aunque hay evidencia experimental de la presencia de estas especies en las zeolitas (Sánchez, 2017), debido a pruebas fotocatalíticas realizadas previamente con esos materiales.

A las temperaturas de 250 y 350 °C no hay efectos considerables en la intensidad de las señales, pero a la temperatura de 500 °C, se muestra una disminución en la intensidad de las señales principales de la clinoptilolita.

Los procesos térmicos aplicados a la muestra original (sin calcinar) ocasionan varios efectos, tales como: a) transformación de una fase hacia otra, b) colapso estructural, y c) aumento de la componente amorfa o disminución de la fase cristalina (Cruciani, 2006).

El ancho de la línea base en 2 $\theta$  = 18 – 32° de la muestra tratada a 500 °C, incrementa respecto a la muestra referencia, esto es, indicativo de un proceso de amorfización de la estructura cristalina de la zeolita. También se observan ligeros cambios en las posiciones angulares de las señales (ver Figura 4), esto se puede relacionar principalmente con la remoción de moléculas de agua, que se encuentran adsorbidas en la superficie del mineral y adentro de la celda unitaria, ubicadas en los canales y cavidades de la zeolita, es decir, el material sufre un proceso de deshidratación (Gottardi y Galli, 1985), lo que ocasiona una disminución en el volumen o una contracción de la celda.



**Figura 4.** Movimiento relativo de la señal en 2 $\theta$  = 25.63° de la fase mordenita, en función del tratamiento térmico aplicado.

En la Figura 4, se aprecia los cambios de la posición de una señal de la fase mordenita en función de la calcinación, los desplazamientos de las muestras calcinadas ocurren hacia a ángulos mayores y menores con respecto a la muestra referencia, indicando que ocurren variaciones en el volumen de la celda unitaria, debido a los procesos de deshidratación-hidratación que sufre el material.

En la Tabla 1 se muestran los desplazamientos relativos de dos señales correspondientes a la fase mordenita;  $\Delta 2\theta$  representa la variación relativa, obtenidas de la resta de las posiciones máximas de las señales de las muestras calcinadas, con respecto al punto central de la señal de la muestra referencia.

**Tabla 1.** Desplazamientos de señales de la fase mordenita, en función de la temperatura de calcinación.

Muestra	Pico 1 (°)	$\Delta 2\theta$ (°)	Pico 2 (°)	$\Delta 2\theta$ (°)
Zeolita de referencia	6.51	-	25.67	-
Zeolita a 250 °C	6.61	0.10	25.77	0.10
Zeolita a 350 °C	6.49	-0.02	25.66	-0.01
Zeolita a 500 °C	6.59	0.08	25.75	0.08

La posición relativa de las dos señales se fija en la muestra referencia. Para la zeolita tratada a 250 °C, ocurre un corrimiento de las señales hacia ángulos mayores, con un  $\Delta 2\theta = 0.1^\circ$  como promedio; cuando se trata de la zeolita a 350 °C, las señales regresan a su posición original, y para la muestra a 500 °C, el desplazamiento de las señales, fue el mismo que se obtuvo para la muestra de 250 °C, pero con  $\Delta 2\theta$  ligeramente menor, todo esto indica, que ocurren cambios en la celda de la mordenita.

### Análisis químico

La composición elemental de las muestras zeolíticas se presenta en forma de óxidos en la Tabla 2, todos los valores son reportados en porcentaje en peso (%wt). Como se puede apreciar, las muestras contienen al Silicio, en un orden del 50%wt, en forma de  $\text{SiO}_2$ , y también Aluminio del orden de 13%wt, en forma de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Las zeolitas cuentan con un carácter alcalinotérreo, debido a la presencia de átomos de calcio y magnesio, cuya composición es baja (~ 2%wt) al igual que los átomos de hierro (~2.5%wt); esto es así, porque el mineral está compuesto de las fases cristalinas de la clinoptilolita y la mordenita, las cuales están basadas exclusivamente en tetraedros de silicio y aluminio unidos a átomos de oxígeno, por esa razón son los componentes mayoritarios.

