

**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**DIVISIÓN DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**MATRIZ POLIMÉRICA PARA LA REMOCIÓN DE  
COLORANTES EN AGUA**

**TRABAJO ESCRITO**

Que para obtener el GRADO de  
**MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD**

**Presenta:**

**Martín Francisco Zamarrón Pule**

**Director de Tesis:**

**Dr. Héctor M. Guzmán Grijalva**

**1942**

**Asesor de Tesis:**

**Dra. Juana Alvarado Ibarra**

**HERMOSILLO, SONORA**

**MAYO 2021**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

*Página dejada intencionalmente en blanco*

# CARTA DE APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL JURADO



## UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



COORDINACIÓN DE PROGRAMA DEL POSGRADO EN SUSTENTABILIDAD  
ESPECIALIZACIÓN EN DESARROLLO SUSTENTABLE / MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD

Hermosillo, Sonora, a 10 de mayo del 2021

**Dr. Javier Esquer Peralta**  
Coordinador del Posgrado en Sustentabilidad  
**P R E S E N T E . -**

Por este conducto, hago de su conocimiento que estoy de acuerdo que se realice el siguiente examen de posgrado:

<b>Programa:</b>	<b>Maestría en Sustentabilidad:</b>	X	<b>Especialidad en Desarrollo Sustentable:</b>	
<b>Alumno (a):</b>	Martín Francisco Zamarrón Pule			
<b>Expediente:</b>	212202097			
<b>Fecha:</b>	12/05/2021			
<b>Hora:</b>	18:30			
<b>Edificio y Aula:</b>	Virtual			

### Relación de Jurados:

	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>PRESIDENTE:</b>	Dr. Héctor Manuel Guzmán Grijalva	<i>Hector M Guzman G</i>
<b>SECRETARIO:</b>	Dra. Nora Elba Munguía Vega	<i>Nora Munguia</i>
<b>VOCAL:</b>	Dra. Juana Alvarado Ibarra	<i>JAlbar</i>
<b>SUPLENTE:</b>		

**ATENTAMENTE**

**MIEMBROS DEL JURADO**





## RESUMEN

Se preparó un material compuesto a base de quitosano y chabazita como potencial sorbente para la remoción del colorante negro de eriocromo T en agua. Si bien los análisis de microscopía electrónica de barrido realizados en el compuesto mostraron que las partículas de chabazita se incrustaron en una matriz de quitosano, los análisis termogravimétricos indicaron que el quitosano es susceptible a sufrir una degradación química a temperaturas superiores a 225 °C, sin embargo, la chabazita solo parece experimentar una disminución de peso debido a la pérdida de humedad. En los experimentos cinéticos, llevados a cabo a temperatura ambiente y un pH de 7 con agitación constante, se logró una disminución del 86 % en la concentración de colorante en la solución acuosa en aproximadamente 500 minutos. La linealización se utilizó para evaluar el ajuste de los datos experimentales a los modelos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden, Elovich y de difusión intraparticular. Los experimentos cinéticos mostraron que, en las condiciones experimentales utilizadas, el mecanismo de sorción corresponde a un modelo de pseudo-segundo orden. Aunque esto a menudo se interpreta como indicativo de que la quimisorción es el principal mecanismo de unión entre el sorbato y la superficie del sorbente, también se ha encontrado que a una concentración de sorbato relativamente baja en solución puede ser responsable de tal comportamiento.

## **ABSTRACT**

A composite was prepared using chitosan and chabazite to be used for the removal of colorant eriochrome black T from water. While Scanning Electron Microscopy analyses performed on the composite showed that chabazite particles became embedded in a chitosan matrix, thermogravimetric analyses indicated that chitosan is susceptible of undergoing chemical degradation at temperatures higher than 225 C but that chabazite only seems to experience weight decrease due to humidity loss. In the kinetic experiments, carried out at room temperature and a pH of 7 with mechanical stirring being provided, an 86 % decrease in solution dye concentration was achieved in approximately 500 minutes. Linearization was used to evaluate the fitting of experimental data to the pseudo-first order, pseudo-second order, Elovich and intra particle diffusion models. Kinetic experiments showed that, under the experimental conditions used, the sorption mechanism corresponds to a pseudo-second order model. Although this is often interpreted as indicative of chemisorption being the main binding mechanism of sorbate to sorbent surface, it has also been cited a relatively low sorbate concentrations in solution as being greatly responsible of such a behavior.

# ÍNDICE

## Índice de Contenido.

Descripción	Página
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>II. OBJETIVO ESTRATÉGICO</b> .....	4
<b>III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	4
<b>IV. ANÁLISIS LITERARIO</b> .....	5
<b>V. METODOLOGÍA</b> .....	14
<b>VI. RESULTADOS</b> .....	17
<b>VII. DISCUSIÓN</b> .....	27
<b>VIII. CONCLUSIONES</b> .....	31
<b>IX. RECOMENDACIONES</b> .....	31
<b>X. REFERENCIAS</b> .....	32

## Índice de Tablas

Tabla 1 Tiempo de contacto para cada matraz. ....	16
---	----

## Índice de Figuras

Figura 1 Yacimiento de zeolita tipo chabazita. ....	9
Figura 2 Estructura molecular del quitosano. ....	10
Figura 3 Localización geográfica del yacimiento natural de chabazita localizado en el municipio de Divisaderos, Son. En las coordenadas geográficas 29°41'18.9" Norte y 109°31'53.1" Oeste. ....	14

Figura 4 Morfología del quitosano.....	18
Figura 5 Morfología de una partícula de material compuesto. ....	18
Figura 6 Morfología de una partícula de material compuesto a una amplificación de 1 000 X.....	19
Figura 7 Morfología de una partícula de material compuesto a una amplificación de 2 000 X.....	19
Figura 8 Morfología de una partícula de material compuesto a una amplificación de 5 000 X.....	20
Figura 9 Espectro FTIR de zeolita, quitosano y material compuesto.....	21
Figura 10 Gráfico que muestra la trayectoria de reducción de peso del material compuesto obtenido a partir de los resultados del análisis termo gravimétrico. ....	22
Figura 11 Gráfico que muestra la ruta de reducción de peso para zeolita, material compuesto y quitosano obtenido a partir de los resultados del análisis termo gravimétrico. ....	23
Figura 12 Curva de calibración. ....	24
Figura 13 Curva de calibración en términos de longitud de onda. ....	25
Figura 14 Cinética de sorción en términos de longitud de onda. ....	26
Figura 15 Cambio observado en la concentración de colorante en solución con el tiempo en experimentos cinéticos.....	27
Figura 16 Gráficos que muestran los datos derivados de resultados experimentales de acuerdo con las formas linealizadas del orden PPO (A), PSO (B), IP (C) y ecuaciones de Elovich. ....	28

## I. INTRODUCCIÓN

La protección de los recursos hídricos y su calidad incide en forma positiva en los ecosistemas y la salud humana; al ser una serie de medidas conservacionistas conducentes al desarrollo sustentable de un país (Rovira, et al., 2018). De la misma manera, Robledo, Venegas y García, (2014) mencionan que la recuperación y preservación de las características fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales son fundamentales para que puedan usarse con fines sociales, económicos y ambientales; garantizando un mejor nivel de vida para los habitantes de un territorio.

La industria textil requiere de una gran cantidad de agua para los procesos de tinción y lavado, por lo que genera grandes volúmenes de efluentes (Cestarolli, das Graças de Oliveira y Guerra, 2019). Es por ello que diversos autores como Lakhan, Kumar y Pratap, (2015) mencionan que globalmente se vierten cerca de 50 000 toneladas anuales de colorantes tipo azo al medio ambiente debido a procesos de tinción, ya que se ha estimado que aproximadamente entre el 10 y 15 % de los colorantes utilizados no se adhieren a las fibras textiles, y son finalmente liberados al medio ambiente. Lo anterior representa un gran desafío para la industria textil, ya que hasta el momento ha demostrado una gran deficiencia, en términos sustentables, en los procesos de tinción por el uso indiscriminado de colorantes tipo azo, de los cuales existen más de 100 000 diferentes tipos, utilizándose aproximadamente 700 000 toneladas por año (Almeida y Corso, 2019).

El negro de eriocromo T es un colorante tipo azo cuyo uso en la industria textil permite, después de un pretratamiento con sales de cromo, la tinción de seda, lana y fibras de nylon (Moeinpour, Alimoradi y Kazemi, 2014; Karimi, et al., 2018). Además, según mencionan autores como Veerakumar, et al., (2019) su uso se extiende al área de la química analítica, fungiendo como un indicador de iones metálicos para la determinación de la presencia de calcio y magnesio en aguas. Sin embargo, este colorante resulta ser particularmente peligroso y carcinogénico, y los compuestos que se generan a partir de su degradación, como la naftoquinona son carcinogénicos incluso en mayor grado (Khurana, et al., 2018).

Por lo anterior, el desarrollo de un adsorbente, o sorbente, eficiente y de bajo costo para la remoción de este tipo de colorantes como lo es el negro de eriocromo T, presentes en soluciones acuosas, resulta ser de suma importancia (Park, et al., 2018).

## **II. OBJETIVO ESTRATÉGICO**

Reducir la presencia de colorantes tipo azo en aguas con el uso de sorbentes de origen natural.

## **III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Elaborar un análisis literario del estado del arte en relación con sorbentes de origen natural, colorantes, tratamiento de aguas contaminadas con colorantes tipo azo, entre otros tópicos.
- Desarrollar un material compuesto a base de quitosano y chabazita con propiedades sorbentes.
- Caracterizar fisicoquímicamente el material desarrollado.
- Evaluar el desempeño del material a través de la remoción de un colorante tipo azo en pruebas de laboratorio.

## IV. ANÁLISIS LITERARIO

### 4.1 Colorantes y la industria textil

Los colorantes son sustancias que se utilizan para dar color a un objeto determinado, especialmente a fibras de origen animal, vegetal o sintéticas, tales como lana, seda, algodón, lino, rayón, nylon, papel, etc.; u otros materiales como aceites, ceras o plásticos (Nieto, 2015). Se caracterizan por su capacidad de absorber la luz visible, cuya longitud de onda se sitúa en el rango de 400-700 nm, propiedad que les confiere su coloración (Torres, 2005). Los colorantes se pueden agrupar en dos categorías: colorantes de origen natural, que generalmente son polímeros con una amplia variedad de grupos funcionales y estructuras químicas orgánicas complejas, y colorantes de origen sintético, los cuales presentan propiedades únicas como generación de tonos brillantes en las superficies, relativo bajo costo de producción, buena solubilidad, resistencia a la luz solar y al contacto con el agua (Barrios, et al., 2015).

La clasificación de los colorantes depende de su estructura química, fuente de obtención, solubilidad y su uso o aplicación (Gürses, et al., 2016). Sin embargo, Buscio, (2015) menciona que, debido a la complejidad que existe en la nomenclatura de los colores basada en sus estructuras químicas, la clasificación basada en el uso o aplicación de los colorantes es considerada mucho mas ventajosa. De esta manera, se han elaborado índices de color para cada colorante, los cuales consisten en un nombre genérico y un número que indica la constitución química del colorante; el nombre genérico contiene el tipo de aplicación, color o matiz y un número de identificación para cada colorante (Barajas, et al., 2016). Este índice de color facilita la identificación y sirve como una referencia para las propiedades tanto químicas como técnicas que presenta cada colorante (Gürses, 2019).

La industria textil requiere de una gran cantidad de agua para los procesos de tinción y lavado, por lo que genera grandes volúmenes de efluentes (Cestarolli, das Graças de Oliveira y Guerra, 2019). Es por ello que diversos autores como Lakhan, Kumar y Pratap, (2015) mencionan que globalmente se vierten cerca de 50 000 toneladas anuales de colorantes tipo azo al medio ambiente debido a procesos de tinción, ya que se ha estimado que aproximadamente entre el 10 y 15 % de los colorantes utilizados no se adhieren a las fibras textiles, y son finalmente liberados al medio ambiente. Lo anterior representa un gran desafío para la industria textil, ya que hasta el momento ha demostrado una gran

deficiencia, en términos sustentables, en los procesos de tinción por el uso indiscriminado de colorantes tipo azo, de los cuales existen más de 100 000 diferentes tipos, utilizándose aproximadamente 700 000 toneladas por año (Almeida y Corso, 2019).

