

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

**SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE VERMICULITA MODIFICADA CON BENZALCONIO
PARA LA REMOCIÓN DE CIPERMETRINA EN SOLUCIÓN ACUOSA**

Sara Marcela Salazar Ordoñez

Química

Guatemala, junio de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

**SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE VERMICULITA MODIFICADA CON BENZALCONIO
PARA LA REMOCIÓN DE CIPERMETRINA EN SOLUCIÓN ACUOSA**

INFORME DE TESIS

PRESENTADO POR

Sara Marcela Salazar Ordoñez

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

QUÍMICO

Guatemala, junio de 202

Junta Directiva

Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Decano en funciones
M. Sc Bessie Abigail Orozco Ramírez	Secretaria
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal I
Dr. Roberto Enrique Flores Arzú	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Carmen Amalia Rodríguez Ortiz	Vocal IV
Br. Paola Margarita Gaitán Valladares	Vocal V

Agradecimientos

A Dios por darme todas las capacidades y aptitudes para alcanzar cada meta que me propongo.

A mis padres y mi hermana, que me han apoyado en cada decisión que he tomado y día a día con su ejemplo me formaron para ser una mujer trabajadora que no se rinde hasta alcanzar lo que se propone y para tener calidad humana en cada paso que emprendo.

A Andrés Blanco, quien es mi compañero de alegrías y triunfos y muchas veces mi apoyo para lograr salir adelante y no rendirme en los momentos difíciles a lo largo de mi formación universitaria.

A la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala por la oportunidad y las herramientas para formarme y poder servir al país como profesional y guatemalteca San Carlita.

Al departamento de Química Orgánica de la Escuela de Química y a todas las personas que desempeñan una función en él por darme el espacio para realizar una parte de mi fase experimental y hacerme sentir bienvenida en el mismo.

Al Laboratorio Químico del Centro Tecnológico -CETEC- de Cementos Progreso, por la oportunidad de desarrollar mi proyecto de tesis en sus instalaciones, poniendo a mi completa disposición los equipos instrumentales, por brindarme las herramientas intelectuales para poder interpretar los datos de caracterización obtenidos y por el apoyo y respaldo para que esta tesis pudiera llevarse a cabo.

A las autoridades del Instituto de Investigaciones Químicas, Biológicas, Biomédicas y Biofísicas (I2QB3) de la Universidad Mariano Gálvez por el préstamo del equipo FT-IR y las instalaciones, así como por la asesoría recibida de parte de Dra. Claudia de León.

Al departamento de Fisicoquímica y de Análisis Instrumental por la disposición que mostraron para brindarme la cristalería o equipos que me hicieran falta para la experimentación.

A Dr. Byron López y a M. Sc. Carlos Torres por asesorar esta investigación con tanta dedicación y esfuerzo en cada uno de los pasos desde que se propuso el proyecto hasta su culminación.

A Lic. Eric Estrada y Lic. Rodolfo Orozco por revisar mi tesis de manera eficiente con comentarios que aportaron a la mejora de este trabajo.

A mis compañeros QQ, QB, QF, BB y NN de promoción, que hicieron del tiempo en la universidad una de las etapas más bonitas que me ha tocado vivir y que me apoyaron en todo momento dándome ánimos cuando lo necesité.

A cada uno de los catedráticos que me formaron en las aulas y laboratorios, de los que encontré inspiración y motivación para querer seguir aprendiendo y haciendo ciencia.

Dedicatoria

A Dios por darme todas las capacidades y aptitudes para alcanzar cada meta que me propongo.

A mis padres y mi hermana, que me han apoyado en cada decisión que he tomado y día a día con su ejemplo me formaron para ser una mujer trabajadora que no se rinde hasta alcanzar lo que se propone y para tener calidad humana en cada paso que emprendo.

A mis abuelitas, Mamita y Cristy, mujeres trabajadoras que nunca se rindieron a pesar de las adversidades y hoy, como fruto de su esfuerzo, sus hijas y nietas somos en su mayoría profesionales universitarias.

A Andrés Blanco, quien es mi compañero de alegrías y triunfos y muchas veces mi apoyo para lograr salir adelante y no rendirme en los momentos difíciles.

A mis amigos Andrea, Fede, Linda, Carmen, Ángel, Emerson, Bryan, Jenny, Adri, Maos, Ari, Belén, Edwin, Emily, Enrique, Luis, Mafer, Mely, Ruth, Joaquín y Debs, por acompañarme de cerca en mi formación académica y hacer de la época universitaria una de las etapas más bonitas de mi vida.

ÍNDICE

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
ANTECEDENTES	10
JUSTIFICACIÓN	13
OBJETIVOS	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
HIPÓTESIS	14
MATERIALES Y MÉTODOS	14
Campo de trabajo	14
<i>Universo</i>	<i>14</i>
<i>Población</i>	<i>14</i>
<i>Muestra</i>	<i>14</i>
Materiales	14
<i>Reactivos</i>	<i>14</i>
<i>Equipo</i>	<i>15</i>
<i>Cristalería</i>	<i>15</i>
<i>Instrumentos</i>	<i>15</i>
Métodos	16
<i>Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la vermiculita</i>	<i>16</i>
<i>Síntesis de la vermiculita modificada</i>	<i>17</i>
<i>Evaluación de la adsorción de cipermetrina por la arcilla modificada</i>	<i>17</i>
RESULTADOS	19
DISCUSIÓN	25
RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS	32
ANEXOS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura no. 1: Comparación de difractogramas de vermiculita natural y vermiculita intercambiada en un 100% con azul de metileno.	19
---	-----------

Figura no. 2: Espectros de Infrarrojo de Transformada de Fourier (FT-IR) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.	20
Figura no. 3: Análisis termogravimétrico (TGA) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.	21
Figura no. 4: Comparación de análisis de difracción de rayos X (DRX) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.	22
Figura no. 5: Capacidad de adsorción a diferentes pH empleando las arcillas modificadas.	23
Figura no. 6: Comparación de capacidad máxima de adsorción OVerM 50% vs OVerM 100% en diferentes pH.	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla no 1: Capacidad de intercambio catiónico de la vermiculita sin modificar.	19
Tabla no. 2: Comparación de fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.	23

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Estructura molecular del piretroide cipermetrina	40
Anexo 2: Estructura molecular de la arcilla vermiculita.	40
Anexo 3: Estructura molecular de la sal cuaternaria de amonio cloruro de benzalconio.	40
Anexo 4: Barrido espectrofotométrico UV de 200 a 400nm.	41
Anexo 5: Barrido espectrofotométrico UV de 230 a 300 nm a solución de benzalconio y soluciones blanco.	41
Anexo 6: Tabla para elaboración de Figura no. 5 “Capacidad de adsorción de cipermetrina adsorbida a diferentes pH empleando las arcillas modificadas.” Y la Figura no 6 “: Comparación de capacidad máxima de adsorción OVerM 50% vs OVerM 100% en diferentes	42
Anexo 7: Ejemplificación de la interacción de la arcilla con benzalconio en diferentes grados de saturación de las organoarcillas.	43
Anexo 8: Patrón de difracción del cloruro de benzalconio.	43
Anexo 9: Densidades de carga de la cipermetrina.	44
Anexo 10: Representación gráfica interacción arcilla modificada-cipermetrina y arcilla natural-cipermetrina.	44
Anexo 11: Ecuación de la curva de AM para la determinación de CIC de la vermiculita.	45
Anexo 12: Ecuaciones de la curva para la determinación de adsorción de OVerM 50%.	45
Anexo 13: Ecuaciones de la curva para la determinación de adsorción OVerM 100%.	46
Anexo 14: Ecuaciones de la curva para la determinación de adsorción de la arcilla natural.	46
Anexo 15: Síntesis de OVerM antes y después de ser sometido a ultrasonido por 24 horas.	47
Anexo 16: Pesaje de arcillas para las pruebas de adsorción.	47
Anexo 17: Equipo para la realización de la adsorción de cipermetrina del medio.	48
Anexo 18: Equipo para la agitación de las arcillas con cipermetrina a diferentes pH.	49
Anexo 19: Potenciómetro utilizado para la medición del pH.	49

RESUMEN

En esta investigación, se sintetizaron dos organo-arcillas capaces de adsorber cipermetrina (plaguicida piretroide), del agua en condiciones de pH ácido, neutro y alcalino. Para esto, se evaluó la capacidad de intercambio catiónico de la vermiculita empleando el método espectrofotométrico de adsorción de azul de metileno. Conociendo la capacidad de intercambio catiónico se sintetizaron dos organo vermiculitas (OVerm) por intercambio catiónico en solución acuosa asistida por ultrasonido, empleando cloruro de benzalconio en diferentes concentraciones para poder obtener una organo-arcilla intercambiada al 50% (OVerm 50%) y otra al 100% (OVerm 100%) de su capacidad total. Ambos materiales se caracterizaron utilizando las técnicas instrumentales difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), análisis termogravimétrico (TGA) y espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR). Estas técnicas confirmaron que la síntesis realizada fue efectiva, lo que permitió evaluar el desempeño de las organo vermiculitas para la remoción del piretroide cipermetrina en el agua, las capacidades de adsorción de las arcillas sintetizadas se determinaron por espectrofotometría UV-vis.