Las proporciones de hierro, calcio y magnesio son minoritarias (alrededor del 2%wt), ya que se encuentran como cationes en los poros y canales de la estructura, y ayudan a compensar la carga negativa del tetraedro  $[\text{AlO}_4]^-$  con el objetivo de mantener neutra la red de la zeolita (Sánchez et al., 2016). Las pequeñas variaciones de las concentraciones de los metales, en las cuatro muestras de zeolitas, puede deberse a que son altamente no homogéneas.

**Tabla 2.** Composición química de las muestras zeolíticas obtenidas por la técnica de absorción atómica.

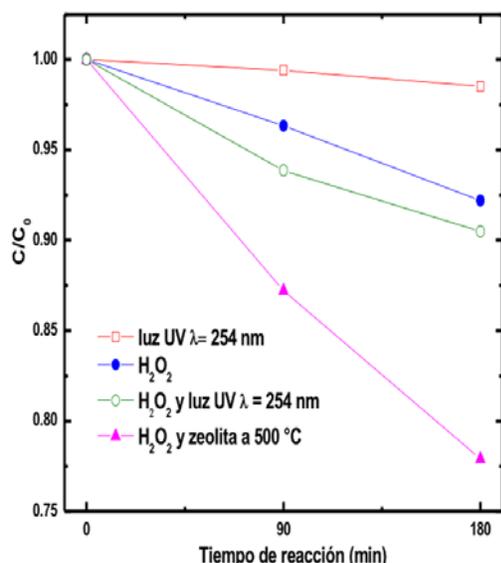
Composición	Zeolita de referencia	Zeolita a 250 °C	Zeolita a 350 °C	Zeolita a 500 °C
$\text{SiO}_2$ (%wt)	51.77	51.18	59.61	55.30
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%wt)	12.60	12.52	13.89	13.80
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%wt)	2.57	2.55	2.39	2.52
CaO (%wt)	2.34	1.94	1.76	1.81
MgO (%wt)	1.65	1.45	1.60	1.30

### Reacción fotocatalítica del RB5

El espectro UV-vis del colorante RB5 tiene 2 bandas características de absorción (ver Figura 9), localizadas en 595 y 310 nm. La banda en 595 nm en la región visible, es característica del cromóforo que contiene el sistema  $\pi$  conjugado, enlazados por dos grupos N=N (azo), responsable de la propiedad del color. La banda de absorción en 310 nm en la región UV, es característica de la estructura aromática del naftaleno, que es asociada a la transición  $\pi-\pi^*$  de los electrones (Gültekin y Ince, 2006; Song et. al., 2007).

La Figura 5 se construye tomando los valores de absorbancia en 595 nm en función del tiempo, seguido de esto, se transforman a valores de concentración (C) y se dividen entre el valor de la concentración inicial ( $C_0$ ), que corresponde a 100 ppm de RB5, en el tiempo  $t = 0$ . La razón  $C/C_0$  indica, cómo se va consumiendo el colorante en función del tiempo (t) de la reacción de decoloración del RB5.

De la Figura 5 se observa que, la línea roja con cuadros abiertos disminuye un 2% en 3 horas, esto indica que la radiación UV por sí sola ( $\lambda = 254$  nm) no es lo suficientemente energética para descomponer la molécula del colorante. Por otra parte, cuando se emplea  $\text{H}_2\text{O}_2$  (línea azul con círculos cerrados), la reducción de la concentración es del 8%, mientras que la acción conjunta del  $\text{H}_2\text{O}_2$ /UV contribuye con un descenso del 10%, lo que muestra que el peróxido es más reactivo que la luz en la degradación del RB5.

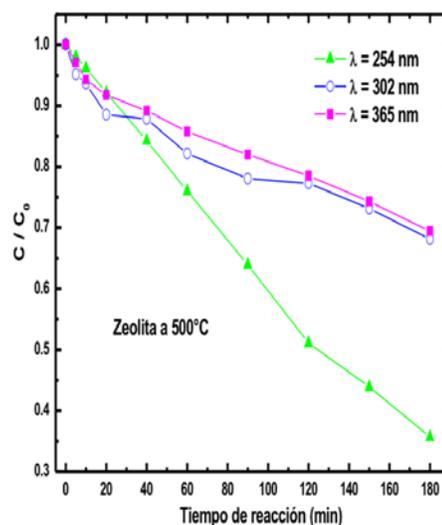


**Figura 5.** Perfiles de la variación de la concentración ( $C/C_0$ ) en función del tiempo, para la banda de 595 nm, usando diferentes parámetros en la reacción.