Los colorantes tipo azo son compuestos sintéticos en cuyas estructuras químicas se encuentran enlaces dobles de nitrógeno (-N=N-) denominados grupos azo que le confieren a este tipo de colorantes propiedades tales como alta estabilidad y solubilidad en agua, y la capacidad de producir colores característicos dependiendo de los sistemas aromáticos que contienen (Dos Santos, et al., 2018). Por esta razón, Chung, (2016) menciona que este tipo de colorantes son ampliamente utilizados en la industria textil por ser estables a la luz resistentes a la degradación microbiana o al desvanecimiento por procesos de lavado. Sin embargo, los efluentes provenientes de este tipo de industrias son muy perjudiciales debido a que los colorantes tipo azo son tóxicos, mutagénicos, carcinogénicos y, además, afectan negativamente la vida marina y los procesos de fotosíntesis de las plantas acuáticas (Álvarez, et al., 2015).

El negro de eriocromo T es un colorante tipo azo cuyo uso en la industria textil permite, después de un pretratamiento con sales de cromo, la tinción de seda, lana y fibras de nylon (Moeinpour, Alimoradi y Kazemi, 2014; Karimi, et al., 2018). Además, según mencionan autores como Veerakumar, et al., (2019) su uso se extiende al área de la química analítica, fungiendo como un indicador de iones metálicos para la determinación de la presencia de calcio y magnesio en aguas. Sin embargo, este colorante resulta ser particularmente peligroso y carcinogénico, y los compuestos que se generan a partir de su degradación, como la naftoquinona son carcinogénicos incluso en mayor grado (Khurana, et al., 2018). Por lo anterior, el desarrollo de un adsorbente eficiente y de bajo costo para la remoción de este tipo de colorantes, como lo es el negro de eriocromo T, presentes en soluciones acuosas, resulta ser de suma importancia (Park, et al., 2018).

#### **4.2 Calidad del agua**

La protección de los recursos hídricos y su calidad incide en forma positiva en los ecosistemas y la salud humana; al ser una serie de medidas conservacionistas conducentes al desarrollo sustentable de un país (Rovira, et al., 2018). De la misma manera, Robledo, Venegas y García, (2014) mencionan que la recuperación y preservación de las características fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales son

fundamentales para que puedan usarse con fines sociales, económicos y ambientales; garantizando un mejor nivel de vida para los habitantes de un territorio. Esto coincide con lo mencionado por Simanca, Álvarez y Paternina, (2010) en el sentido de que la importancia del control de calidad del agua radica en el hecho de que es un vehículo para la transmisión de enfermedades y su uso puede representar un riesgo para la salud humana.

Las características químicas, físicas y biológicas de los sistemas acuáticos determinan su nivel de calidad; sin embargo, no existe un índice nacional estandarizado oficial para el agua (Vega, et al., 2018). A pesar de ello, Ibararán, et al., (2016) aluden a la existencia de parámetros que ayudan a establecer los límites máximos, en términos de niveles de concentración de sustancias potencialmente contaminantes y microorganismos patógenos, que deberían estar presentes en un cuerpo de agua para que no constituya un riesgo ambiental y social. Por ello, Vicuña (2019) afirma que cuando el agua exhibe una calidad inadecuada, de acuerdo con el uso proyectado, ésta debe ser acondicionada mediante operaciones y procesos fisicoquímicos que permitan obtener la calidad deseada.

El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial por el aumento de la población humana, la expansión de la actividad industrial y la amenaza del cambio climático con su secuela de importantes alteraciones al ciclo hidrológico (Zhou, et al., 2017). La ONU (2014) afirma que el agua limpia es escasa y será aún más escasa a medida que avance el cambio climático. En este contexto las personas de bajos recursos son las primeras y mayores víctimas de la contaminación, la escasez de agua y la falta de saneamiento adecuado. Lo anterior contraviene lo establecido en el artículo 4to de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que establece que toda persona tiene el derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible (Secretaría de Gobernación, 2014).

La ONU, por su parte, a través de la Agenda 2030 y los 17 objetivos de Desarrollo Sostenible, insta a todos los países a adoptar medidas que promuevan la prosperidad y la protección del planeta; esto incluye el suministro de agua limpia y libre de contaminantes (ONU, 2018). Específicamente, los objetivos 6 y 12 de la Agenda 2030, buscan garantizar la disponibilidad, la gestión sostenible y el saneamiento del agua a toda la población; además se pretenden impulsar e instaurar modalidades de consumo y producción

sostenibles mediante el planteamiento de metas como la 6.3, que propone mejorar la calidad del agua al reducir la contaminación mediante la eliminación del vertimiento y la minimización de las emisiones de productos químicos y materiales peligrosos; la meta 12.4 se centra en lograr la gestión racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida (GOB, 2017).

En virtud de lo anterior, es de vital importancia asegurar una buena calidad y gestión del agua, ya que la presencia de contaminantes, como los colorantes tipo azo, representan una amenaza hacia los ecosistemas acuáticos, vida marina y salud humana (Ventura y Marin, 2013). Sin embargo, es en países como México, el cual destaca internacionalmente por la magnitud de su industria textil, quienes usualmente no cuentan con regulaciones o normatividades que sean integrales y rigurosas aplicables a la descarga de aguas residuales (Fondo para la Comunicación y Educación Ambiental, 2012). Por lo cual, el desarrollo y planteamiento de procesos que sean efectivos y de bajo costo para el tratamiento de aguas, resulta como opción viable para lograr los objetivos de la ONU (OMS, 2018).

#### **4.3 La adsorción como tratamiento de aguas contaminadas con colorantes tipo azo**

Existen numerosas investigaciones sobre tratamientos biológicos, químicos y fisicoquímicos para la remoción de colorantes en agua, aunque en la mayoría de los sistemas, dichos tratamientos aparecen combinados (Tran, et al., 2015). Sin embargo, son los procesos fisicoquímicos los que han demostrado ser particularmente eficaces en la remoción de contaminantes como metales pesados, colorantes, agroquímicos, etc., (Alvarado, et al. 2010). Además, según mencionan Sarangapani et al., (2016) este tipo de procesos presentan una alta disponibilidad y existe una gran diversidad en materiales que pueden utilizarse; dichos procesos incluyen a las tecnologías de membranas, ozonificación, ultrasonificación y adsorción.

Particularmente, la adsorción es uno de los métodos más prometedores para el tratamiento de aguas ya que tiene la capacidad de remover sustancias disueltas inicialmente en una fase acuosa mediante su acumulación en un material adsorbente (Oladoja, et al., 2017). Físicamente, produce interacciones entre la superficie de un material y una sustancia contaminante, permitiendo que partículas, moléculas o iones queden atrapados o retenidos en dicha superficie (Valladares, et al., 2018). Diversos autores como Uddin, (2017)

mencionan que este método presenta ventajas significativas como gran disponibilidad, rentabilidad, fácil operación, eficiencia, y efectividad en comparación con otras técnicas. Su eficacia depende de parámetros como el tamaño de partícula del sorbente y la morfología de su superficie, pH, temperatura y concentración del agua a tratar, etc., (Ahmad, et al., 2015).

Entre los materiales más utilizados como adsorbentes, o sorbentes, se encuentran el gel de sílice, alúmina y carbón activado; sin embargo, estos materiales presentan dificultades en su regeneración lo que origina que el costo en su empleo aumente (Galán, 2013). Por ello, se busca emplear sorbentes alternativos que sean más accesibles, económicos y de rápida regeneración como arcillas, silicatos, residuos orgánicos o zeolitas que, además de ser de origen natural y de bajo costo, exhiben elevadas capacidades de adsorción, intercambio iónico, propiedades catalíticas y son fáciles de obtener (Vargas, Carriazo y Castillo, 2011; Ramírez y Muñoz, 2017).

Particularmente, las zeolitas han sido muy utilizadas para la remoción de contaminantes en aguas debido a su estructura física, ya que presentan una superficie microporosa interna sumamente amplia en relación con su superficie externa, confiriéndoles una gran capacidad de adsorción (Li, Corma y Yu, 2015). Cuentan con más de 119 clasificaciones, entre las cuales abundan las de tipo modernita, clinoptilolita y chabazita (Costafreda, 2014). En México, sus principales yacimientos se localizan en los estados de Oaxaca, San Luis Potosí, Puebla, Guanajuato y Sonora (Paredes, et al., 2013). En Sonora, el yacimiento de mayor importancia de zeolita tipo chabazita se encuentra en La Palma, municipio de Divisaderos; como se muestra en la Figura 1 (Mendoza, et al., 2014).

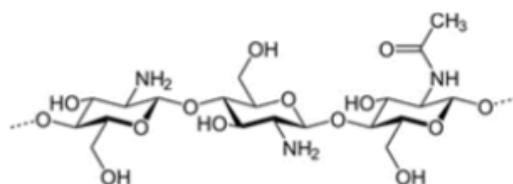


**Figura 1 Yacimiento de zeolita tipo chabazita.**

Fuente: Elaboración propia

Además de la adsorción, las zeolitas poseen la propiedad de intercambio iónico; el intercambio iónico es un proceso químico reversible y rápido en el que iones disueltos, presentes en aguas, se reemplazan por iones con carga del mismo signo inicialmente adheridos a la superficie del sorbente (Boss Tech, 2018). Esto debido a que la estructura de las zeolitas es de carácter aniónico y cuenta con cavidades en las que se encuentran iones de cargas positivas, o cationes débilmente unidos a su superficie interna; estos iones positivos pueden intercambiarse por cationes cuando se encuentran en un medio acuoso (Chaves, 2017). Según Manrique, et al., (2015) el comportamiento del intercambio iónico de las zeolitas depende de la naturaleza de las especies catiónicas, del tamaño del catión hidratado, de la temperatura, la concentración de las especies catiónicas en solución, el solvente y las características de la zeolita.

Aunado a lo anterior, Kumar, et al., (2018) han encontrado que la aplicación de quitosano, un polímero de origen natural, en tratamiento de aguas resulta muy prometedor debido a sus propiedades de adsorción, además de constituir una alternativa novedosa con respecto a los materiales adsorbentes habitualmente utilizados. El quitosano es el segundo polímero natural más abundante de la Tierra; es renovable, biodegradable, biocompatible y no tóxico (Pérez, et al., 2016). Se obtiene a partir de la desacetilación de la quitina, sustancia que se encuentra en los exoesqueletos de los crustáceos; cuenta con la presencia de grupos amino e hidroxilo en su estructura química (Figura 2), lo que le confiere altas propiedades sorbentes de compuestos orgánicos mediante interacciones electroestáticas (Bouyahmed, et al., 2018).



**Figura 2 Estructura molecular del quitosano.**

Fuente: Bouyahmed, et al., (2018)

Autores como Kyzas y Bikiaris, (2015) afirman que su gran potencial como material adsorbente se debe a la facilidad en su obtención, ya que proviene principalmente de residuos de la industria pesquera; además, su versatilidad le permite que pueda ser modificado de diferentes formas para aumentar su capacidad de adsorción e inclusive ser

combinado con otro tipo de materiales para lograr este objetivo. De tal manera que, al tratarse de un material de carácter catiónico puede ser combinado con materiales aniónicos, como la zeolita, actuando como una matriz polimérica para que de esta manera se incremente el tamaño de poro de la zeolita y por lo tanto sus capacidades de adsorción se vean mejoradas (Tegl, et al., 2018; Gallardo, Maioco y Francois, 2014).

La unión entre el quitosano y la zeolita permite que las limitantes, que presenta cada material por separado, ya no sean un problema; por ejemplo, el quitosano se ve obstaculizado por su gran sensibilidad al pH en soluciones ácidas fuertes, sin embargo, cuando se encuentra unido a la zeolita se aumenta la resistencia del material y por lo tanto su empleo en este tipo de situaciones puede resultar factible (Dehghani, Dehghan y Najafpoor, 2017). Estructuralmente, el quitosano solo se adhiere a la parte externa negativa de la superficie de la zeolita, mientras que los aniones internos de los poros de la zeolita aún están disponibles para adsorber contaminantes de carácter catiónico (Xie, et al., 2013). De esta manera se forman compositos quitosano-zeolita, combinándose las propiedades físicas de estos componentes para obtener nuevas propiedades estructurales o funcionales (Flores, 2015); además, la fuerza mecánica de la zeolita se ve mejorada, junto con su estabilidad térmica y química (Premakshi, Ramesh y Kariduraganavar, 2015).