Las pruebas de adsorción en las arcillas OVerm 50% y OVerm 100%, a pH 4.5, 7.0 y 10.5, confirmaron que fue efectiva la remoción de la cipermetrina del medio empleando las arcillas modificadas, mostrando una mayor capacidad de adsorción a concentraciones más altas del contaminante debido a la capacidad de la cipermetrina adsorbida de formar capas de adsorción por interacciones intramoleculares con las otras moléculas de cipermetrina presentes en el medio. Se identificaron algunas diferencias en el grado adsorción entre cada una de las variables analizadas, siendo la OVerm 50% en medio neutro la que presentó una mejor adsorción, todo esto atribuido a saturación de la OVerm 50% y a la naturaleza de la cipermetrina en cada pH de estudio.

INTRODUCCIÓN

El manejo de plagas y enfermedades silvestres en Guatemala es un tema relevante debido a que “el 48.3% de la población rural del país se dedica a actividades de agricultura, ganadería y silvicultura” (MAGA, 2016), por lo que “el uso de plaguicidas es común” (INACIF, 2018). Estos compuestos químicos son utilizados para el control de plagas incluso en el área doméstica y la mayoría de las veces suelen tener un nivel de toxicidad significativa (INACIF, 2018). Debido al alto uso y la poca regulación que se tiene en cuanto al manejo y deposición, estos plaguicidas, han comenzado a ser causantes de contaminación ambiental, dañando ecosistemas y poniendo en riesgo incluso la salud humana (Eljarrat, 2015; Samayoa, 2009).

En 2019 la Organización Mundial de la Salud (OMS), presentó un listado de clasificación de estos químicos tóxicos, entre los que se encuentran compuestos organoclorados, organofosforados, carbamatos, pirazoles, tiocarbamatos y piretroides. Estos últimos son sustancias químicas sintéticas cuya estructura se basa en las piretrinas, que son sustancias químicas presentes en ciertas flores de crisantemo, que poseen propiedades insecticidas. A diferencia de las piretrinas, los piretroides han sido sintetizados artificialmente, buscando que sean más persistentes y tóxicos para insectos, mejorando su efectividad plaguicida. Existe una gran cantidad de piretroides que pueden variar desde un grupo funcional, hasta únicamente la estereoisomería (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2003).

La cipermetrina es un plaguicida piretroide de fórmula $C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$ (ver anexo 1), que actúa sobre el sistema nervioso y produce anorexia. Se utiliza para el control de insectos como *Lepidóptera*, *Coleóptera*, *Díptera* y *Hemíptera* en varios cultivos, también es común en el “ámbito doméstico, salud pública y en el control de ectoparásitos en animales” (Universidad Nacional Costa Rica, s.f). “El uso de insecticidas piretroides se ha extendido masivamente a nivel mundial, sustituyendo a otros biocidas por presentar menor persistencia y toxicidad”. Sin embargo, a pesar de su capacidad de degradarse, su uso excesivo ha causado que se generen bioacumulaciones. “Se encuentran en muestras ambientales como agua, sedimentos, alimentos, mamíferos e incluso en muestras humanas” (Higiene Ambiental, 2015). En los peces pueden producir “problemas cardiacos y problemas de crecimiento” y en los humanos “pueden tener efectos neurológicos e incluso algunos de ellos están catalogados como posibles carcinógenos humanos” (Eljarrat, 2015).

Se han estudiado diversas formas de realizar tratamientos del agua para remover estos piretroides, una de ellas es la remoción por adsorción y una de las alternativas ha sido el uso de arcillas

(Groisman, et al., 2004). Lo que hace tan llamativas a las arcillas para la remoción de contaminantes del agua no es solo su elevada capacidad de intercambio catiónico, que las hace fácilmente modificables, sino también su alta resistencia térmica, resistencia química y alta porosidad. Las arcillas se pueden clasificar en cuatro grupos principales, estos son kaolinita, illita, esmectita y vermiculita (Ismadji, Soetaredjo y Ayucitra, 2015).

La vermiculita está formada por estructuras laminares que contienen silicio, oxígeno y aluminio y tiene una elevada capacidad de intercambio catiónico (Ver anexo 2) (Besoain, 1970). A parte de presentar las propiedades mencionadas anteriormente, es un mineral abundante y más económico que otras arcillas que pudieran ser modificadas (Stawinski, Wegrzyn, Freitas, Chmielarz, Mordarski y Figueiredo, 2017). Esta ya ha demostrado ser un buen precursor de adsorbentes sustentables para el tratamiento de aguas residuales, por lo que es necesario seguir explorando su potencial, pues existe poca información respecto a los adsorbentes sintetizados a partir de esta arcilla para el tratamiento de aguas residuales (Stawinski, et al., 2017; Liu, Wu, Chen, Yu, Kang, Zhu y Dang, 2017).

Se ha reportado en la literatura la remoción de contaminantes orgánicos del agua usando vermiculita modificada con sales cuaternarias de amonio (Ding, Gao, Shen, Zeng y Xiang, 2018). Por lo tanto, el surfactante, cloruro de benzalconio, al ser una sal cuaternaria de amonio, podría utilizarse para la modificación de arcillas (Marković, Daković, Rottinghaus, Petković, Kragović, Krajišnik y Milić, 2017; Matusik, Ktapyta, 2013; Rivas, Ollier, Alvarez y Huck, 2021). La estructura del catión benzalconio presenta, una cadena alquílica que puede ir desde 8 hasta 18 carbonos, dos metilos y un bencilo unidos al nitrógeno con carga positiva (ver anexo 3) (Matusik, Ktapyta, 2013). La adición de este catión a la vermiculita provocaría sitios hidrofóbicos en la misma, por lo tanto, un aumento en la adsorción de cipermetrina, que también posee cierto comportamiento hidrofóbico y; debido a un mecanismo de partición, las moléculas hidrofóbicas son más afines entre sí (Flores, Loveira, Yarza, Candal y Tórres, 2016).

El objetivo principal de esta investigación fue proponer alternativas para remover este tipo de contaminación emergente por cipermetrina, a través de la síntesis de un nuevo material capaz de adsorber este piretroide del medio acuoso. Para esto se plantea la síntesis de organovermiculitas mediante intercambio catiónico, su caracterización por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X de polvos (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y su aplicación para la remoción de cipermetrina en medio acuoso a diferentes valores de pH.

ANTECEDENTES

En el 2000, Pal y Vanjara, estudiaron la adsorción de malatión y clorobutano en caolín, montmorillonita (Mnt), bentonita y sus respectivas organoarcillas. Prepararon las organoarcillas mediante el intercambio de los cationes Na^+ y Ca^{2+} de las arcillas con surfactantes de amonio cuaternario como bromuro de tetradeciltrimetilamonio (TTAB), bromuro de dodeciltrimetilamonio (DTAB) y cloruro de cetilpiridinio (CPC). La adsorción de los pesticidas mejoró notablemente al tratar las arcillas con el surfactante. La cantidad que se adsorbió, tanto de malatión como de clorobutano por unidad de masa de organoarcilla siguió el orden TTA-caolín < TTA-Mnt < TTA-bentonita. La eficiencia de la remoción de malatión utilizando Mnt siguió el orden $\text{CP}(\text{C}_{16})\text{-Mnt} > \text{TTA}(\text{C}_{14})\text{-Mnt} > \text{DTA}(\text{C}_{12})\text{-Mnt}$. El clorobutano fue adsorbido en mayor medida que el malatión por todos los adsorbentes debido a su mayor carácter hidrofóbico, indicando una interacción hidrofóbica en el sistema de adsorción.

En 2004 Groisman, Rav-Acha, Gerstl y Mingelgrin evaluaron la adsorción de un piretroide y otros cinco compuestos en bentonitas modificadas con tetrametilamonio-(TMA) y octadeciltrimetilamonio-(ODTMA), estos investigadores buscaban comparar el proceso de adsorción al utilizar organo-arcillas de cadena corta (TMA) y de cadena larga (ODTMA). Los compuestos de menor carácter hidrofóbico fueron adsorbidos de mejor manera por la organo-arcilla de cadena corta y los compuestos hidrofóbicos por la de cadena larga. En este estudio los pesticidas se encontraban disueltos en aguas residuales industriales y se evaluó su adsorción con organo-arcillas. Ambas removieron contaminantes orgánicos. La adsorción de pesticidas por las organo-arcillas de cadena corta se vio reducida por la presencia de solutos competidores en los desechos de agua, pero estos no afectaron al utilizar organo-arcillas de cadena larga.