El empleo del sistema  $H_2O_2$ /zeolita (línea rosa con triángulos cerrados), mejora el proceso de degradación, alcanzando un 22% de la disminución de la concentración del RB5, lo que sugiere que la zeolita actúa como ente catalítico, acelerando la reacción y promoviendo una mayor degradación del compuesto orgánico, en comparación con los otros sistemas.

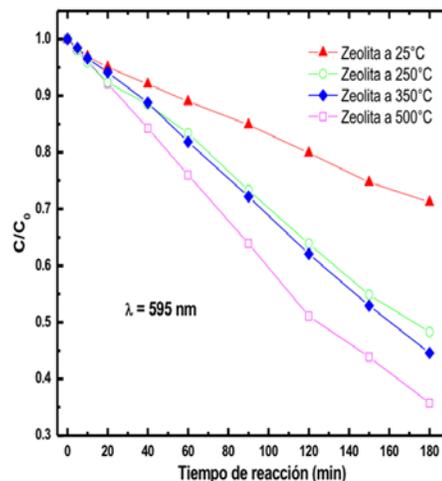
Las bandas de absorción de UV-vis obtenidas, usando la muestra tratada térmicamente a 500 °C, como agente catalizador, se expresan en función de los perfiles  $t$  vs  $C/C_0$ , los cuales se exponen en la Figura 6.

La tendencia de los perfiles disminuye en función del tiempo de reacción, la línea verde con triángulos cerrados (lámpara de 254 nm) muestra un descenso del 65%, la línea azul con círculos abiertos (lámpara de 302 nm) alcanza un 32% de reducción y, finalmente la línea rosa con cuadros cerrados (lámpara de 365 nm) disminuye en un 31%, cuyo valor difiere 1% respecto del anterior. Todas las muestras zeolíticas se ven favorecidas con la lámpara de 254 nm, cuya energía es mayor que las otras dos lámparas.



**Figura 6.** Perfiles de la variación de la concentración ( $C/C_0$ ) en función del tiempo, para la muestra calcinada a 500 °C, usando lámparas con  $\lambda = 254, 302$  y 365 nm.

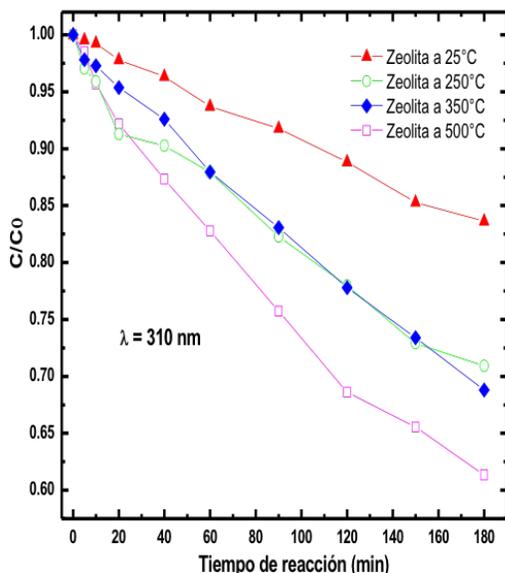
La reacción de oxidación del RB5 (proceso llamado decoloración), fue monitoreada en la banda de absorción en 595 nm (ver Fig. 9). A partir de los máximos de la banda de 595 nm, se construyen los perfiles  $t$  vs  $C/C_0$  (ver Fig. 7) donde se observa que la reacción química, es más eficiente utilizando la muestra calcinada a 500 °C, con respecto a las muestras de 350, 250 y 25 °C; porque se obtiene una disminución máxima del 65% (56% para la zeolita a 350°C, 52% para la zeolita a 250 °C y 29% para la zeolita de referencia). El uso de zeolitas modificadas térmicamente, en presencia de luz UV y radicales  $HO\bullet$ , propicia la aceleración de la reacción de oxidación del RB5.



**Figura 7.** Perfiles de la variación de la concentración ( $C/C_0$ ) en función del tiempo, para la banda de absorción en la región visible a 595 nm, usando una lámpara de 254 nm.