#### **4.4 Modelos de adsorción**

Los modelos de adsorción son uno de los factores más importantes necesarios para comprender apropiadamente este tipo de procesos mediante la información que proporciona el equilibrio de adsorción; de esta manera se puede optimizar el diseño de este tipo de sistemas para la remoción de contaminantes en aguas (Ayawei, Ebelegi y Wankasi, 2017). Por lo anterior, resulta de suma importancia explicar la relación entre los contaminantes adsorbidos por unidad de peso del adsorbente ( $q_e$ ) y la concentración residual de los contaminantes en el agua ( $C_e$ ) al alcanzarse el equilibrio; utilizando alguno de los diferentes modelos que permiten explicar los resultados de los estudios de adsorción (Bushra, Ahmed y Shahadat, 2017).

Los modelos más comunes de adsorción se obtienen de sistemas en los cuales únicamente se forma una capa simple de moléculas de soluto en la superficie del sólido, aunque ocasionalmente pueden formarse capas multimoleculares en dicha superficie (Lazo, et al., 2008). En tales casos, deben utilizarse modelos de adsorción más complejos para una

adecuada descripción del fenómeno u otros que son puramente empíricos e intentan correlacionar los datos experimentales en ecuaciones simples con dos o tres parámetros como máximo (Barberá, et al., 2014). Entre los modelos o ecuaciones más utilizados se encuentran los modelos de Langmuir y Freundlich (Cconislla, et al., 2016).

La isoterma de Langmuir ha sido ampliamente utilizada en sistemas de tipo sólido-líquido, sólido vapor, sólido-gas, líquido-vapor y líquido-líquido; cuando el proceso de adsorción o concentración se produce sobre una superficie sólida, la isoterma de adsorción se construye a partir del balance de material entre la fase fluida y el sólido en contacto, como en ciertos procesos de tratamiento de aguas (Sandoval, López y Gracia, 2015). Este modelo supone que, entre otras cosas, la superficie es homogénea y que posee un número específico de lugares en los que se puede adsorber una molécula, es decir, cuando todos los sitios están ocupados no es posible que continúe la adsorción, el sistema se satura (Rivas, et al., 2014). La isoterma de Langmuir se expresa como (Penedo, 2014):

$$q_e = \frac{K_L C_e}{1 + a_L C_e} \quad (\text{Eq. 1})$$

donde,

$q_e$  = concentración de soluto adsorbido por unidad en peso de adsorbente.

$C_e$  = concentración de soluto en el equilibrio.

$a_L$  = constante relacionada con el calor de adsorción,  $Q$ , [ $b \propto \exp(-\Delta H/RT)$ ].

$K_L$  = constante de Langmuir, (L/g).

De igual manera, la isoterma de Freundlich ha sido ampliamente utilizada y es considerado el modelo que mejor relaciona la adsorción de contaminantes en aguas, ya que describe el equilibrio sobre una superficie heterogénea sin asociación de moléculas después de la adsorción (Rincón, Cortes y Arrubla, 2016). La isoterma de Freundlich es una expresión empírica que toma en cuenta la heterogeneidad de la superficie y la distribución exponencial de los sitios de adsorción y sus energías; la ecuación se expresa como (Cortés, 2007):

$$q_e = K_F C_e^{1/n_F} \quad (\text{Eq. 2})$$

donde,

$q_e$  = concentración de soluto adsorbido por peso de adsorbente.

$C_e$  = concentración de soluto en el equilibrio.

$K_F, 1/n_F$  = constantes características del sistema.

Aunado a lo anterior, para representar la adsorción en un sistema sólido-líquido también es posible utilizar la isoterma de Brunauer, Emmett y Teller (BET); este modelo refleja un proceso de adsorción aparente de multicapas y asume que la ecuación de Langmuir se aplica en cada capa (Kyzas, Bikiaris y Mitropoulos, 2017). BET considera, entre otras cosas, que no se necesita completar la primera capa para dar inicio a las siguientes y que todos los sitios de adsorción de la superficie son equivalentes; la ecuación de la isoterma de BET esta dada por (Zsazsa, 2013):

$$q_e = \frac{BC_eQ_m}{(C_0 - C_e)[1 + (B-1)(C_e/C_0)]} \quad (\text{Eq. 3})$$

donde,

$C_0$  = concentración inicial de la solución.

$C_e$  = concentración de la solución en el equilibrio.

$Q_m$  = constante que representa la cantidad del soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente y que forma una monocapa completa en la superficie del adsorbente.

$B$  = constante que representa la energía de interacción con la superficie.

La aplicación de las isotermas de adsorción será de vital importancia para determinar el nivel de eficiencia en términos de grado de remoción que puede alcanzar el material obtenido a base de quitosano y zeolita. Para ello se utilizará una muestra de agua que contenga el colorante azoico. Lo anterior, con la finalidad de contribuir a lo establecido en el artículo cuarto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y a los objetivos seis y doce de la Agenda 2030, anteriormente mencionados.

## V. METODOLOGÍA

### 5.1 Tipo de estudio

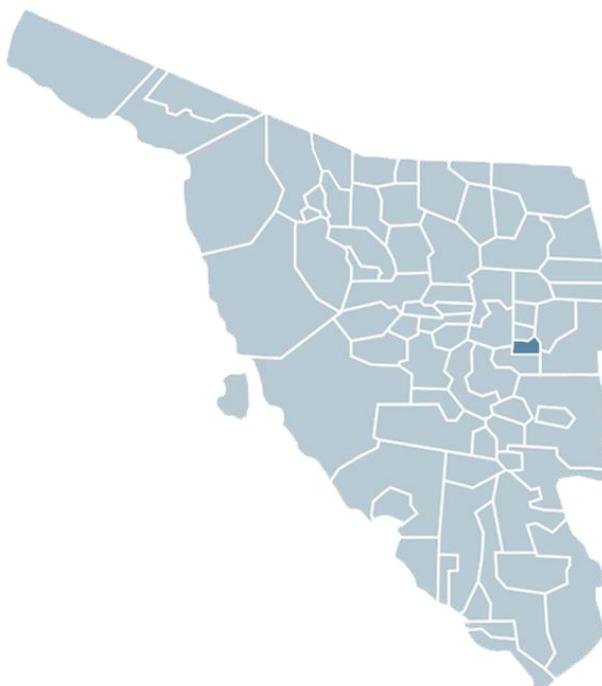
El presente es un proyecto de investigación de carácter cuantitativo.

### 5.2 Diseño experimental

#### 5.2.1 Reactivos y Materiales

Los reactivos utilizados son de grado analítico: quitosano deacetilado de bajo peso molecular (Sigma-Aldrich), ácido acético (Fermont), hidróxido de sodio (J. T. Baker).

La zeolita tipo chabazita se obtuvo de un yacimiento natural localizado en el estado de Sonora.



**Figura 3 Localización geográfica del yacimiento natural de chabazita localizado en el municipio de Divisaderos, Sonora, a los 29°41'18.9" de latitud norte y 109°31'53.1" de longitud oeste.**

Fuente: Jrobertiko (2010).

El negro de eriocromo T (Sigma-Aldrich), grado indicador, se usó para preparar una solución stock de 50 ppm con agua deionizada, vertiéndose en un matraz aforado de 500 mL, 25 mg de negro de eriocromo T y 500 mL de agua deionizada.

Para la elaboración del material compuesto se prepararon soluciones de ácido acético y de hidróxido de sodio al 5 % (v/v) y 0.25 M, respectivamente. En la preparación de todas las soluciones se utilizó agua deionizada.

### **5.2.2 Preparación de chabazita**

En un mortero de cerámica se trituró una muestra de chabazita para obtener partículas de tamaño similar, utilizando una malla de 100 mesh. Posteriormente, se lavó la chabazita dos veces con agua deionizada en un vaso de precipitado, agitándose por 10 minutos. Al término de la agitación se dejó reposar la mezcla para permitir que la chabazita sedimentara y poder separar la fase líquida mediante decantación. A continuación, la muestra de chabazita se secó a 60 °C por 24 horas, lo que permitió obtener un producto en forma de hojuelas. Finalmente, se volvió a triturar la chabazita en un mortero para obtener un polvo fino.

### **5.2.3 Obtención del material compuesto**

El material se elaboró de acuerdo a la técnica reportada por Pérez, et al., (2016) la cual consiste en disolver 3 g de quitosano en 50 mL de ácido acético al 5 % (v/v) (solución de quitosano). Separadamente, 3 g de chabazita se agregaron a 20 mL de agua deionizada (solución de chabazita). Ambas soluciones se agitaron por 20 minutos en un agitador magnético con placa de calentamiento marca SCIENCE MED modelo H550 PRO a 100 rpm a temperatura ambiente, para después mezclarse; la solución resultante se agitó a 1 200 rpm por 4 horas a una temperatura de 60 °C. Al término de la agitación, la mezcla conteniendo quitosano y chabazita fue agregada por goteo a 500 mL de una solución 0.25 M de NaOH. La solución se agitó a 200 rpm por 3 horas. Posteriormente, la mezcla se filtró y se lavó varias veces con agua deionizada y finalmente se secó en un horno a 45 °C por 48 horas.

### **5.2.4 Experimentos de cinética de sorción**

Se preparó una solución madre con una concentración de 50 ppm del colorante. Posteriormente, se tomaron 20 alícuotas de 15 mL de la solución madre para añadirles a 20 diferentes matraces de 50 mL. A cada uno de estos matraces se les añadió 0.5 g de material compuesto, para inmediatamente ponerlos en agitación constante. Se asignó un tiempo de contacto diferente entre la solución de colorante y el material compuesto en cada uno de los matraces, con el propósito de obtener la curva de sorción. Los tiempos de contacto se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1 Tiempo de contacto para cada matraz.**

	Tiempo de contacto (min)
matraz 1	5
matraz 2	10
matraz 3	15
matraz 4	20
matraz 5	25
matraz 6	30
matraz 7	45
matraz 8	60
matraz 9	90
matraz 10	120
matraz 11	150
matraz 12	180
matraz 13	240
matraz 14	480
matraz 15	720
matraz 16	960
matraz 17	1 200
matraz 18	1 440
matraz 19	2 160
matraz 20	2 880

Fuente: elaboración propia.

Al término del tiempo de contacto, se tomó una alícuota de 2 mL de cada matraz para leerlos en un espectrofotómetro de UV-Vis marca Agilent, modelo 8453 con la ayuda de celdas especiales marca PerInElmer.

## **5.2 Alcance**

Este proyecto comprende un periodo de dos años, iniciando en agosto del 2018 y concluyendo en agosto del 2020, y consiste en la elaboración de un material sorbente que potencialmente permitirá la remoción de un colorante disuelto en el agua.

## **5.3 Hipótesis**

¿Es posible que un material compuesto a base de quitosano y chabazita sea útil como una alternativa de tratamiento de agua contaminada con colorantes tipo azo?

#### **5.4 Objeto de estudio**

Material compuesto a base de quitosano y chabazita para la adsorción del colorante negro de eriocromo T de una solución acuosa.

#### **5.5 Selección del objeto de estudio o del lugar que ubica al objeto de estudio**

Dado que las zeolitas y el quitosano son catalogados, individualmente, como excelentes sorbentes naturales es posible que un material compuesto formado por ambas sustancias logre mejorar la capacidad de sorción y por ende las características requeridas para ser una alternativa de tratamiento de colorantes tipo azo en agua.

#### **5.6 Selección y tamaño de muestra**

El muestreo se realizó tomando en cuenta los siguientes criterios:

- 1) Información disponible en la literatura científica;
- 2) experiencia adquirida en base a proyectos de investigación relacionados, que fueron desarrollados previamente; y
- 3) factibilidad y viabilidad de la información que se pretende obtener.