En 2006, Polati, Angioi, Gianotti, Gosetti y Gennaro investigaron las interacciones de la caolinita y la montmorillonita con una gran variedad de pesticidas con diferente naturaleza hidrofílica. Colocaron 2.0 g de arcilla en contacto con 100.0 mL de las soluciones de pesticidas de concentración conocida y determinaron la cantidad de pesticida adsorbido por la arcilla mediante un análisis del sobrenadante utilizando cromatografía líquida de alta eficacia en condiciones de fase. Realizaron los experimentos a diferentes valores de pH. Los resultados indicaron que las moléculas neutras fueron retenidas preferentemente sobre las ionizadas y que la montmorillonita es un adsorbente más efectivo que la caolinita.

En 2013, Saha, Shabeer, Gajbhiye, Gupta y Kumar, estudiaron la remoción de una mezcla de pesticidas de una solución acuosa mediante su adsorción en tres tipos de montmorillonita modificada, una con octadecilamina (ODA-M), otra con dimetildialquilamina (DMDA-M) y la tercera con aminopropiltriétoxisilano (ODAAPS-M). Evaluaron el efecto del tiempo de contacto y la concentración inicial de la mezcla de pesticidas en el fenómeno de adsorción. Sus resultados indicaron una alta afinidad de los pesticidas hacia las organoarcillas como resultado de la interacción hidrofóbica en el sistema adsorbente/adsorbato. El orden de la eficiencia de la remoción de la mezcla de pesticidas fue ODAAPS-M > DMDA-M > ODA – M.

En 2016, Moradpour, Abbasi y Daftari-Besheli sintetizaron nanoestructuras organometálicas $\{Zn_4O(C_{24}H_{15}N_6O_6)_2(H_2O)_2 \cdot 6H_2O\} \cdot DMF\}$ empleando ultrasonido, estos se calcinaron a 800°C para preparar nano-ZnO. Estos nano-ZnO fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X de polvos y espectroscopía infrarroja. Posteriormente, evaluaron la aplicación de estos nanocompuestos para la remoción de α -cipermetrina mediante espectroscopía UV-Vis, análisis termogravimétrico, espectroscopía infrarroja y resonancia magnética nuclear. Por último, estudiaron los efectos de algunos parámetros como la cantidad de adsorbente, tiempo de exposición, temperatura y pH en la adsorción de estos pesticidas, lo que les permitió determinar que 0.5 g de nano-ZnO a temperatura ambiente y pH de 7, pueden remover 82% de α -cipermetrina (0.1 mg/L) de 25 mL de una solución agua/metanol (80:20).

En 2017, Najaei, Rahmanifar, Maleki y Gazani lograron realizar la síntesis de nanopartículas de colágeno-CuO, que caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X de polvos y espectroscopía infrarroja. Evaluaron su aplicación como adsorbente, las condiciones óptimas, las isotermas de adsorción y la cinética de la remoción de cipermetrina. Investigaron las condiciones óptimas de concentración inicial de adsorbente, tiempo de contacto y pH. Los resultados demostraron que 0.03 g del nanocompuesto a temperatura ambiente y un pH de 7, puede remover el 94% del pesticida de 25 mL de una solución de cipermetrina 0.125 mg/L. Esto lo determinaron utilizando un espectrofotómetro UV a 278 nm. Lograron concluir que los compuestos sintetizados podrían servir como un nuevo y prometedor adsorbente para el tratamiento de aguas.

También en 2017, Tavakoli, Hajimahmoodi, Shemirani, Dezfuli y Khanavi evaluaron la adsorción de permetrina, cipermetrina y otros cinco pesticidas, provenientes de muestras de pasas empleando como adsorbentes nanocompuestos magnéticos de óxido de grafeno reducido-Fe₃O₄. Determinaron

que esta metodología de adsorción para la remoción de pesticidas en fase sólida brindó un procedimiento fácil que no requiere de filtración ni centrifugación. Investigaron mediante procesos de optimización los parámetros que afectaron el desempeño de la extracción como la concentración de nanopartículas, tiempo de extracción, pH de la solución y condiciones de desorción. Esto les permitió concluir que el máximo de adsorción se obtuvo en 15 minutos a un pH de 7-8, usando 0.4 mg/mL de adsorbente.

En 2019, Liu, Jiang, Lu, Liu, Li, Xu, Li, Lin, Lv, Huang y Xu desarrollaron una técnica de extracción magnética en fase sólida (MSPE por sus siglas en inglés) eficaz para la extracción de plaguicidas piretroides de muestras de agua natural. Para esto prepararon una zeolita modificada cuya área superficial, porosidad y propiedades magnéticas fueron mejoradas. Llevaron a cabo varios experimentos para determinar el efecto de diferentes condiciones en el rendimiento del MSPE. Finalmente, conociendo las condiciones óptimas, la técnica se empleó para la adsorción de piretroides en muestras de agua natural, proveyendo las bases para el desarrollo de nuevos métodos de remoción de pesticidas del agua.

JUSTIFICACIÓN

La legislación de Guatemala establece cómo realizar descargas de aguas residuales que contienen pesticidas (Acuerdo Gubernativo No. 236-2006). Sin embargo, no se toman como prioridad y muchas veces su incumplimiento no es sancionado. Por otro lado, la mayoría de los agricultores y ganaderos no cuentan con una capacitación apropiada para la aplicación de pesticidas y los utilizan de manera incorrecta. Todo esto produce una gran cantidad de residuos tóxicos que son arrastrados por las lluvias o llevados por las tuberías a cuerpos de agua tanto subterráneos como superficiales (Samayoa, 2009).

La contaminación de los cuerpos de agua superficiales por plaguicidas ha sido responsable de muchos ecodios en Guatemala, como los ocurridos en los ríos La Pasión y San Román, causados por la deposición excesiva de malatión, un plaguicida organofosforado. Afectando la flora y fauna que dependen de ellos, así como a las comunidades que viven a la ribera, para las que el río era fuente de agua para consumo y supervivencia (CMI-G, 2015).

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) establece límites máximos en agua potable para un importante número de plaguicidas organoclorados, organofosforados y carbamatos. Este no es el caso de los piretroides, siendo la permetrina el único piretroide normado con un límite máximo permisible en agua potable ($20 \mu\text{g/L}$) (COGUANOR, 1999). No obstante, la cipermetrina fue el piretroide más importado entre 2005 y 2009 a nivel Centroamericano y Guatemala fue el país que más plaguicidas importó durante este periodo (Bravo, Ramírez, Berrocal y de La Cruz, 2015). Al considerar esta falta de regulación normativa, los potenciales riesgos hacia la salud y el ambiente debido a la constante introducción de cipermetrina en cuerpos de agua superficial y subterránea, este compuesto puede ser clasificado como un contaminante emergente (Becerril, 2009; Eljarrat, 2015) sobre el que debe efectuarse más investigación científica.

Actualmente, no se cuenta con información con respecto al desarrollo y uso de nuevos materiales adsorbentes para contrarrestar y/o prevenir la contaminación del agua por piretroides en Guatemala, por lo que sintetizar organo-vermiculitas modificadas con capacidad de remover la cipermetrina del medio acuoso es importante para generar soluciones a la problemática de este tipo de contaminación de cuerpos de agua. Con esta investigación se crean las bases para desarrollar nuevos materiales de bajo costo, estables y útiles para el tratamiento de aguas por contaminantes emergentes, tema que ha sido ignorado en el país a pesar de su importancia sobre la salud de los guatemaltecos.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar y evaluar una nueva organo-vermiculita con potencial uso para remover cipermetrina en medio acuoso.

Objetivos específicos

- Sintetizar vermiculitas modificadas con benzalconio en distintas proporciones, mediante una reacción de intercambio iónico partiendo de la arcilla vermiculita y cloruro de benzalconio.
- Caracterizar las organo-vermiculitas modificadas con distintas proporciones de benzalconio, mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X de polvos (DRX).
- Evaluar la eficiencia de adsorción de las organo-vermiculitas modificadas con distintas proporciones de benzalconio, para remover cipermetrina del medio acuoso a diferente pH.

HIPÓTESIS

La modificación de la arcilla vermiculita mediante intercambio catiónico con cloruro de benzalconio producirá una organo-arcilla eficiente para la remoción de cipermetrina en agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Campo de trabajo

Universo

Materiales arcillosos del grupo aluminosilicatos modificados para la remoción del piretroide cipermetrina de medio acuoso.

Población

Reacciones de intercambio iónico con vermiculita expandida y vermiculita modificada con cloruro de benzalconio para la remoción del piretroide cipermetrina de medio acuoso.

Muestra

Vermiculita expandida y vermiculita modificada con cloruro de benzalconio para la adsorción de cipermetrina de medio acuoso a pH ácido, neutro y básico.

Materiales

Reactivos

- Vermiculita expandida
- Agua destilada

- 500 mL de azul de metileno $3.9 \times 10^{-5} \text{M}$
- Cloruro de benzalconio al 95%
- Solución estándar de cipermetrina al 20%.
- HCl 0.1M
- NaOH 0.1M

Equipo

- Espectrofotómetro UV-Vis Varian Cary50
- Balanza analítica de plato de acero inoxidable.
- Centrifugadora.
- Molino de discos de acero inoxidable.
- Baño de ultrasonido de acero inoxidable.
- Horno de acero inoxidable.
- Plancha de agitador magnético de acero inoxidable.
- Espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier.
- Espectrómetro de fluorescencia de rayos Thermo.
- Difractómetro de rayos X PANalytical.
- Analizador termogravimétrico Thermo.