La disminución de la banda de absorción en la región UV en 310 nm (proceso llamado degradación) se muestra en la Fig. 9. Tomando los puntos máximos de esa banda en función del tiempo, se grafican los perfiles  $t$  vs  $C/C_0$  (ver Figura 8), de acuerdo al gráfico, se logra un descenso de la concentración alrededor del 39% usando la muestra a 500 °C; mientras que las muestras zeolíticas a 25, 250 y 500 °C consiguieron una reducción del 16, 29 y 31%, respectivamente.

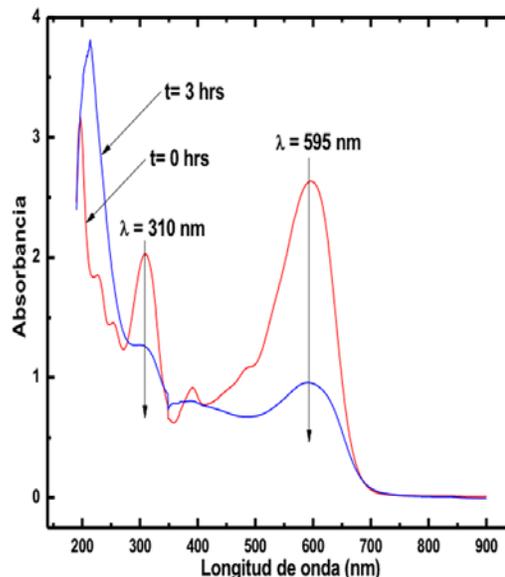
La banda en 595 nm disminuyó muy rápidamente, indicando la ruptura completa del enlace azo ( $-N=N-$ ), por otra parte, la banda en 310 nm decreció lentamente, debido a que el anillo aromático del naftaleno se fragmenta parcialmente en compuestos intermediarios como el benceno, en lugar de romperse totalmente el anillo para formar pseudo-productos con cadenas lineales.



**Figura 8.** Perfiles de la variación de la concentración ( $C/C_0$ ) en función del tiempo, para la banda de absorción en la región UV a 310 nm, usando lámpara una de 254 nm.

Durante el proceso de fotocatalisis, la estructura orgánica compleja del contaminante se rompe en componentes intermediarios más pequeños. El sitio cercano al enlace azo ( $C-N=N-$ ) es atacado durante el proceso de degradación del colorante, el cual es asistido por la muestra tratada a 500 °C, luz UV y radicales  $\bullet OH$ . La destrucción fotocatalítica de los enlaces C-N y N=N conduce a la eliminación del color (Zhan, 1998), esto se refleja en el cambio de coloración de la disolución del RB5, la cual al comienzo de la reacción tiene un tono negro marrón, y al final de la reacción, se torna café claro.

La Figura 9 muestra los cambios temporales en el espectro de absorbancia UV-vis del colorante RB5, donde se tomaron muestras a 0 y 3 horas de reacción. Para hacer una comparación de las velocidades de reacción del componente azo y de la parte aromática, se midió la absorbancia de la solución de RB5 a 595 y 310 nm, en función del tiempo de reacción. Las 2 bandas principales de absorbancia, desaparecen progresivamente bajo la acción mutua de la radiación UV,  $H_2O_2$  y la muestra de zeolita a 500 °C.



**Figura 9.** Espectro UV-vis de la solución acuosa del colorante RB5, tomado a  $t = 0$  y 3 hr de irradiación con luz UV ( $\lambda = 254$  nm), pH = 3, usando la muestra calcinada a 500 °C.

## Conclusiones

El tratamiento térmico a 250, 350 y 500 °C, así como la molienda mecánica de las muestras de zeolitas fue llevado a cabo, del cual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El patrón de difracción de rayos X de las zeolitas, muestran que son materiales cristalinos y sus fases principales corresponden a clinoptilolita, mordenita y cuarzo- $\alpha$ . Hay efectos importantes, debido a la calcinación, como el desplazamiento de las señales de difracción y el cambio de intensidad de algunas de ellas, indicando que ocurren cambios estructurales en las fases cristalinas.

De acuerdo al análisis por absorción atómica, se confirma la presencia de átomos de hierro, sodio, magnesio, potasio y calcio, que se encuentran en concentraciones del 2%wt, además de contar con elementos de silicio y aluminio en

altas concentraciones (50 y 13%wt, respectivamente), ya que forman el armazón estructural de las zeolitas.