#### **5.7 Instrumentos de recolección y manejo de datos**

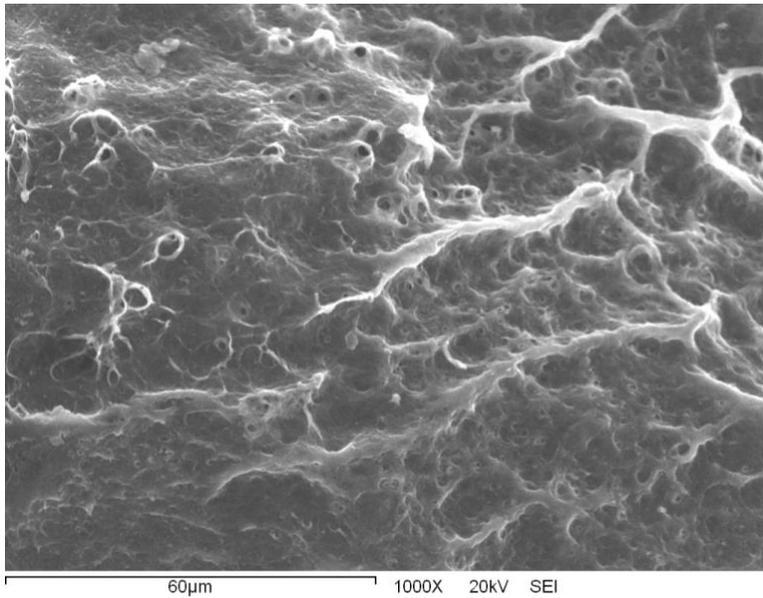
La recolección de datos se llevará a cabo a través de las técnicas de Espectroscopia Infrarroja (IR), Análisis Térmico por Termogravimetría (TGA), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y UV-VIS. El manejo y presentación de los datos se manipuló mediante el software Excel y las gráficas se realizarón con Origin 8.

## **VI. RESULTADOS**

En este apartado se presentan los datos obtenidos a partir de lo establecido en los objetivos específicos previamente descritos.

#### **6.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

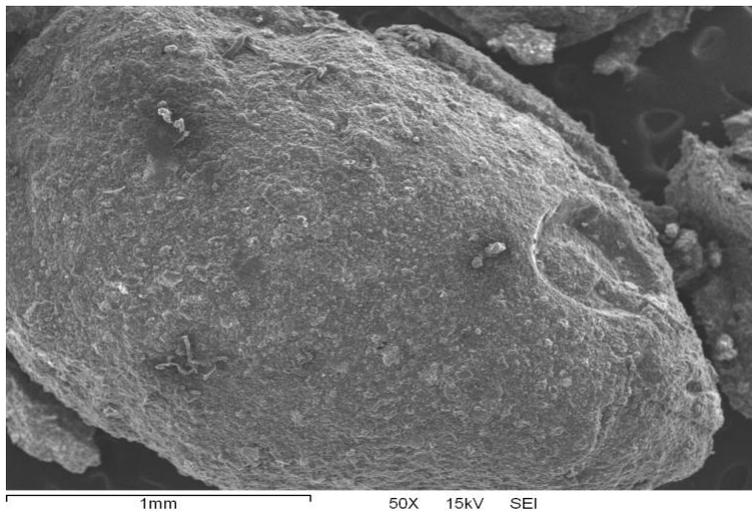
Con el propósito de demostrar la morfología del material compuesto y la forma en la que se encuentran unidos el quitosano y la chabazita se muestran las imágenes y análisis de MEB de quitosano y material compuesto. En la siguiente figura 4 se muestra una micrografía del quitosano, en la cual se aprecia una forma de red, misma que funge como matriz polimérica para dar lugar al material compuesto.



**Figura 4 Morfología del quitosano.**

Fuente: Burruel (2019).

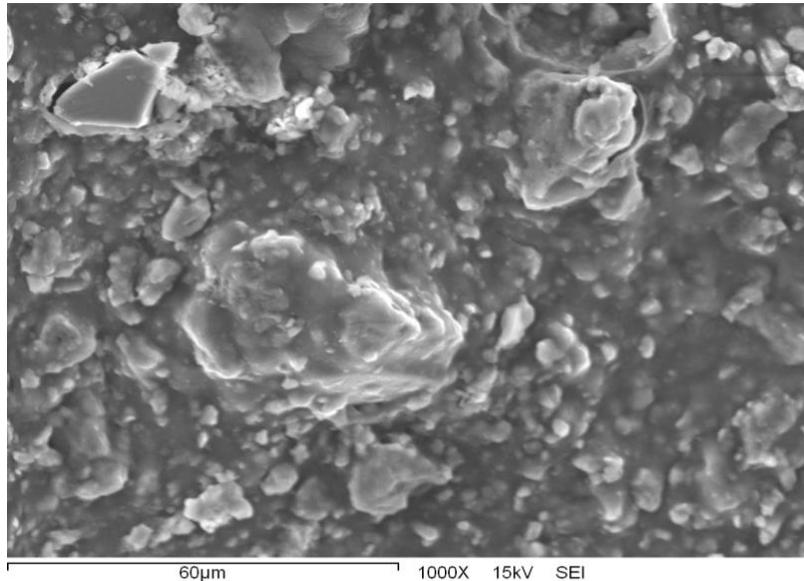
En la Figura 5 se muestra una imagen a una ampliación de 50 X de la morfología de una partícula de material compuesto.



**Figura 5 Morfología de una partícula de material compuesto.**

Fuente: Burruel (2019).

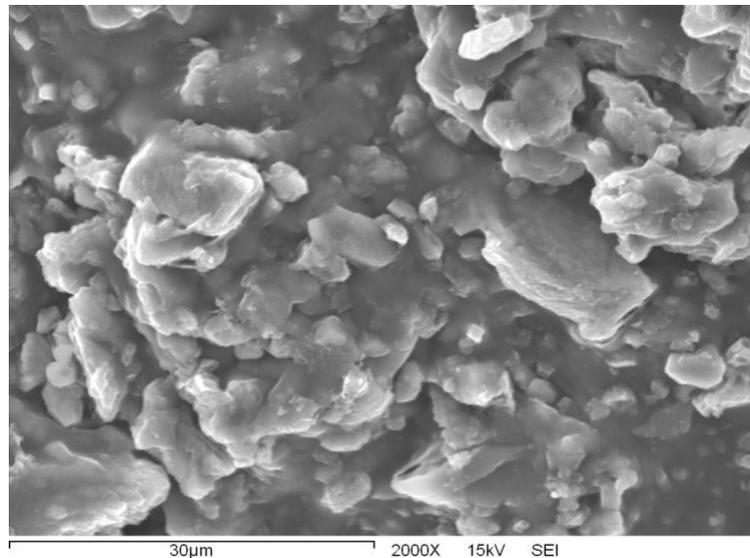
En la Figura 6 se muestra una imagen del material compuesto a una amplificación de 1 000 X, en donde se observan las incrustaciones de los cristales de chabazita en la superficie del quitosano.



**Figura 6 Morfología de una partícula de material compuesto a una amplificación de 1 000 X.**

Fuente: Burrueal (2019).

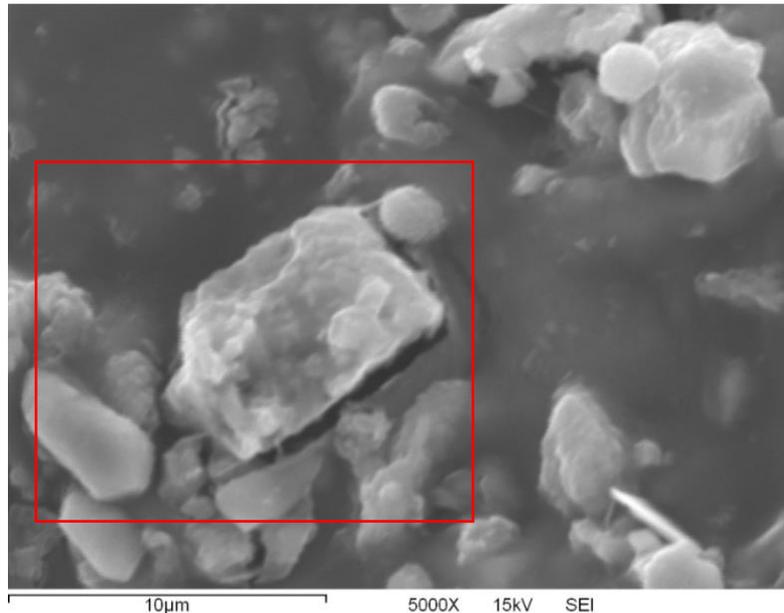
En la Figura 7 se muestra una imagen ampliada 2 000 X de la morfología del material compuesto en donde se observa con más claridad los cristales de chabazita unidos al quitosano.



**Figura 7 Morfología de una partícula de material compuesto a una amplificación de 2 000 X.**

Fuente: Burrueal (2019).

En la Figura 8 se muestra una imagen ampliada 5 000 X del material compuesto, donde se puede observar claramente que los cristales de la chabazita se encuentran embebidos en el quitosano, además se aprecia la forma semi cilíndrica característica de la zeolita, con sus vértices y sus aristas, en el recuadro rojo.



**Figura 8 Morfología de una partícula de material compuesto a una ampliación de 5 000 X.**

Fuente: Burrueal (2019).

## **6.2 Espectroscopia Infrarroja (IR)**

Las curvas correspondientes al material compuesto, zeolita y quitosano, para un rango de longitud de onda de 500 a 4 000  $\text{cm}^{-1}$ , se muestran en la figura 9. En el espectro de quitosano, las bandas de 3 360  $\text{cm}^{-1}$ , 2 880  $\text{cm}^{-1}$ , 1 585  $\text{cm}^{-1}$ , 1 148  $\text{cm}^{-1}$ , y 1 029  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a los picos de vibración de estiramiento de los grupos OH y NH, a la vibración de estiramiento axial del grupo CH, al grupo amino protonado, a la unidad de sacárido de quitosano, y a la vibración de estiramiento de los grupos CN y CO, respectivamente (Bashir et al., 2019). En el caso de la chabacita, existen dos tipos de vibraciones que son características de sus unidades constructivas; los correspondientes a O-T-O simétrico, estiramiento y flexión asimétricos y los relacionados con enlaces T-O-T que involucran un átomo de puente de oxígeno; T designa un átomo de Si o Al en la unidad de construcción tetraédrica  $\text{TO}_4$  de chabacita (Dimowa et al, 2018). En el espectro de la chabacita, la banda de aproximadamente 1 650  $\text{cm}^{-1}$  representa la vibración de flexión de las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$

y el estiramiento TO (Falk, 1984; Dimowa et al, 2018) y las de aproximadamente 3 670 y 3 450  $\text{cm}^{-1}$  denotan un grupo de OH que se encuentra en forma aislado y a uno unido por un átomo de H, respectivamente (Aysan et al., 2019). Se sabe que las bandas asociadas a vibraciones de los grupos Si-O-Si y Si-O-Al se ubican en la región de longitud de onda de 700 a 1 200  $\text{cm}^{-1}$ , el pico a 1 025  $\text{cm}^{-1}$  está relacionado con las vibraciones de estiramiento asimétrico OTO, mientras que la curva en forma de hombro a aproximadamente 1 140  $\text{cm}^{-1}$  es causada por el estiramiento asimétrico de Si-O-Si. El espectro del material compuesto muestra picos a aproximadamente a 3 360, 2 880 y 1 585  $\text{cm}^{-1}$  como el quitosano, y a 1 140 y 1 650  $\text{cm}^{-1}$  de manera similar a la chabacita. El pico de aproximadamente 1 030  $\text{cm}^{-1}$  coincide con bandas tanto de quitosano como de zeolita, ubicadas en las proximidades de ese valor.