Cristalería

- 8 tubos de ensayo de vidrio de 30 mL
- Pipeta volumétrica graduada de vidrio de 25mL
- 24 beaker de 100 mL de vidrio pyrex.
- 2 kitsatos de 250 mL de vidrio pyrex.
- 9 Erlenmeyer de 250 mL de vidrio.
- Varilla de agitación de vidrio.
- Micropipeta de vidrio.

Instrumentos

- Espátula de acero inoxidable
- 24 agitadores magnéticos.
- Gradillas de madera o plástico
- Pipeteador de plástico

- Tamiz de 425 μ m.
- 2 agitadores magnéticos
- 2 mangueras para vacío
- Papel filtro
- Mortero y pistilo
- 2 embudos de porcelana
- Potenciómetro de H⁺

Métodos

Determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la vermiculita (Kahr y Madsen, 1995):

1. Se tomaron 8 balones aforados de 100 ml y se enumeraron del 1 al 8.
2. Se agregó 1 mL, 2 mL, 3 mL, 4 mL, 5 mL, 6 mL, 7 mL y 8 mL de azul de metileno 3.9×10^{-5} M a los balones aforados enumerados, de manera que el balón 1 quedó con la menor cantidad de azul de metileno y el balón 8 con la mayor cantidad.
3. Se midió espectrofotométricamente la concentración de azul de metileno en cada uno de los sobrenadantes en un espectrofotómetro UV-vis a una longitud de onda de 620 nm para construir una curva de calibración del azul de metileno.
4. Se tomaron tres Erlenmeyer de 250 mL y se agregó a cada uno 0.2500 g de arcilla y 20 mL de azul de metileno 3.9×10^{-5} M.
5. Se agitó constantemente por 5 minutos y se dejó reposar en una caja oscura por 24 horas para que alcanzara el equilibrio.
6. Se filtró el material contenido en el Erlenmeyer y se almacenó la solución acuosa y la arcilla filtrados.
7. Se analizó el polvo de arcilla filtrado y la arcilla natural mediante difracción de rayos X y se compararon sus difractogramas para determinar si se había realizado el intercambio completo.
8. Se midió espectrofotométricamente la solución acuosa para determinar la cantidad de azul de metileno que se intercambió.
9. Se interpolaron los resultados -el promedio y desviación estándar- en la curva de calibración para determinar cuál era la capacidad de intercambio por gramo de arcilla.

Síntesis de la vermiculita modificada (Zhang, Liao y Xia, 2010):

1. Con la ayuda de un molino de discos, se molió la vermiculita hasta alcanzar un tamaño de partícula de 425 μg .
2. Se pesaron 100 g de la vermiculita y se colocó en un beaker de 100 mL.
3. Se agregó disolución acuosa de cloruro de benzalconio al 0.208M equivalente al 100% del intercambio iónico de la arcilla.
4. Se colocó la mezcla en baño de ultrasonido a temperatura ambiente y se agitó constantemente por 24 horas.
5. Se filtró al vacío la arcilla modificada realizando tantos lavados con agua destilada como fueron necesarios para eliminar cualquier excedente de solución de cloruro de benzalconio.
6. Se secó la arcilla modificada en un horno a 105 °C por 24 horas.
7. Cuando estuvo seca, se molió finamente utilizando mortero y pistilo y se almacenó en bolsas de polipropileno.
8. Para la segunda vermiculita modificada, se realizó el mismo procedimiento, pero agregando cloruro de benzalconio al 0.104M para alcanzar un 50% de la capacidad de intercambio iónico de la arcilla.
9. Se caracterizaron las arcillas mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X de polvos (DRX), análisis termogravimétrico (TGA).

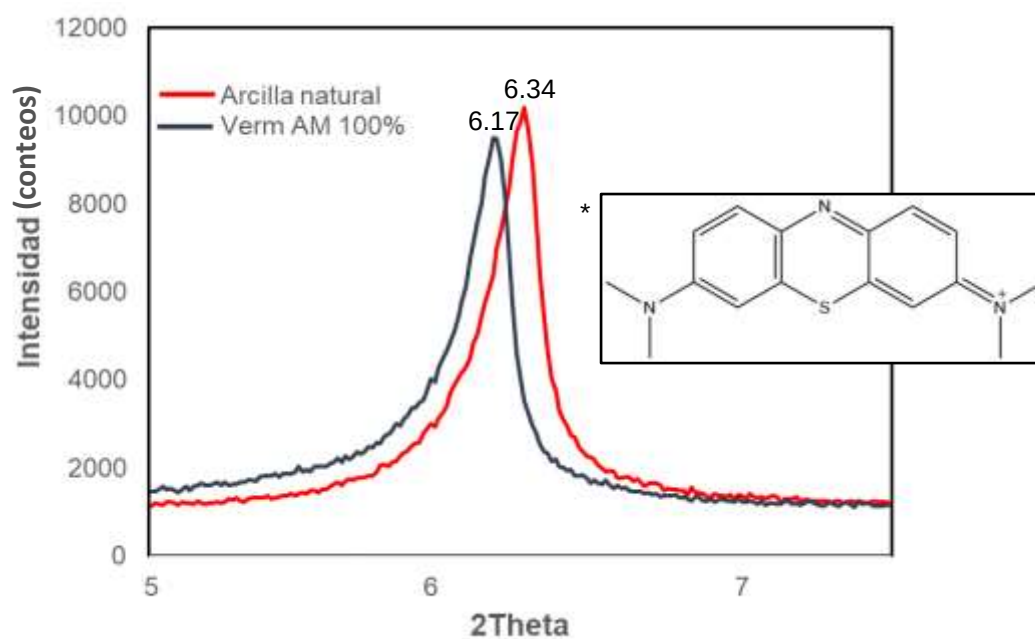
Evaluación de la adsorción de cipermetrina por la arcilla modificada (Pal y Vanjara, 2000):

1. Se tomaron 5 beaker de 100 ml y se agregó a cada uno 20 mL de una solución acuosa neutra de 25 mg/L, 50 mg/L, 75 mg/L, 100 mg/L, y 125 mg/L de cipermetrina. Se enumeraron del 1 al 5 en orden ascendente de concentración.
2. Se midió espectrofotométricamente la concentración de cipermetrina en cada una de las soluciones en un espectrofotómetro UV a una longitud de onda de 290nm (dato experimental ver anexo 4) y se construyó la curva de calibración de la cipermetrina en medio neutro.
3. Se repitieron los pasos 1 y 2 en medio básico (291 nm) y ácido (290 nm) (Ver anexo 4).

4. Se tomaron 5 beaker de 100 mL, se colocaron 50 mg de arcilla modificada y se agregó a cada uno 20 mL de una solución acuosa neutra (pH 7.0) que contenía 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 110 mg/L y 125 mg/L de cipermetrina. Este paso se realizó por duplicado.
5. Se tomaron otros 5 beaker de 100 mL, se colocaron 50 mg de arcilla modificada y se agregó a cada uno 20 mL de una solución ácida (pH 4.5) que contenía 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 110 mg/L y 125 mg/L de cipermetrina. Este paso se realizó por duplicado.
6. Se tomó otros 5 beaker de 100 mL, se colocaron 50 mg de arcilla modificada y se agregó a cada uno 20 mL de una solución básica (pH 10.5) que contenía 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 110 mg/L y 125 mg/L de cipermetrina. Este paso se realizó por duplicado.
7. Todas las soluciones se agitaron por 24 horas para alcanzar el equilibrio.
8. Después de este tiempo, se midió la concentración de cipermetrina restante en cada una de las soluciones, para así establecer la capacidad de remoción de cipermetrina de la arcilla modificada. Para este propósito se utilizó una curva de calibración por espectrofotometría UV a una longitud de onda de 290 nm para las soluciones ácida y neutra y 291nm para la solución básica (longitudes de onda experimentales).
9. Como blanco, se tomaron 3 beacker, se adicionaron 50 mg de arcilla modificada y 20 ml de agua destilada a diferentes pH (4.5, 7.0 y 10.5), y se sometieron al mismo procedimiento que las muestras de interés. Pasado el tiempo se realizó el análisis espectrofotométrico a una longitud de onda de 260 nm (determinación experimental, anexo 5), correspondiente al benzalconio, para determinar si existe liberación de este. Se realizó para cada porcentaje de CIC.

RESULTADOS

Figura no. 1: Comparación de difractogramas de vermiculita natural y vermiculita intercambiada en un 100% con azul de metileno.