Los resultados de espectroscopía UV-vis, para monitorear la reacción química de óxido-reducción del colorante orgánico RB5, en presencia de zeolitas naturales, radiación UV y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, señalan que se favorece conjuntamente la reducción de las bandas de absorción en 310 y 595 nm; indicando la degradación y decoloración de la molécula orgánica. El tratamiento térmico de las muestras zeolíticas, mejora las propiedades catalíticas del material, esto se evidencia, en el incremento de la velocidad de reacción al tener valores de más del 60% de disminución de la banda en 595 nm y 40% de reducción de la banda en 310 nm, haciendo que el proceso sea más eficiente con la zeolita a 500 °C respecto a la zeolita de referencia.

### Agradecimientos

J. M. Sánchez Viveros agradece a los laboratorios de análisis químico de la ESQIE-IPN y materiales de la UAM Azcapotzalco, así como el apoyo económico proporcionado por CONACyT y el IPN a través del proyecto SIP20170051.

### Referencias

Bosch P, Shifter I. (2003). La zeolita una piedra que hierve. *La ciencia para todos*, 3ª Ed., Fondo de Cultura Económica, 55: 59 – 63.

Brown D. (1987). Effects of colorant in the aquatic environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 13: 139 – 147.

Cruciani G. (2006). Zeolites upon heating: Factors governing their thermal stability and structural changes. *J. Phys. Chem. Solids*, 67: 1973 – 1994.

Easton J. R. (1995). Colour in dyehouse effluent, the dye maker's view, in: P. Cooper (Ed.), Society of dyers and colourists, England.

Erdem E., Karapinar N., Donat R. (2004). The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *J. Colloid and Interface Sci.*, 280: 309 – 314.

Gohardshadi K., Hadadian M., Karimi M. (2013). Photocatalytic degradation of reactive black 5 azo dye by zinc sulfide quantum dots prepared by a sonochemical method. *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, 16: 1109 – 1113.

Gottardi G., Galli E. (1985). Natural zeolites. Springer, Berlin, Alemania.

Gültekin I., Ince N.H. (2006). *Ultrason. Sonochem.* 13 (3): 208 – 214.

Ip A. W. M., Barford J. P., McKay G. (2010). A comparative study on the kinetics and mechanisms of removal of Reactive Black 5 by adsorption onto activated carbons and bone char. *Journal Engineering Chemical*, 157: 434 – 442.

Li J., Xu Y., Liu Y., Wu D., Sun Y. (2004). *China Particuology*, 2: 266–269.

Lucas M. S., Peres J. A. (2006). Decolorization of the azo dye reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. *Dyes and Pigments*, 71: 236 – 244.

Pandey A., Singh P., Lyengar L. (2007). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes. *Int. Biodet. Biodegra.*, 59: 73–84.

Sánchez Viveros J. M. (2017). Caracterización de zeolitas naturales y su aplicación en la degradación del colorante negro reactivo 5. Tesis de Maestría, ESFM-IPN, México.

Sánchez Viveros J. M. Espinoza Tapia J. C., Colín Luna J. A. Zacahua Tlacuatl G., Chávez Rivas F., Hernández Pérez I. (2016). Degradación fotocatalítica del colorante negro reactivo 5 (RB-5) empleando zeolitas naturales modificadas térmicamente. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 2: 42 – 48.

Singh K., Arora S. (2011). Removal of synthetic textile dyes from wastewater: a critical review on present treatment technologies. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 4: 807 – 878.

Song S., Xu L., He Z., Chen J., Xiao X., Yan B. (2007). *Environ. Sci. Technol.*, 41: 5846 – 5853.

Yazdanbakhsh M., Tavakkoli H., Hosseini S. M. (2011). *Desalination*, 281: 388–395.

Wang S., Peng Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chem. Engin. Journal*, 156: 11 – 24.

Zacahua Tlacuatl G. (2011). Obtención de membranas porosas por el método de extrusión, Tesis de Doctorado, ESQIE-IPN, México.

Zhan H., Chen K., Tian H. (1998). *Dyes Pigments*, 37 (3): 241–247.