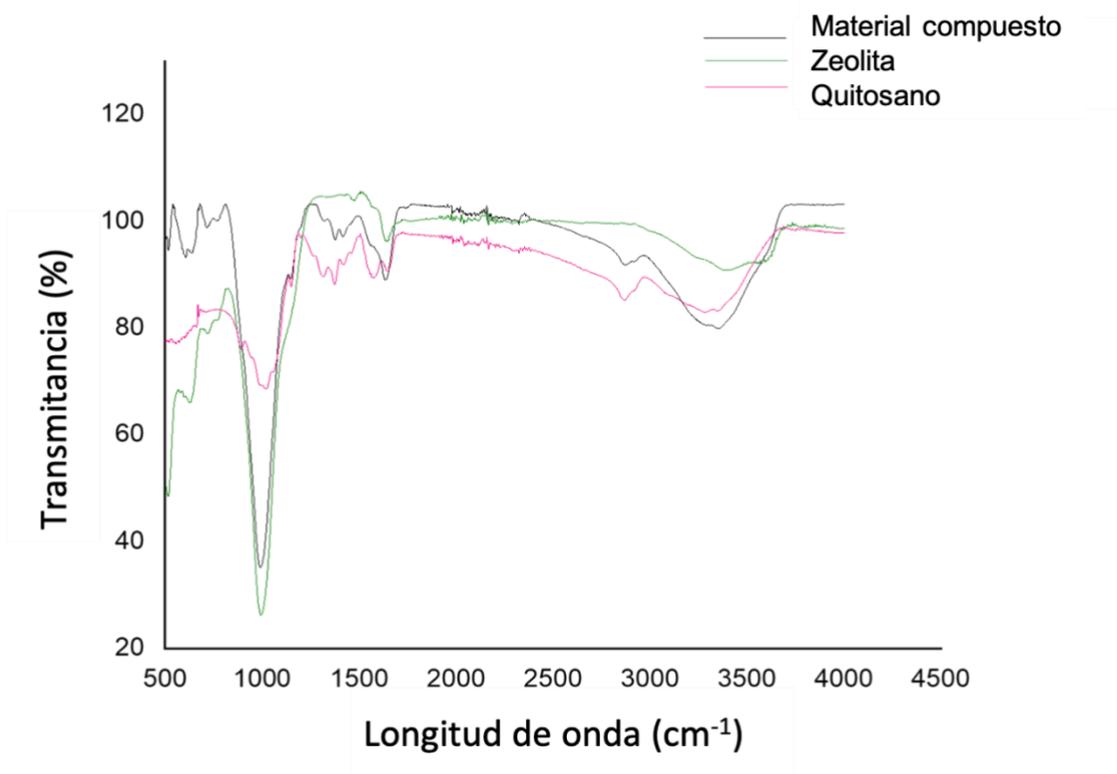


Figura 9 Espectro FTIR de zeolita, quitosano y material compuesto.

Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Análisis térmico por termogravimetría (TGA)

Para conocer la termorresistencia y la temperatura máxima a la que se producen los cambios que afectan la estructura del material compuesto, una muestra del mismo se sometió a un análisis termogravimétrico. La pérdida de peso progresiva que se produjo a medida que aumentaba la temperatura se muestra en la figura 10.

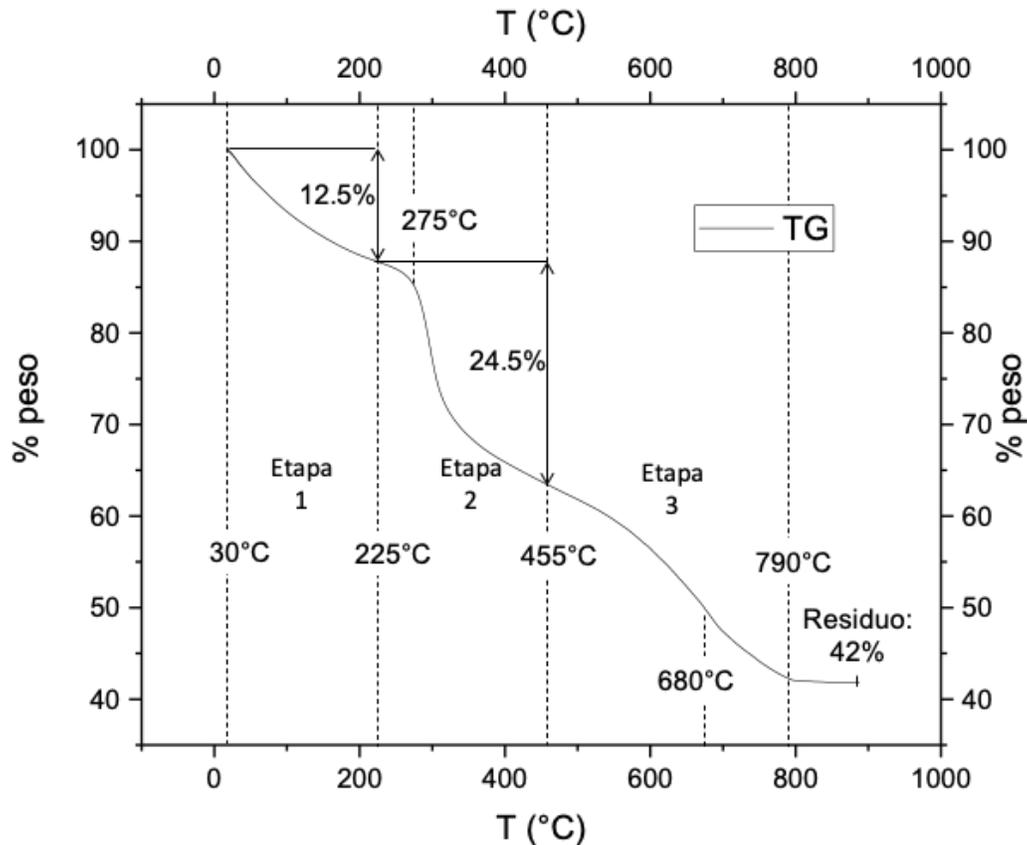


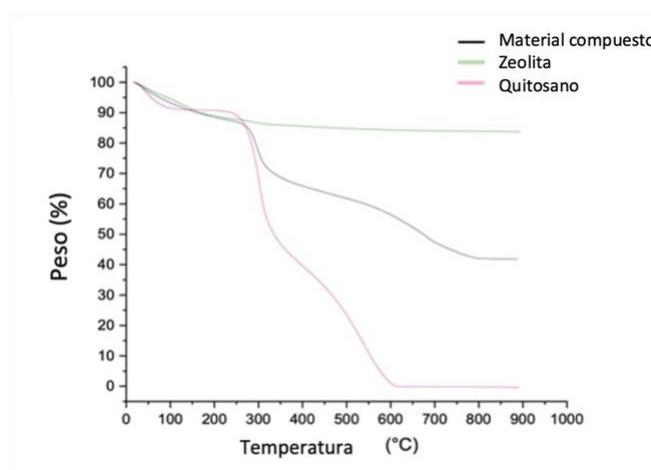
Figura 10 Gráfico que muestra la trayectoria de reducción de peso del material compuesto obtenido a partir de los resultados del análisis termo gravimétrico.

Fuente: Elaboración propia.

Se pueden identificar tres etapas importantes a lo largo de la curva que describen la disminución de peso asociada con el aumento de temperatura; la primera tiene lugar entre 30 °C y 225 °C y corresponde a una reducción de peso del material compuesto del 12.5 %, originada por la pérdida de humedad. Esto es seguido por una disminución significativa de hasta el 24.5 % entre 225 °C y 455 °C, que se vuelve particularmente abrupta a 275 °C, y está relacionada con la degradación de los sacáridos en la estructura molecular del quitosano. Finalmente, la última etapa ocurre cuando la temperatura aumenta de 455 °C a

790 °C, y conduce a la descomposición final del material a aproximadamente 680 °C. Estos datos concuerdan con los reportados por Escobar, et al., (2013) y Wan, et al., (2012).

El análisis muestra que la chabacita representa el 42 % de la masa total del material compuesto. Esto se puede ver más claramente en la Figura 11, donde se muestran gráficamente las trayectorias de la pérdida de peso a lo largo del tiempo obtenidas de los análisis termogravimétricos realizados en muestras separadas de zeolita, material compuesto y quitosano. La curva en la parte superior revela que la reducción de peso total de la zeolita llegó a ser aproximadamente el 15 % de su valor inicial. La curva describe la pérdida gradual de peso que tuvo lugar a medida que la temperatura subió de 25 a 300 °C y la estabilización del peso de la muestra que se produjo desde este punto hasta los 900 °C. La ausencia notable en los puntos de inflexión denota que solo un mecanismo es responsable de la pérdida de peso inicial, es decir, pérdida de humedad, y que nunca se produjeron transformaciones químicas en la estructura de la zeolita que impliquen la liberación de compuestos gaseosos. Las otras curvas, correspondientes al material compuesto y al quitosano, presentan una forma similar, aunque la curva del quitosano es mucho más pronunciada que la del compuesto. Las temperaturas a las que se encuentran los puntos de inflexión a lo largo de estas dos curvas son sorprendentemente similares hasta 400 °C; por encima de él, los puntos de inflexión en la curva del material compuesto se muestran a una temperatura más alta que en la del quitosano. Esto parece indicar que el quitosano, cuando es una parte integral del compuesto, se degrada a un ritmo más lento que el quitosano puro a altas temperaturas.



**Figura 11** Gráfico que muestra la ruta de reducción de peso para zeolita, material compuesto y quitosano obtenido a partir de los resultados del análisis termo gravimétrico.

Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Experimentos de cinética de sorción

Antes de llevar a cabo los experimentos de cinética se prepararon 4 disoluciones de 5 mL a partir de una solución madre de 50 ppm y se tomaron 5 mL de la solución madre para obtener una curva de calibración. La primer disolución se preparó a una concentración de 10 ppm, la segunda de 20 ppm, la tercera de 30 ppm y la cuarta de 40 ppm. La curva de calibración se muestra en la siguiente Figura:

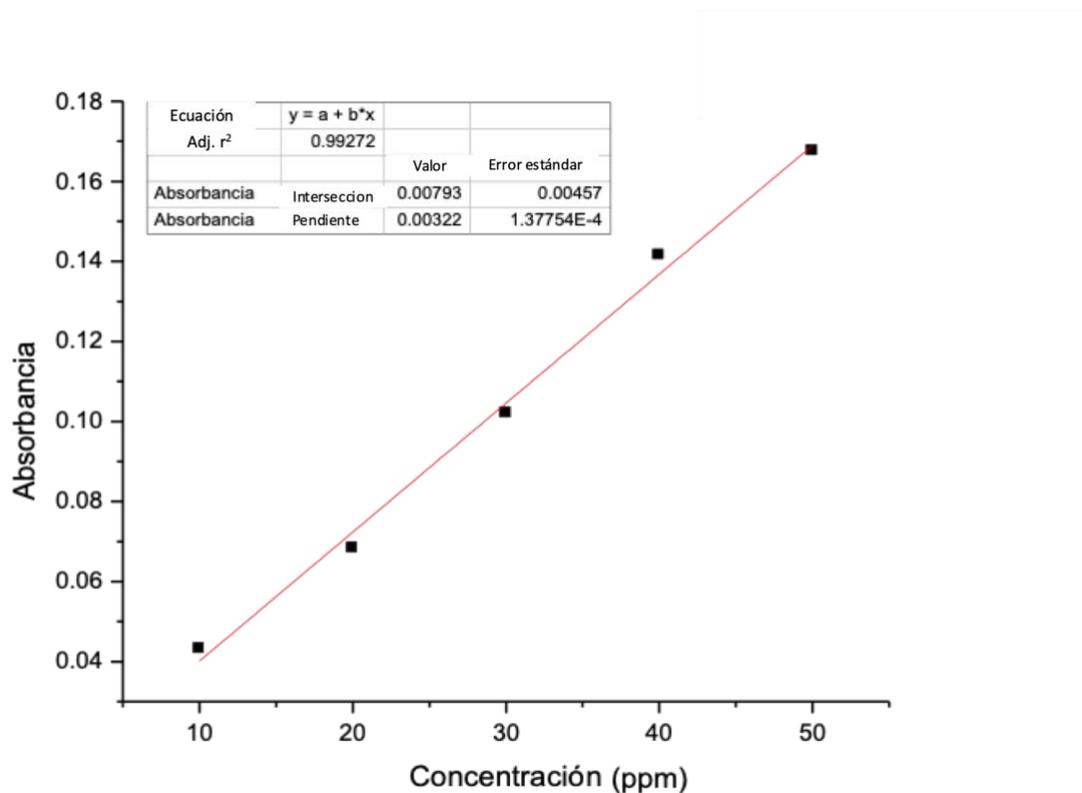
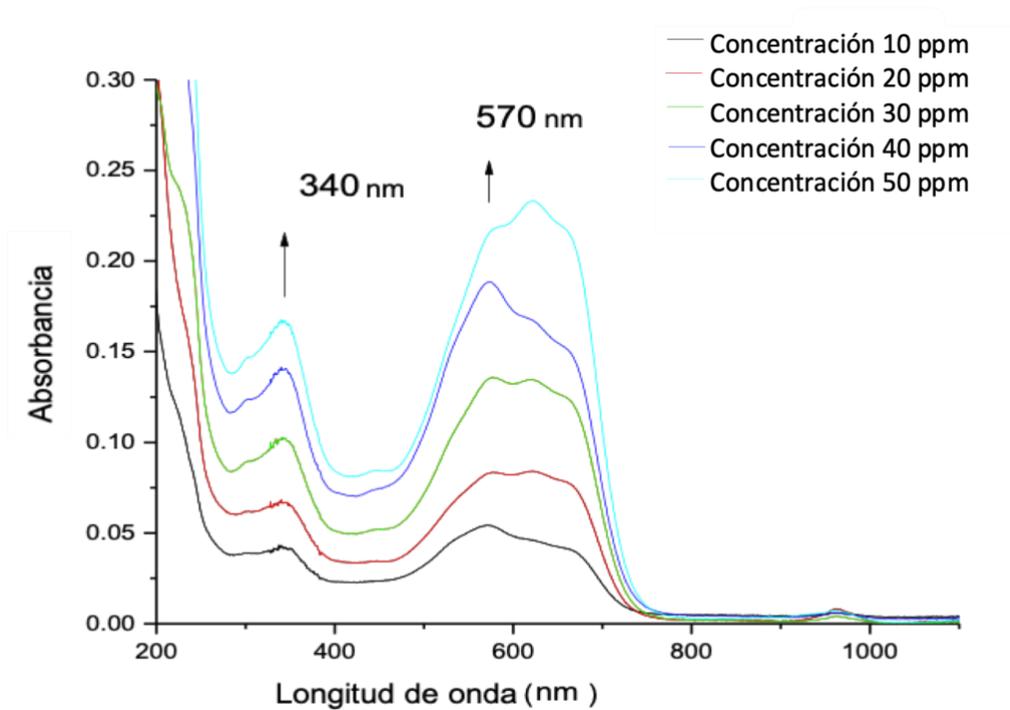