Verm AM: Vermiculita intercambiada con azul de metileno. Theta: θ

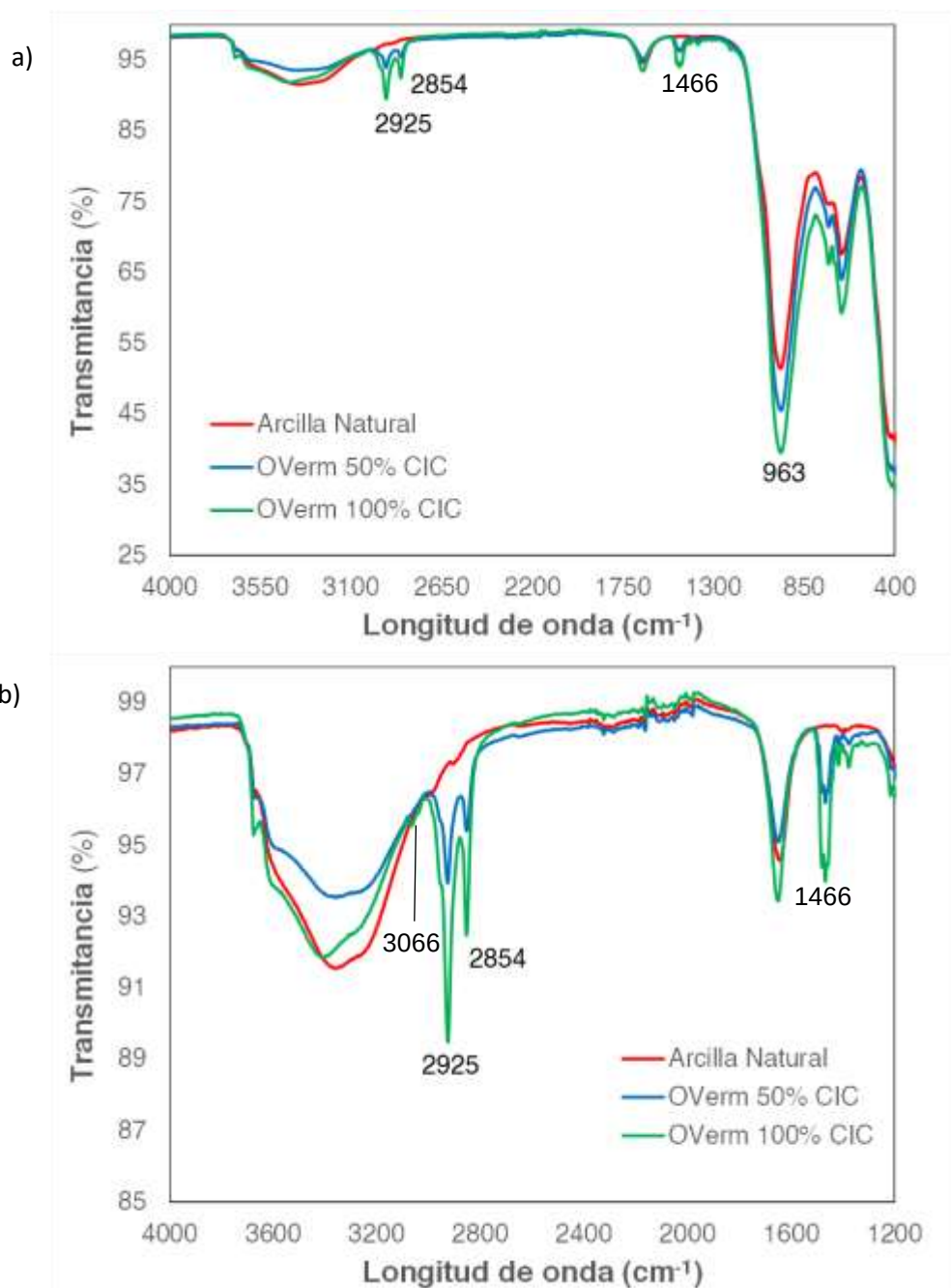
*Fórmula estructural azul de metileno.

Tabla no 1: Capacidad de intercambio catiónico de la vermiculita sin modificar.

Método utilizado	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g de arcilla)
Método espectrofotométrico de azul de metileno	54.53 $\pm$ 2.37
Método volumétrico con acetato de amonio*	56.11

*Datos brindados por la Escuela Nacional Central de Agricultura -ENCA-

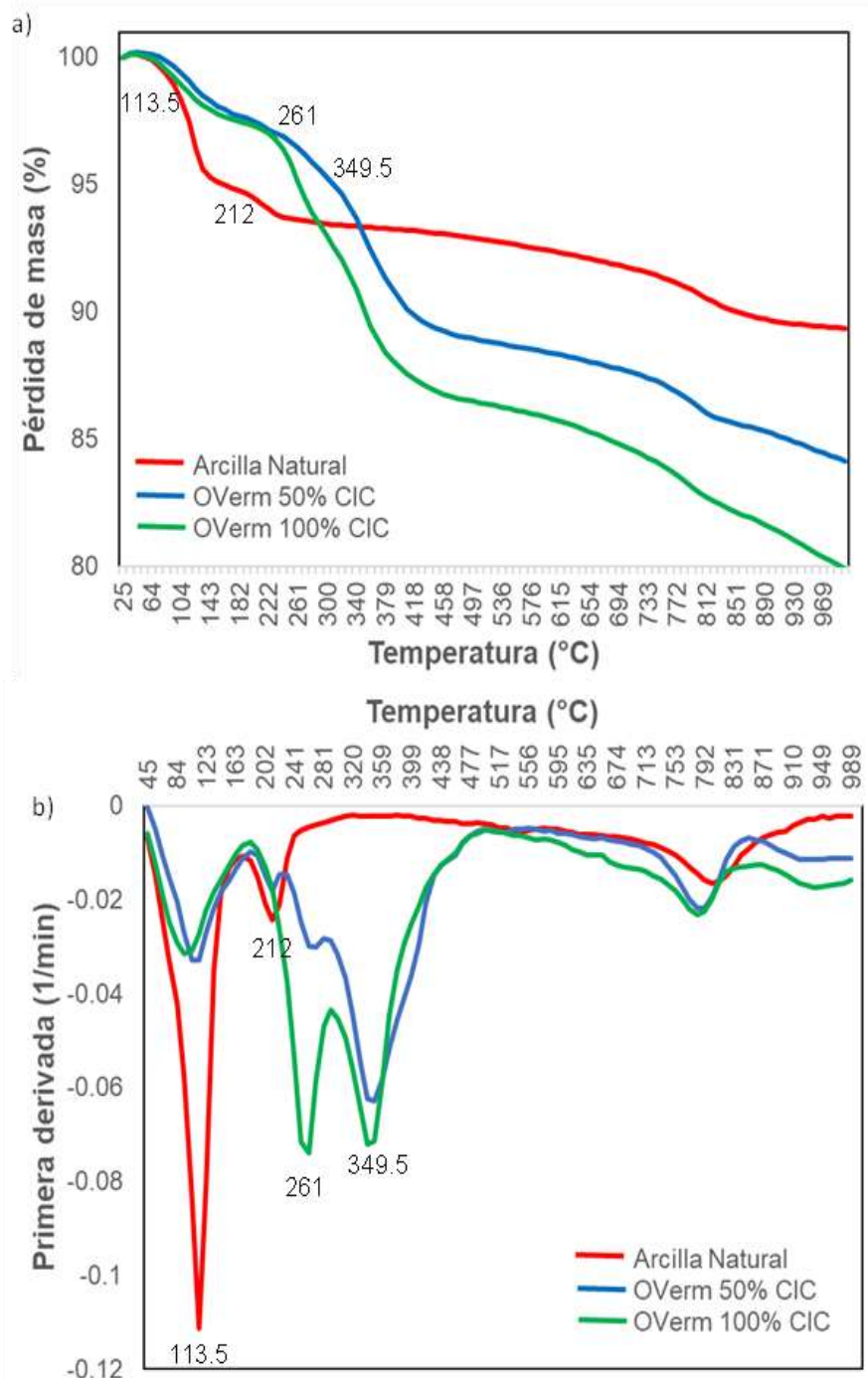
Figura no. 2: Espectros de Infrarrojo de Transformada de Fourier (FT-IR) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.



a) Comparación de espectros de FT-IR; b) Acercamiento a la comparación de espectros de FT-IR.
OVerm 50%: Arcilla modificada al 50%, OVerm 100%: Arcilla modificada al 100%.