Figura 12 Curva de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

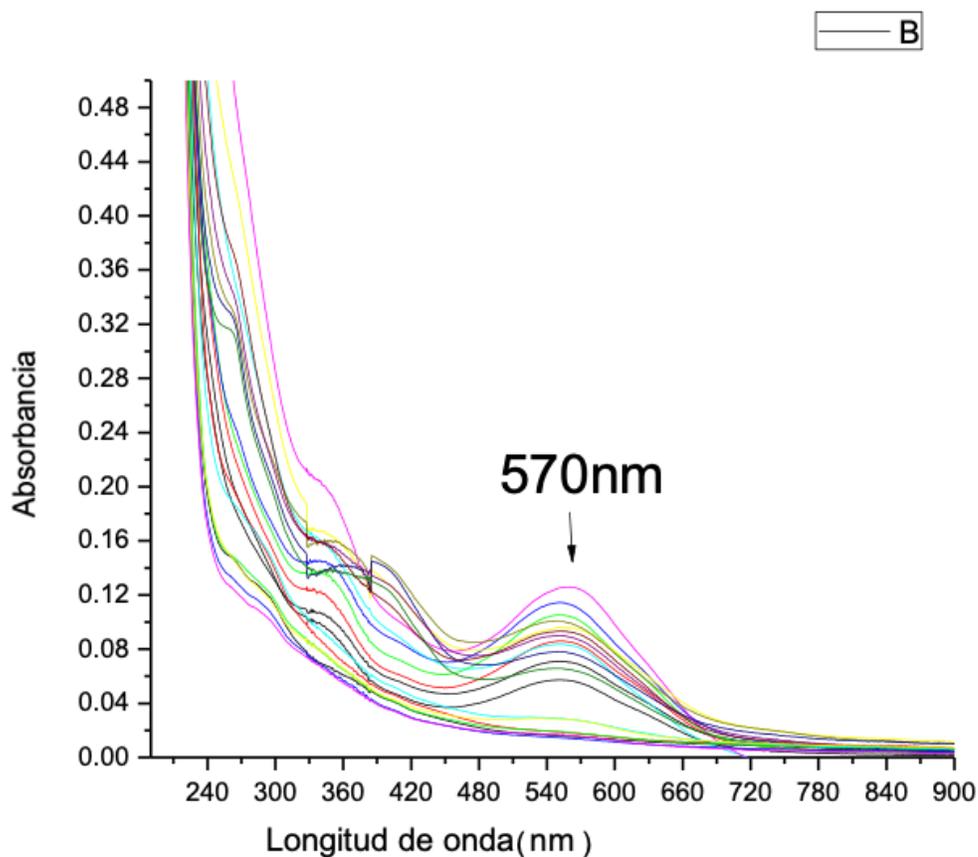
En la Figura 13 se muestra la curva de calibración en términos de longitud de onda, donde se puede observar dos picos significativos a los 340 nm y 570 nm.



**Figura 13** Curva de calibración en términos de longitud de onda.

Fuente: Elaboración propia.

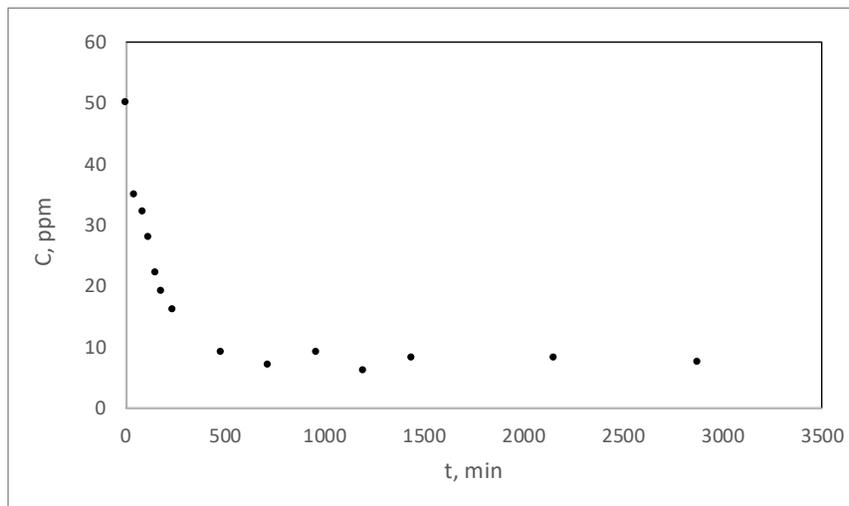
En la Figura 14 se muestra la gráfica de la cinética de sorción en donde se puede apreciar que las muestras coinciden con el pico a 570 nm de la curva de calibración de la Figura 10. Con el valor de absorbancia de cada muestra a los 570 nm y con la ayuda de la gráfica de la Figura 11 se puede conocer la concentración de cada muestra y de esta manera se comprueba que hay una disminución en la concentración de las diferentes muestras.



**Figura 14** Cinética de sorción en términos de longitud de onda. Cada curva representa un tiempo de contacto determinado que, de manera ascendente, van desde los 5 min hasta las 48 h.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de los experimentos cinéticos consistieron en valores de concentración de colorante en la fase líquida medidos en diferentes momentos, cuando la concentración inicial de la solución, pH y volumen se mantuvieron constantes, así como la cantidad de sorbente utilizado. La Figura 15 muestra la disminución en la concentración líquida de colorante Negro de Eriocromo T con el tiempo cuando se pusieron en contacto con 15 mL de una solución a 50 ppm con 0.5 g de material compuesto. La concentración de la solución una vez alcanzado el equilibrio fue de aproximadamente 7.0 ppm y la del sorbente de 4.25 mg g<sup>-1</sup>. Esto representa una reducción del 86 % de la concentración de colorante en solución en aproximadamente 500 minutos e implica que el material tiene la capacidad de eliminar apreciablemente el colorante Negro de Eriocromo T del agua.



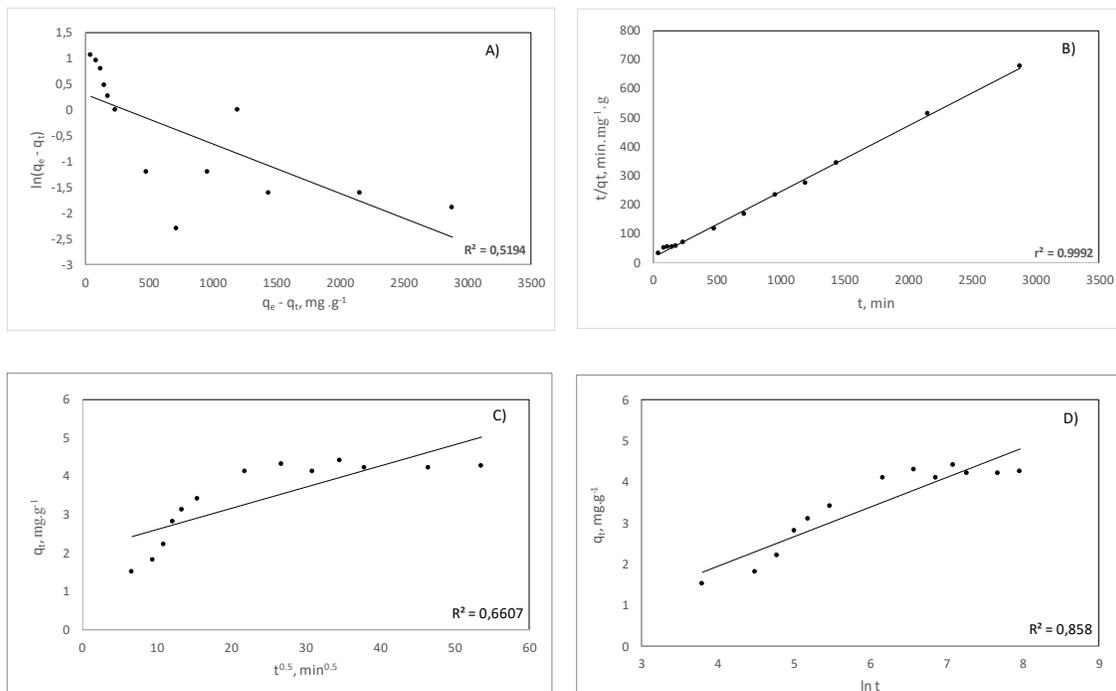
**Figura 15 Cambio observado en la concentración de colorante en solución con el tiempo en experimentos cinéticos.**

Fuente: Guzmán (2021).

## VII. DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de experimentos cinéticos se analizaron utilizando las formas linealizadas de las ecuaciones de pseudo-primer orden (PPO), pseudo-segundo orden (PSO), difusión intraparticular (IP) y Elovich. La concentración de la fase sólida, en cada tiempo de muestreo, se calculó determinando la masa de sorbato eliminada de la solución en función del cambio en la concentración de la fase líquida y el volumen de solución utilizado, y luego dividiendo ese valor entre la cantidad de sorbato.

La medida en que los valores derivados de la información experimental realmente se ajustaban a una línea recta, cuando se consideraron las formas linealizadas de las ecuaciones que describen cada modelo cinético particular. La evaluación se realizó graficando  $\ln(q_e - q_t)$  vs  $t$  para el caso del modelo PPO, y  $t / q_t$  vs  $t$ ,  $q_t$  vs  $t^{0.5}$  y  $q_t$  vs  $\ln t$  para los modelos PSO, IP y Elovich, respectivamente. La idoneidad de las distribuciones de datos que se ajustan a una línea recta se evaluó mediante un análisis de regresión lineal. Los valores del coeficiente de correlación lineal,  $R$ , obtenidos en cada caso se muestran en las respectivas gráficas (fig. 16).