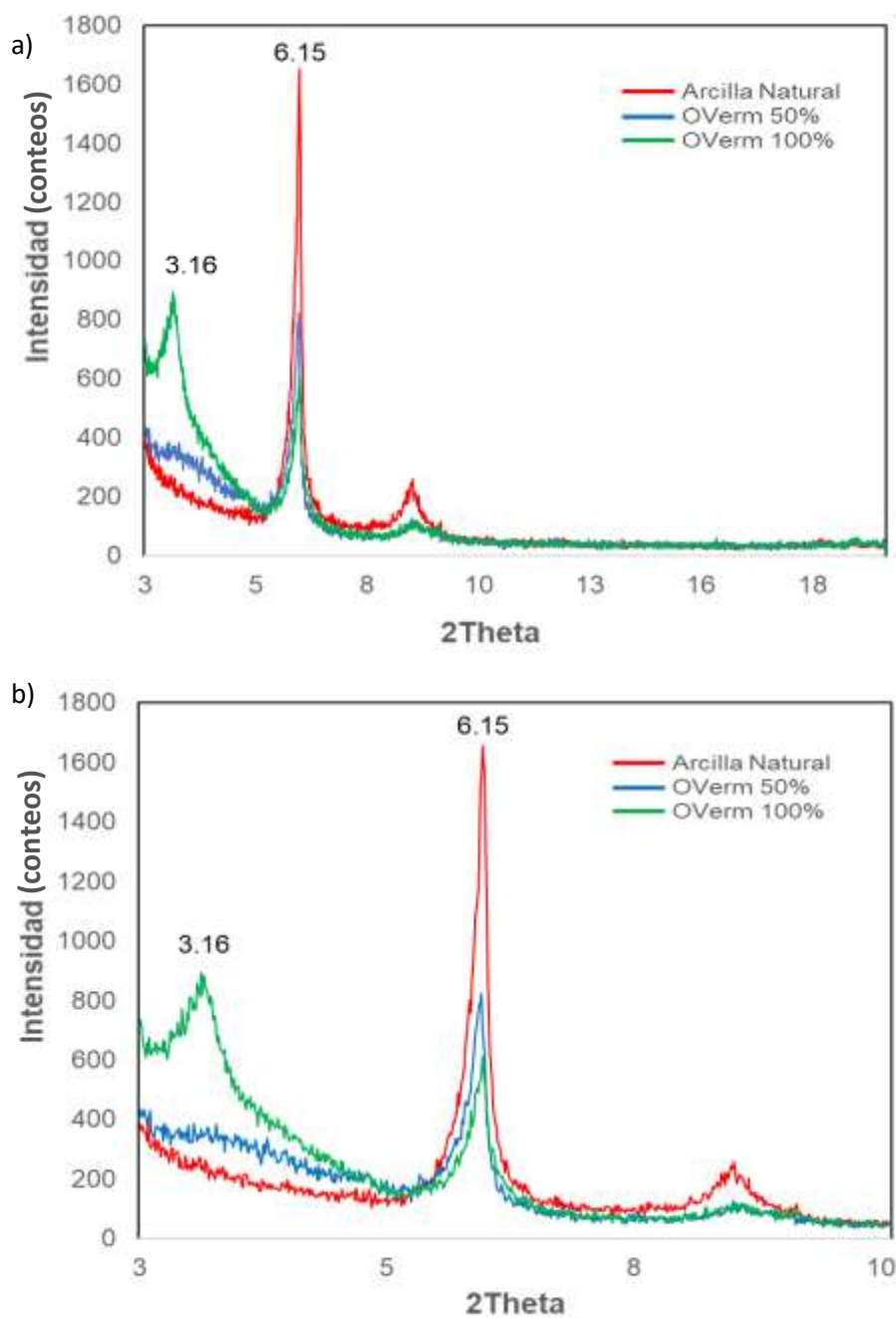
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Instituto de Investigaciones Químicas, Biológicas, Biomédicas y Biofísicas (I2QB3), Universidad Mariano Gálvez de Guatemala.

Figura no. 3: Análisis termogravimétrico (TGA) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.



a) Comparación de TGA; b) Primera derivada de los valores de TGA.
OVerm 50%: Arcilla modificada al 50%, OVerm 100%: Arcilla modificada al 100%.

Figura no. 4: Comparación de análisis de difracción de rayos X (DRX) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.

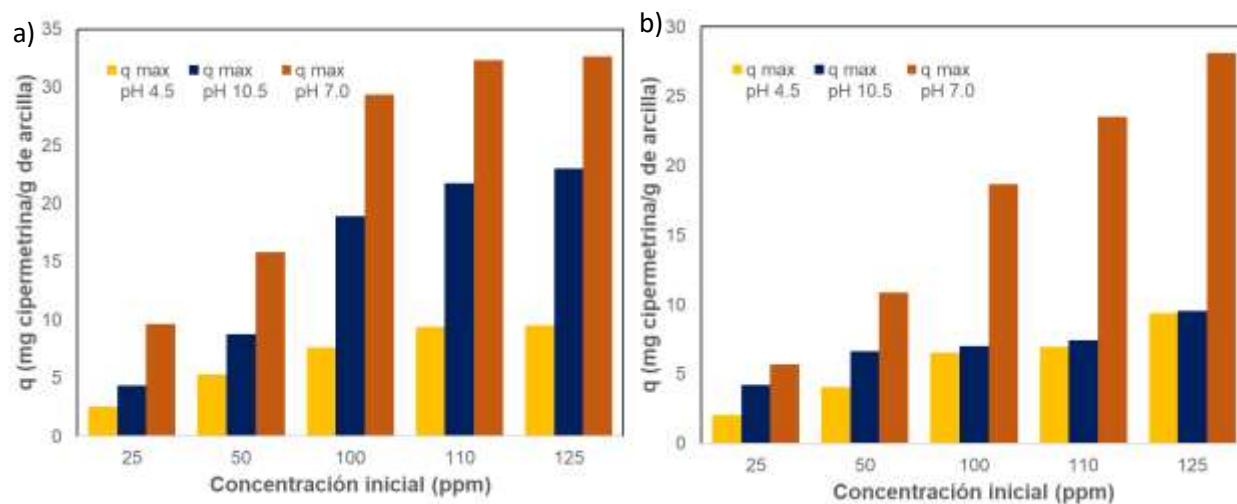


a) Comparación de difractogramas; b) Acercamiento a la comparación de difractogramas. OVerm 50%: Arcilla modificada al 50%, OVerm 100%: Arcilla modificada al 100%. Theta: θ

Tabla no. 2: Comparación de fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla natural y arcillas modificadas con cloruro de benzalconio al 100% y 50% de su capacidad de intercambio catiónico.

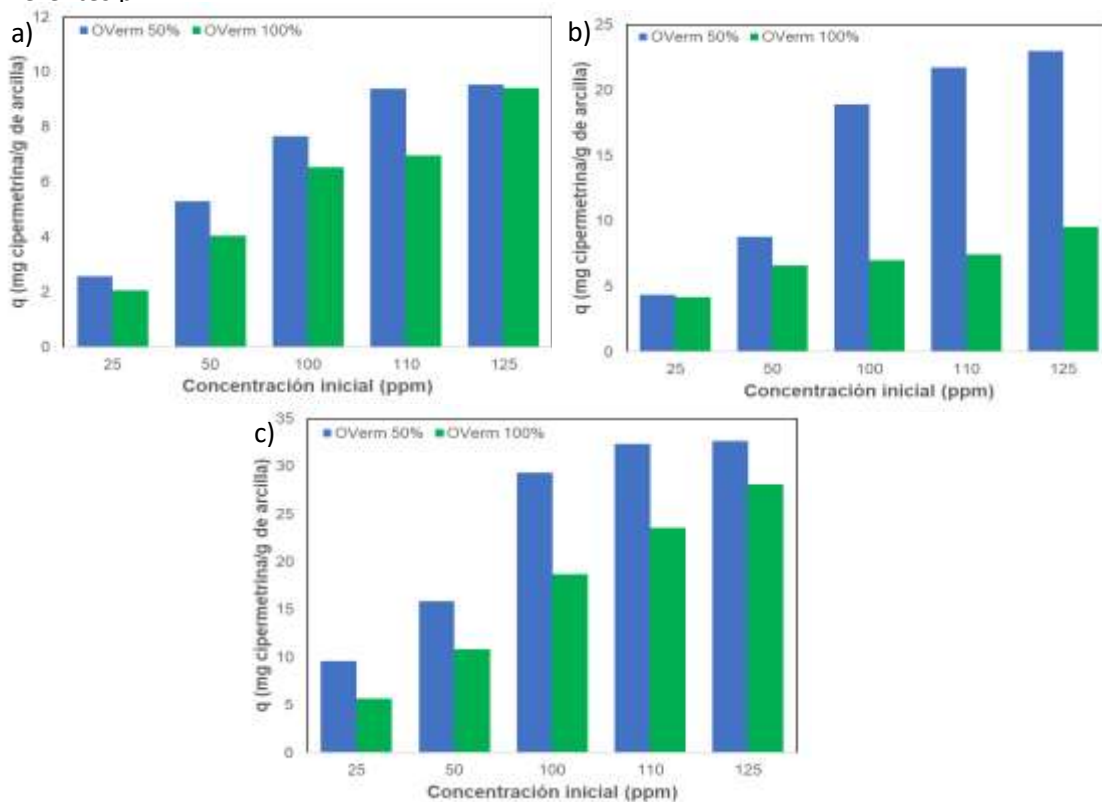
Óxidos	Arcilla Natural (%)	OVerm 50% (%)	OVerm 100% (%)
SiO ₂	40.75	38.55	36.62
Al ₂ O ₃	12.23	11.65	11.06
Fe ₂ O ₃	9.32	8.79	8.38
CaO	0.88	0.70	0.61
MgO	21.79	20.04	18.90
SO ₃	8.07 * 10 ⁻²	7.30 * 10 ⁻²	6.77* 10 ⁻²
K ₂ O	2.39	2.17	2.04
TiO ₂	1.61	1.24	1.18
P ₂ O ₅	0.23	0.22	0.20
Pérdida al fuego (PF)	10.77	16.44	20.60

Figura no. 5: Capacidad de adsorción a diferentes pH empleando las arcillas modificadas.



a) OVerm 50%; b)OVerm 100%. pH: Potencial de hidrógeno,
q: capacidad de adsorción, ppm: partes por millón (mg/L), mg: Miligramo, g: gramo. Datos estadísticos anexo 7.

Figura no. 6: Comparación de capacidad máxima de adsorción OVerm 50% vs OVerm 100% en diferentes pH.



a) pH 4.5; b) pH 10.5; c) pH 7.0.

pH: Potencial de hidrógeno, q: capacidad de adsorción, ppm: partes por millón (mg/L), mg: Miligramo, g: gramo. Datos estadísticos anexo 8.

DISCUSIÓN

Determinación de intercambio catiónico

La difracción de rayos X es un método que permite estudiar cambios estructurales en una arcilla de acuerdo con la ley de Bragg. Estos cambios pueden producirse por fenómenos como el intercambio catiónico; si intercambia el catión original por uno de mayor o menor tamaño, ocurre un aumento o disminución en las distancias interplanares (d) del cristal, que se traduce en un corrimiento hacia ángulos 2θ más bajos o altos, respectivamente (Wang, Sun, 2021). En la Figura no. 1 se puede observar el pico de mayor intensidad de la vermiculita sin modificar y se compara con el pico de mayor intensidad de la vermiculita luego de pasar por el proceso de intercambio catiónico con azul de metileno, que es una de las metodologías más empleadas para la determinación de sitios activos de las arcillas en los que se puede llevar a cabo un intercambio, esto permitió planificar de una manera más controlada el grado de intercambio deseado con el futuro catión de interés, cloruro de benzalconio (Kahr y Madsen, 1995). El difractograma de la arcilla ya intercambiada presentó su señal más intensa con un desplazamiento de 0.17 grados 2θ a la izquierda del difractograma inicial, esto debido a que el catión de azul de metileno es más grande que los cationes sustituidos en la muestra. La desaparición del pico ubicado a 6.34 grados 2θ y su desplazamiento a 6.17 grados 2θ después de someter la muestra a intercambio catiónico sirvió como indicador que la muestra había sido intercambiada por azul de metileno.

Después de confirmar mediante la difracción de rayos X que el intercambio había ocurrido, se estudió el medio acuoso en que se realizó el intercambio catiónico empleando espectrofotometría visible. En la tabla no.1 se puede observar que el resultado obtenido empleando esta técnica se encuentra por debajo de la capacidad de intercambio catiónico de una vermiculita normal, que se presentan entre 80 y 150 meq/100g de arcilla (Chavez, et al., 1973). Debido a esto se realizó la determinación de esta propiedad empleando otra técnica analítica volumétrica y se determinó que la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla utilizada para la elaboración de este experimento sí se encontraba alrededor de 56 meq/100g de arcilla. La baja capacidad de intercambio catiónico de la arcilla pudo deberse a que la muestra utilizada no era vermiculita pura, sino estaba contaminada con algún otro tipo de mineral que presenta bajo intercambio catiónico, como la zeolita (Valdivia, et al., 2021). Tomando en cuenta los rangos mencionados anteriormente de CIC esperada para las vermiculitas, se estimó que se estaba trabajando con una muestra que podría contener entre 38 y 70% de vermiculita en su contenido.

Caracterización de las arcillas modificadas

Al conocer la capacidad de intercambio catiónico de la muestra fue posible realizar la síntesis de la organo-arcilla al 50 y 100% de la capacidad de intercambio catiónico con benzalconio, con la finalidad de evaluar si la saturación de este catión orgánico influye de alguna manera en la adsorción de la cipermetrina. En la Figura no. 2 se puede observar el espectro de FT-IR de la arcilla natural y la modificada al 100 y 50% de su CIC. Se puede observar cómo todos los gráficos comparten señales correspondientes a la arcilla, tales como la señal observada a aproximadamente 3607 cm^{-1} que se atribuye a los grupos OH superficiales, 963 cm^{-1} que se atribuyen a los estiramientos Si–O–Si y a 727 y 664 cm^{-1} correspondientes a los estiramientos Al–O–Si (Madejová, et al., 2017). En las muestras modificadas se pudo observar la aparición de señales que no están presentes en la arcilla natural, que pudieron atribuirse a la presencia de benzalconio, que como se esperaba, presentan mayores intensidades para la arcilla modificada al 100% que para la modificada al 50%, estas señales son la ubicada a 3066 cm^{-1} correspondiente a los estiramientos C–H del anillo aromático del grupo bencilo, en 2925 cm^{-1} y 2854 cm^{-1} por el estiramiento asimétrico y simétrico, respectivamente, de C–H de las cadenas de hidrocarburos y a 1466 cm^{-1} por el estiramiento C=C del anillo aromático bencilo (Kumar, et al., 2008).

En la Figura no. 3, se presentan los resultados del análisis termogravimétrico (TGA) realizado a la arcilla natural comparado con la arcilla modificada al 100% y al 50% de su CIC, la primera pérdida de masa a 113°C se atribuye a la pérdida de agua adsorbida en la primera esfera de hidratación de los cationes entre las capas de las tres arcillas. La segunda pérdida de masa, que se observa a 211°C se debe a la liberación del agua remanente que se encuentra asociada con los cationes entre las capas (Marzec, et al., 2020). La arcilla natural presenta una mayor pérdida de masa en ambas señales debido a que los iones metálicos que se encuentran entre sus capas de silicato tienden a estar rodeados de moléculas de agua, al intercambiar estos iones metálicos, las moléculas de agua también se ven desplazadas por las cadenas de hidrocarburos del benzalconio, disminuyendo significativamente la cantidad de agua en la muestra; debido a esto la primera pérdida de masa para las arcillas modificadas es mucho menor a la de la arcilla natural y la segunda pérdida es muy baja para la arcilla modificada al 50% de su CIC y ya no se percibe para la arcilla modificada al 100% (Xi, et al., 2004). También se puede observar que las arcillas modificadas presentan dos señales que no

están presentes en la arcilla natural; La que se encuentra a 349.5°C se atribuye a las moléculas de benzalconio que se intercambiaron con los iones que se encuentran entre las capas de silicatos de la arcilla, esto explica por qué la pérdida de masa es similar en ambos casos, por otro lado, la señal que se encuentra a 261 °C se atribuye a los iones de benzalconio que se anclaron a las partes externas de las capas de la arcilla, siendo este el motivo por el que la señal a esa temperatura de la arcilla intercambiada al 100% fue mayor que la de la arcilla intercambiada al 50% (Matusik, et al., 2013; Xi, et al., 2004).

El análisis de difracción de rayos X (Figura no. 4) demostró que las arcillas modificadas después de ser sintetizadas mediante ultrasonido en medio acuoso siguen siendo materiales cristalinos y presentan una única señal nueva en el ángulo $3.16\ 2\theta$ cuya intensidad está directamente relacionada con el aumento de la cantidad de benzalconio intercambiada. Por el contrario, las señales que se encuentran ubicadas a $6.15\ 2\theta$ presenta una disminución en su intensidad a medida que aumenta la cantidad de benzalconio debido a la aparición de la nueva señal, que aumenta a medida que aumenta la cantidad de benzalconio. Al hacer un análisis más detallado de cada una de estas señales $d(001)$ de las arcillas, se calculó la distancia interplanar (d) de 14.35Å para la arcilla natural, 14.38 Å para la OVerM 50% y de 27.65 Å para la arcilla OVerM 100%, esta diferencia de distancias interplanares se debió a que la molécula del benzalconio es más grande que los cationes que se intercambiaron, aumentando la distancia entre cada uno de los planos de la arcilla cuando está modificada, en cuanto a la diferencia de distancia interplanar de las dos arcillas modificadas, puede deberse a que por las diferentes saturaciones, las moléculas de benzalconio se acomodaron de diferente forma entre las capas de la arcilla, provocando que la arcilla al 50% presente una menor distancia que la modificada al 100% de su CIC (anexo 7), lo que confirma que el intercambio se llevó a cabo de manera adecuada en las proporciones deseadas (Wang, Sun, 2021; Tuchowska, et al., 2019). Por otro lado, la ausencia de picos correspondientes al patrón de difracción del benzalconio, como $d001$ a $4.23^\circ\ 2\theta$ (ver anexo 8), indicaron que la modificación de la arcilla se realizó completamente y que no quedan residuos de benzalconio que no hayan sido intercambiados (Wang, Sun, 2021; Hall, 1991).