**Figura 16** Gráficos que muestran los datos derivados de resultados experimentales de acuerdo con las formas linealizadas del orden PPO (A), PSO (B), IP (C) y ecuaciones de Elovich.

Fuente: Guzmán (2021).

Los modelos PPO y PSO se han utilizado comúnmente para caracterizar la naturaleza de los procesos de adsorción. Ninguno de estos dos enfoques tiene en cuenta el efecto de la difusión de masa en relación con el proceso de adsorción / desorción, sino que se basan en la consideración de que es la velocidad a la que el sorbato interactúa con la superficie del sorbente, y el tipo de interacción, que se supone que es de naturaleza inherentemente irreversible, que en realidad controla la cinética de sorción (Plazinski et al, 2013). Para los sistemas que se ajustan al modelo de adsorción de PPO, se cree que el adsorbato se une a la superficie del sorbente a través de fisorción, mientras que la quimisorción es el mecanismo asociado con un modelo de PSO. Las reacciones superficiales que muestran esquemáticamente la unión del sorbato a la superficie para el PPO y PSO respectivamente, pueden representarse mediante las siguientes ecuaciones (Largitte y Pasquier, 2016):





La ecuación 5 también describe el mecanismo cinético que tiene lugar de acuerdo con el enfoque de Elovich, aunque este modelo supone que los iones sorbidos interactúan mediante quimisorción con la superficie sólida y que la tasa de adsorción disminuye a medida que aumenta la cobertura de la superficie (Largitte y Pasquier, 2016). La quimisorción implica la formación de un enlace químico debido a la transferencia o intercambio de electrones entre el sorbato y el sorbente (Largitte y Pasquier, 2016). La fisisorción implica fuerzas de atracción electrostáticas débiles y ninguna modificación de la estructura química del sorbente. Por tanto, para evaluar la importancia de la difusión, es necesario recurrir a otros modelos, como el modelo IP.

Del análisis de los resultados experimentales de este estudio, resultó que la fuerza de las relaciones lineales de las distribuciones de datos, medidas por el coeficiente de determinación,  $r^2$ , arrojó un valor aceptable solo cuando la forma linealizada de la ecuación del modelo PSO, siendo 0.9992. Esto sugiere que el proceso se rige por un mecanismo de reacción de segundo orden para el que se aplican los supuestos generales que pertenecen al modelo PPO. Como se mencionó anteriormente, se ha afirmado que el ajuste de los datos a un modelo de PSO es indicativo de que la quimisorción es el mecanismo que controla la adsorción; aunque esta no es una evaluación generalmente aceptada y ha sido refutada por algunos investigadores sobre la base de que tal hecho no es evidencia suficiente de la formación de un enlace químico entre el sorbato y el sorbente (Azizian, 2004). En cambio, se ha atribuido a los niveles de concentración inicial un papel más decisivo en la explicación de los mecanismos de adsorción observados; con el proceso de PSO favorecido por bajas concentraciones de sorbato y PPO por altas (Azizian, 2004).

El ajuste de los datos a la forma linealizada del modelo de Elovich arrojó el segundo valor más alto para  $r^2$ , 0.858. A pesar de ser inferior a 0.9, que se considera un valor estáticamente aceptable para derivar conclusiones, esto parece corroborar en cierta medida la presencia de quimisorción como principal mecanismo de unión del sorbato a la sorción del sorbente. En lo que respecta al modelo IP, el bajo valor de  $r^2$  que se obtuvo puede ser en respuesta a la agitación mecánica proporcionada durante los experimentos, lo que eliminó la posibilidad de que la difusión fuera la etapa limitante en el proceso de adsorción.

El porcentaje de remoción se calculó mediante la diferencia entre la concentración inicial, 50 ppm, menos la concentración final, 10 ppm, entre la concentración inicial por 100, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Donde,  $C_i$  es la concentración inicial y  $C_f$  la concentración final.

El porcentaje de remoción del material compuesto fue de 86 %. Este valor se puede comparar con el estudio de otros autores como Akhouairi, et al., (2019), quienes utilizaron aserrín natural para adsorber Negro de Eriocromo T a una concentración de 50 ppm con un tiempo de contacto de 120 min, obtenido, a un pH 6, un porcentaje de remoción de 27 %. De igual manera, Pragnesh, Kaur y Khosla, (2011) para remover Negro de Eriocromo T, utilizaron como sorbente corteza de eucalipto, obteniendo un porcentaje de remoción de 40 % a un pH 6 con una concentración inicial de 250 mg L<sup>-1</sup> con 12.5 g de sorbente. Así como, Khurana, et al., (2017) quienes utilizaron óxido de grafeno magnético para remover Negro de Eriocromo T de agua, obteniendo un porcentaje de remoción de 60 % en los primeros 15 min a pH 2 con 0.5 g de sorbente, sin embargo el tiempo al cual se llegó al equilibrio fue de 5 h.

Por lo tanto, en base a los resultados de diversos autores, podemos decir que el material compuesto elaborado a base de quitosano y chabazita muestra un porcentaje de remoción mayor en comparación con otros sorbentes de origen natural.

## **VIII. CONCLUSIONES**

El compuesto de quitosano-chabacita obtenido y estudiado en esta investigación mostró tener la capacidad de remover el colorante Negro de Eriocromo T del agua en un 86 % bajo las condiciones experimentales de pH 7 a temperatura ambiente.

La investigación bibliográfica muestra que el porcentaje de remoción del material elaborado es mayor en comparación con otros materiales naturales.

La evidencia muestra que los mecanismos que controlan el proceso de adsorción se ajustan a un modelo de PSO en las condiciones prevalecientes durante los experimentos. Esto puede ser el resultado de la baja concentración de colorante inicial que se utilizó y de la formación de enlaces de naturaleza química entre el sorbato y el sorbente.

## **IX. RECOMENDACIONES**

Se sugiere realizar más experimentos tomando en cuenta otras variables como lo sería el pH, temperatura, velocidad de agitación, masa de sorbente, entre otros. Además de realizar isotermas de sorción.

## X. REFERENCIAS

- Ahmad, M., Ahmed, S., Swami, B. & Ikram, S., 2015. Adsorption of heavy metals ions: role of chitosan and cellulose for water treatment. *International Journal of Pharmacognosy*, 2(6), 280-289. [Consultado el 23/III/2019].
- Akhouairi, S., Ouachtak, H., Addi, A. A., Jada, A., & Douch, J. (2019). Natural Sawdust as adsorbent for the Eriochrome Black T Dye Removal from Aqueous Solution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(8). [Consultado el 07/V/2021].
- Almeida, E. & Corso, C., 2019. *Decolorization and removal of toxicity of textile azo dyes using fungal biomass pelletized*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1319-1328. [Consultado el 15/VII/2019].
- Alvarado, A., Antuna, D., Reyes, M., García, A., Vázquez, E., González, L., Proal, J., & Quintos, M., 2010. *Procesos fisicoquímicos para remoción de contaminantes en el agua (breve revisión)*. [pdf]. Disponible en : <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8213/1/PROCESOS%20...pdf> [Consultado el 04/III/2019].
- Álvarez, L., Valdez, R., García, R., Olivo, D., Garza, M, Meza, E. & Gortáez, P., 2015. *Decolorization and biogas production by an anaerobic consortium: effect of different azo dyes and quinoid redox mediators*. *Water Science and Technology*, 72(5), 794-801. [Consultado el 15/VII/2019].
- Ayawei, N., Ebelegi, A. & Wankasi, D., 2017. Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, 1-11. [Consultado el 25/III/2019].
- Aysan, H., Edebalı, S., Ozdemir, C., Celik, M. & Karakaya, N., 2016. Use of chabazite, a natural abundant zeolite, for the investigation of the adsorption kinetics and mechanism of methylene blue dye. *Microporous and Mesoporous Materials*, 235, 78-86.
- Azizian, S. 2004. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 276(1), 47-52.
- Barajas, J., Cano, M., Castorena, J., Santiago, V. & Díaz, J., 2016. *Remoción de colorantes por medio de curcubitáceas*. *Avances en ciencias e ingeniería*, 7(4), 67-80. [Consultado el 08/VII/2019].
- Barberá, M., Torres, S., Molina, J., Bonini, N., Gonzo, E., & Pérez, N. 2014. Adsorción de Pb(II) en soluciones acuosas sobre hidroxipatita de calcio sintética. Estudio cinético y termodinámico del proceso de sorción. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 33, 15-24. [Consultado el 26/III/2019].
- Barrios, L., Gavira, L., Agudelo, E. & Cardona, S., 2015. *Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales*. *DYNA*, 82(191), 118-126. [Consultado el 08/VII/2019].
- Bos Tech, 2018. *Tratamiento de agua por intercambio iónico*. [en línea]. Disponible en: <https://bosstech.pe/blog/tratamiento-de-agua-por-intercambio-ionico/> [Consultado el 10/III/2019].
- Bouyahmed, F., Cai, M., Reinert, L., Duclaux, L., Kumar, R., Youcef, H., Lahcini, M., Muller, F., Delpoux, S., 2018. A wide adsorption range hybrid material based on chitosan, activated carbon and montmorillonite for water treatment. *Journal of Carbon Research*, 4(35). [Consultado el 21/III/2019].
- Buscio, V., 2015. *Tratamiento y reutilización de efluentes de la industria textil mediante técnicas de membranas*. Doctorado. Universitat Politècnica de Catalunya [Consultado el 08/VII/2019].
- Bushra, R., Ahmed, A. & Shahadat, M., 2017. Mechanism of adsorption on nanomaterials. *Royal Society of Chemistry*, Chap. 5, 9(1). [Consultado el 25/III/2019].
- Cconislla, J., Jacinto, C., Maza, I., Jahuirra, M., Pando, A., Mayta, H., & Valderrama, A. 2016. Desarrollo de micropartículas de quitosano cuaternizado y entrecruzado para la adsorción de ácido desoxirribonucleico. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4). [Consultado el 26/III/2019].
- Cestarolli, D., das Graças de Oliveira, A. & Guerra, E., 2019. *Removal of eriochrome black textile dye from aqueous solution by combined electrocoagulation-electroflotation methodology*. *Applied Water Science*, 9(101). [Consultado el 19/VII/2019].
- Chaves, S., 2017. Ensayos de intercambio catiónico de zeolitas naturales con elementos de tierras raras. Máster. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: [http://oa.upm.es/47314/1/TFM\\_Sandra\\_Chaves\\_Martin..pdf](http://oa.upm.es/47314/1/TFM_Sandra_Chaves_Martin..pdf) [Consultado el 10/III/2019].
- Chung, K., 2016. *Azo dyes and human health: a review*, *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 34(4), 233-261. [Consultado el 15/VII/2019].
- Cortés, R., 2007. *Efecto de la modificación de una zeolita natural mexicana en la sorción de cadmio y 4-clorofenol*. Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México [Consultado el 26/III/2019].
- Costafreda, J., 2014. Tectosilicatos con características especiales: las zeolitas naturales. *Universidad Politécnica de Madrid*. [pdf] Disponible en: [http://oa.upm.es/32548/1/Tectosilicatos\\_Costafreda.pdf](http://oa.upm.es/32548/1/Tectosilicatos_Costafreda.pdf) [Consultado el 25/II/2019].
- Dehghani, M., Dehghan, A. & Najafpoor, A., 2017. Removing reactive red 120 and 196 using chitosan/zeolite composite from aqueous solutions: kinetics, isotherms, and process optimization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 51, 185-195. [Consultado el 25/III/2019].
- Dimowa, L., Piroeva, I., Atanasova, V., Rusew, R. & Shivachec, B. 2018. Structural peculiarities of natural chabazite modified by ZnCl<sub>2</sub> and NiCl<sub>2</sub>. *Bulgarian Chemical Communications*, 50, 114-122.

- Dos Santos, A., Sirés, I., Martínez, C. & Brillas, E., 2018. *Total mineralization of mixtures of tartrazine, ponceau ss and direct blue 71 azo dyes by solar photoelectron-fenton in pre-pilot plant*. *Chemosphere*, (210), 1137-1144. [Consultado el 15/VII/2019].
- Flores, A., 2015. *Estudios de equilibrio de adsorción de fluoruros sobre compositos a base de quitosano*. Maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí [Consultado el 25/III/2019].
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2012. *Textiles, mezclillas de marca, contaminan en México*. [en línea] Disponible en: <https://agua.org.mx/textiles-mezclillas-de-marca-contaminan-en-mexico/> [Consultado el 25/VII/2019].
- Galán, J., 2013. *Preparación y síntesis de materiales adsorbentes para la eliminación de contaminantes en efluentes acuosos*. Doctorado. Universidad Complutense de Madrid [Consultado el 17/II/2019].
- Gallardo, E., Maioco, S. & Francois, N., 2014. *Remoción de un colorante básico por adsorción con quitosano y con un material compuesto de quitosano-zeolita*. [en línea]. Disponible en: <https://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje2/2.10.pdf> [Consultado el 02/III/2019].
- GOB, 2017. Objetivo de desarrollo sostenible 6: agua limpia y saneamiento. [en línea] Disponible en: <https://www.gob.mx/agenda2030/articulos/6-agua-limpia-y-saneamiento> [Consultado el 28/III/2019].
- Gürses, A., 2019. *Sustainable colorants*. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology, 21-55. [Consultado el 15/VIII/2019].
- Gürses, A., Acikyildiz, M., Günes, K. & Gürses, M., 2016. *Classification of Dye and Pigments*. *Dyes and Pigments*, 31-45. [Consultado el 15/VIII/2019].
- Ibarrarán, M., Mendoza, A., Pastrana, A., & Manzanilla, E., 2016. Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región y Sociedad*, 19. [Consultado el 27/III/2019].
- Kajjumba, G., Emik, S., Ongen, A., Kurtulus, H. & Aydin, S., 2018. *Modelling of Adsorption Kinetic Processes – Errors, Theory and Application*. *Advanced Sorption Process Applications*.
- Karimi, M., Mahdavinia, G., Massoumi, B., Baghban, A. & Saraei, M., 2018. *Ionically crosslinked magnetic chitosan/k-carrageenan bioadsorbents for removal of anionic eriochrome black-T*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 361-375. [Consultado el 23/VII/2019].
- Khurana, I., Shaw, A., Bharti, Khurana, J. & Rai, P., 2018. *Batch and dynamic adsorption of eriochrome black-T from water on magnetic graphene oxide: experimental and theoretical studies*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 468-477. [Consultado el 23/VII/2019].
- Kumar, S., Prasad, K., Gil, J., Sobral, A., & Khon, J., 2018. Mesoporous zeolite-chitosan composite for enhanced capture and catalytic activity in chemical fixation of CO<sub>2</sub>. *Carbohydrate Polymers*, 198, 401-406. [Consultado el 02/III/2019].
- Kyzas, G. & Bikiaris, D., 2015. Recent modifications of chitosan for adsorption applications: a critical and systematic review. *Marine Drugs*, 13, 312-337. [Consultado el 23/III/2019].
- Kyzas, G. & Bikiaris, D., & Mitropoulos, A., 2017. Chitosan adsorbents for dye removal: a review. *Polymer International*, 66(12), 1800-1811. [Consultado el 27/III/2019].
- Lakhan, R., Kumar, P. & Pratap, R., 2015. *Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes-a review*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 21-31. [Consultado el 15/VII/2019].
- Lazo, J., Navarro, A., Sun-Kou, M., & Llanos, B., 2008. Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 74(1), 3-19. [Consultado el 26/III/2019].
- Largitte, L., & Pasquier, R., 2016. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495-504.
- Li, J., Corma, A., & Yu, J., 2015. Synthesis of new zeolite structures. *Royal Society of Chemistry*, 44(20), 7112-7121. [Consultado el 17/II/2019].
- Manrique, L., Bonilla, N., Chica, R., Otálora, J., & Salamanca, M., 2015. Estudio preliminar de la capacidad de remoción de iones inorgánicos de una zeolita sintética tipo faujasita. *Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 114-123. [Consultado el 10/III/2019].
- Mendoza, A., Flores, J., Acosta, M., Vidal, J., & Paz, F., 2014. Estudio sobre la incorporación y retención de plomo en zeolita natural. [en línea] Disponible en: [http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/17-3PLOMO\\_EN\\_ZEOLITA.pdf](http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/17-3PLOMO_EN_ZEOLITA.pdf) [Consultado el 17/II/2019].
- Moeinpour, F., Alimoradi, A. & Kazemi, M., 2014. *Efficient removal of eriochrome black-T from aqueous solution using NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles*. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1). [Consultado el 23/VII/2019].
- Nieto, A., 2015. *Adsorción del colorante amarillo básico 13 en una arcilla tipo montmorillonita*. Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional [Consultado el 02/VII/2019].
- Oladoja, N., Unuabonah, E., Amuda, O., & Kolawole, O., 2017. Operational principles and material requirements for coagulation/flocculation and adsorption-based water treatment operations. *Polysaccharides as a Green and Sustainable Resources for Water and Wastewater Treatment*, 1-11. [Consultado el 11/II/2019].
- OMS, 2018. Agua. [en línea] Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> [Consultado el 28/III/2019].

- ONU, 2014. Calidad del agua. [en línea] Disponible en: <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml> [Consultado el 27/III/2019].
- ONU, 2018. La agenda de desarrollo sostenible. [en línea] Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/> [Consultado el 28/III/2019].
- Paredes, R., Ramírez, A., Osuna, E., Alamilla, P., & Mandujano, A., 2013. Zeolita natural: alternativa ecológica y económica para la agricultura de temporal en México. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. [pdf] Disponible en: [http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3919/CIRCE\\_010208153800039686ok.pdf?sequence=1](http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3919/CIRCE_010208153800039686ok.pdf?sequence=1) [Consultado el 25/II/2019].
- Park, J., Wang, J., Tafti, N. & Delaune, R., 2018. *Removal of eriochrome black T by sulfate radical generated from Fe-impregnated biochar/persulfate in fenton-like reaction*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. [Consultado el 23/VII/2019].
- Pérez, A., Díaz, P., Rangel, J., Cerino, F., Ovando, V., & Alcalá, J., 2016. Fluoride adsorption capacity of composites based on chitosan-zeolite-algae. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(1), 139-147. [Consultado el 01/III/2019].
- Penedo, M., Manals, E., Vendrell, F., & Salas, D., 2014. Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. *Universidad de Oriente*. [Consultado el 26/III/2019].
- Plazinski, W., Dziuba, J., & Rudzinski, W., 2013. *Modeling of sorption kinetics: the pseudo-second order equation and the sorbate intraparticle diffusivity*. *Adsorption*, 19(5), 1055-1064.
- Pragnesh, D., Kaur, S., & Khosla, E., 2011. *Removal of Eriochrome black-T by adsorption on the eucalyptus bark using green technology*. *Indian Journal of Chemical Technology*, 18, 53-60.
- Premakshi, H., Ramesh, K. & Kariduraganavar, M., 2015. Modification of crosslinked chitosan membrane using NaY zeolite for pervaporation separation of water-isopropanol mixtures. *Chemical Engineering Research and Design*, 94, 32-43. [Consultado el 25/III/2019].
- Ramírez, I., & Muñoz, E., 2017. Adsorbentes y materiales utilizados para filtración y reducción de contaminantes en aguas potables. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología*, 3. [Consultado el 17/II/2019].
- Rincón, N., Cortes, R., & Arrubla, J., 2016. Cálculo de las isotermas de adsorción para el pesticida clorpirifós en agua cruda de la planta de potabilización de la ciudad de Pereira. *Universidad Tecnológica de Pereira*. [Consultado el 26/III/2019].
- Rivas, C., Núñez, O., Longoria, F., & Gonzalez, L., 2014. Isotherma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO<sub>3</sub>. *Universidad de Oriente*, 26(1), 43-49. [Consultado el 28/II/2019].
- Robledo, J., Venegas, E., & García, N., 2014. Aplicación del sistema holandés para la evaluación de la calidad del agua. Caso de estudio Lago de Izabal, Guatemala. *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(2), 15-21. [Consultado el 27/III/2019].
- Rovira, D., Branda, G., Valdés, B., Castillo, A., & Rivera, R., 2018. El agua, elemento clave para la seguridad alimentaria. Estudio de caso: Calidad del agua de consumo de urbanizaciones de David y Dolega. *Revista Plus Economía*, 6(2), 32-40. [Consultado el 27/III/2019].
- Sandoval, F., López, J., & Gracia, J., 2015. Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educación Química*, 26(4), 307-313. [Consultado el 25/III/2019].
- Sarangapani, C., Misra, N., Milosavljevic, V., Bourke, P., O'Regan, F., & Cullen, P., 2016. Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 225-232. [Consultado el 01/II/2019].
- Secretaría de Gobernación, 2014. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. [en línea] Disponible en: [http://www.dof.gob.mx/constitucion/marzo\\_2014\\_constitucion.pdf](http://www.dof.gob.mx/constitucion/marzo_2014_constitucion.pdf) [Consultado el 27/III/2019].
- Simanca, M., Álvarez, B., & Paternina, R., 2010. Calidad física, química y bacteriológica del agua envasada en el municipio de Montería. *Temas Agrario*, 15(1), 71-83. [Consultado el 27/III/2019].
- Tegl, G., Stagl, V., Mensah, A., Huber, D., Somitsch, W., Kracht, S. & Guebitz, G., 2018. The chemo enzymatic functionalization of chitosan zeolite particles provides antioxidant and antimicrobial properties. *Engineering in Life Sciences*, 18(5), 334-340. [Consultado el 23/III/2019].
- Torres, J., 2005. *Evaluación de las propiedades adsorbentes de una roca zeolítica modificada para la remoción de colorantes azóicos como contaminantes del agua*. Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México [Consultado el 02/VII/2019].
- Tran, V., Ngo, H., Guo, W., Zhang, J., Liang, S., Ton-That, C. & Zhang, X., 2015. Typical low-cost bio sorbents for adsorptive removal of specific organic pollutants from water. *Bioresource Technology*, 182, 353-363. [Consultado el 01/II/2019].
- Uddin, M., 2017. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438-462. [Consultado el 11/II/2019].
- Valladares, M., Cárdenas, V., de la Cruz, P., & Melgoza, R., 2018. Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73. [Consultado el 14/II/2019].

- Vargas, C., Carriazo, J., Castillo, E., 2011. Estudio de materiales adsorbentes de bajo costo para remover Cr(VI) de efluentes acuosos. *Ingeniería e Investigación*, 31, 154-162. [Consultado el 17/II/2019].
- Veerakumar, P., Jeyapragasam, T., Surabhi, Salamalai, K., Maiyalagan, T. & Lin, K., 2019. *Functionalized mesoporous carbon nanostructures for efficient removal of eriochrome black-T from aqueous solution*. Journal of Chemical & Engineering Data. [Consultado el 23/VII/2019].
- Vega, S., Gutierréz, R., Sierra, J., Ortiz, R., Escobar, A., Vázquez, M., & Pérez, J. 2018. Análisis de riesgo por plaguicidas organoclorados en la salud ambiental de la Laguna Negra, Guerrero, México. *Avances de Investigación en Inocuidad de Alimentos*, 1. [Consultado el 27/III/2019].
- Ventura, B. & Marin, M., 2013. Azo dyes: characterization and toxicity-a review. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 2(2). [Consultado el 25/VII/2019].
- Vicuña, F., 2019. *Evaluación de la calidad del agua potable del sistema de abastecimiento y el grado de satisfacción en la población de Olleros-Huaraz, periodo 2015-2016*. Maestría. Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo. [Consultado el 27/III/2019].
- Xie, J., Li, C., Chi, L. & Wu, D., 2013. Chitosan modified zeolite as a versatile adsorbent for the removal of different pollutants from water. *Fuel*, 103, 480-485. [Consultado el 25/III/2019].
- Zhou, Y., Ma, J., Zhang, Y., Qin, B., Jeppesen, E., Shi, K., Brookes, J., Spencer, R., Zhu, G., & Gao, G., 2017. Improving water quality in China: Environmental investment pays dividends. *Water Research*, 118, 152-159. [Consultado el 27/III/2019].
- Zsazsa, M., 2013. *Adsorción de arsénico y fluoruros en nanopartículas y su posterior separación del agua tratada*. Doctorado. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. [Consultado el 27/III/2019].