Por último, en la tabla no. 2, se presenta la comparación de los datos obtenidos mediante fluorescencia de rayos X. Previo a obtener estos resultados la muestra fue sometida a calcinación para oxidar todas las moléculas de la muestra, este proceso es conocido como pérdida al fuego, en la que se cuantifica qué cantidad de la muestra se ha volatilizado ya sea en forma de agua, de CO_2 o

NO₂, por lo que resulta muy útil para determinar la cantidad de materia orgánica en la muestra (Heiri, et al., 2001). Sabiendo esto, la diferencia entre pérdidas al fuego de las muestras comparadas se pudo atribuir directamente a la cantidad de benzalconio agregado a la arcilla, ya que la muestra con mayor pérdida al fuego fue la arcilla modificada al 100%, seguida de la arcilla modificada al 50% y por último la arcilla sin modificar que, a pesar de no tener moléculas de benzalconio, tiene una pérdida que puede atribuirse a las moléculas de agua que rodean los iones metálicos entre sus capas de silicatos (Xi, et al., 2004). Por otro lado, se puede observar que, comparado con todos los cationes de las muestras, el catión Mg²⁺ disminuyó en mayor porcentaje a medida que aumentaba la cantidad de benzalconio intercambiado, esto fue debido a que el Mg²⁺ se presenta en la vermiculita como un catión hidratado fuertemente intercambiable, principalmente por cationes débilmente hidratados, como el NR₄⁺ del benzalconio (Schulze, 2005), por lo que esta disminución de magnesio, directamente proporcional al aumento de benzalconio, indicó que se llevó a cabo el intercambio eficientemente.

Pruebas de adsorción

En la Figura no. 5 se pueden observar las diferencias en la adsorción dependiendo del pH del medio. Se sabe que los cambios en el pH pueden llegar a degradar la estructura de la superficie de las arcillas en estado natural, sin embargo, al estar modificada con un catión orgánico como el benzalconio, la superficie de la arcilla está protegida por las largas cadenas hidrofóbicas de hidrocarburo (De Oliveira, et al., 2016). Por otro lado, el análisis de la solución blanco demostró que no se observa ninguna pérdida de benzalconio después de adsorbido en la arcilla (ver anexo 5). Quiere decir que, la diferencia de adsorciones en cada medio se debió a cambios en la molécula de cipermetrina.

En ambas arcillas modificadas, se pudo observar que la adsorción fue menos eficiente en medio ácido (Figura no. 5), esto pudo deberse a que la estructura de la cipermetrina presenta grupos nitrilo, carbonilo y éter que provocan regiones electronegativas a lo largo de la molécula (ver anexo 9). Al estar en contacto con los protones del medio, generan puentes de hidrógeno aumentando el tamaño de la molécula a adsorber y disminuyendo su afinidad por las cadenas apolares del benzalconio, haciendo más difícil su adsorción entre las capas de la arcilla (Yadav, et al., 2019; De Oliveira, et al., 2016).

Por otro lado, la molécula de cipermetrina tiene sitios electrofílicos en algunos enlaces C—H (ver anexo 9) sensibles a ataques nucleofílicos que incluso podrían provocar una degradación por

hidrólisis de la molécula (Al-Mughrabi, et al., 1992), como se puede observar en el barrido espectrofotométrico de la cipermetrina en medio básico (ver anexo 4), el pH utilizado para la experimentación no fue suficiente llevar a cabo la hidrólisis de la molécula, ya que se observa una sola señal a 291nm correspondiente a la cipermetrina. Sin embargo, se observa que la adsorción en este medio no fue la más eficiente, esto pudo deberse a que los sitios electrofílicos de la cipermetrina mantienen la afinidad por los grupos hidroxilos del medio, que se aproximan a estos sitios rodeándolos, y creando esferas de hidroxilos que reducen la afinidad de la cipermetrina con el benzalconio (Yadav, et al., 2019). Es por esto que, la cipermetrina en medio neutro mantuvo su carácter hidrofóbico y al no producir moléculas de mayor volumen ni rodearse de iones sueltos en el medio, tuvo una mejor afinidad con el benzalconio y pudo introducirse de mejor manera entre las capas de la arcilla, permitiendo una mejor remoción del pesticida del agua.

En la Figura no. 6 se presenta la comparación de la capacidad de adsorción de OVerM 50% y OVerM 100% en los tres medios. Sintetizar la arcilla con benzalconio permitió generar un ambiente hidrofóbico en el que la cipermetrina pudo adsorberse (ver anexo 10), sin embargo, al intercambiar el 100% de los cationes inorgánicos de la arcilla por benzalconio provocó una sobresaturación en las superficies, dando lugar a impedimento estérico y formación de capas que limitan la adsorción de la cipermetrina tanto superficialmente, como su ingreso a las capas de la arcilla. Este impedimento, fue menor en la OVerM 50% puesto que no existía sobresaturación, dando lugar a una adsorción más eficiente a lo largo de toda la arcilla que en OVerM 100% (ver anexo 7) (De Oliveira, et al., 2016).

Tanto en la figura no. 5 como en la figura no. 6, se observó que la capacidad de adsorción es directamente proporcional a la concentración inicial de cipermetrina, esto pudo atribuirse a que la cipermetrina adsorbida por el benzalconio que se encontraba en la superficie de la arcilla modificada también tiene afinidad para poder seguir removiendo más cipermetrina del medio mediante interacciones intermoleculares, produciendo de esta manera la formación de múltiples capas de adsorción (Bonilla, et al., 2017).

CONCLUSIONES

1. La vermiculita utilizada para la síntesis presentó una capacidad de intercambio catiónico de 54.53 meq/100 g arcilla según el método espectrofotométrico de azul de metileno y 56.11 meq/100 g de arcilla según el método volumétrico de acetato de amonio. Esta capacidad de intercambio es más baja que las de otras vermiculitas reportadas en diferentes literaturas.
2. Los análisis instrumentales de fluorescencia y difracción de rayos X, análisis termogravimétricos y de espectro infrarrojo de transformada de Fourier permitieron comparar y caracterizar la arcilla natural y las organo-arcillas, confirmando la adecuada síntesis y diferencia de proporciones de benzalconio en cada una de ellas.
3. Se determinó que la variación de adsorción dependiente del pH se debió a cambios en la molécula de cipermetrina y no a cambios en la estructura de la arcilla utilizada como adsorbente, ya que esta se encontraba rodeada y protegida por las largas cadenas apolares del benzalconio intercambiado.
4. La organo-arcilla intercambiada al 50% con benzalconio presentó capacidades de adsorción de 9.53 mg de cipermetrina/g de OVerm para el medio ácido, 22.99 mg de cipermetrina/g de OVerm para el medio acuoso y 32.66 mg de cipermetrina/g de OVerm para el medio neutro, este material tuvo la capacidad de adsorción más alta, debido a que esta presentaba una menor saturación de benzalconio, permitiendo adsorber más cipermetrina.
5. La capacidad de adsorción fue más efectiva a pH 7.0 para ambas arcillas (OVerm 50%: 32.65 mg de cipermetrina/g de OVerm y OVerm 100%: 28.11 mg de cipermetrina/ g de OVerm), debido a que la estructura de cipermetrina en medio neutro es más afín al ambiente apolar de las OVerm que su estructura en medio ácido y básico.

RECOMENDACIONES

Utilizar una arcilla de mayor capacidad de intercambio catiónico para poder evaluar el efecto de las sobresaturaciones de benzalconio en la remoción de cipermetrina. La determinación de la pureza se puede realizar empleando el método de difracción de rayos X, haciendo a la muestra un análisis semicuantitativo empleando el método de Rietveld (Neumann, et al., 2011).

Utilizar un agitador orbital ya que actúa de manera circular a velocidades bajas de manera homogénea para todas las muestras y permiten agitar por tiempos prolongados con bajo calentamiento, a diferencia de una plancha de agitación cuyo calentamiento puede llegar a afectar la termodinámica de los experimentos de adsorción (VWR, s.f.).

REFERENCIAS

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2003). Resumen de salud pública: Piretrinas y piretroides. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs155.pdf
- Al-Mughrabi, K., Nazer, I. y Al-Shuraiqi, Y. (1992). Effect of pH of water from the King Abdallan Canal in Jordan on the stability of cypermethrin. *Crop Protection*, 11(4), 341-344. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(92\)90060-I](https://doi.org/10.1016/0261-2194(92)90060-I)
- Becerril, J. (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Revista Digital Universitaria*, 10(8), 2-7. ISSN: 1067-6079
- Bonilla, A., Mendoza, D. y Reynel, H. (2017). Adsorption processes for water treatment and purification. *Springer*. DOI 10.1007/978-3-319-58136-1
- Bravo, V., Ramírez, F., Berrocal, S. y de La Cruz, E. (2015). Importación de plaguicidas y peligros en salud en América Central durante el periodo 2000-2009. *Uniciencia*, 29(2), 84-106. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.29-2.6>
- Chavez, E., Franklyn, P., y Legarda, L. (1973). Comparación de la capacidad de intercambio catiónico total determinada por cuatro métodos en suelos del altiplano de pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 5(1 y 2), 63-73.
- CMI-G. (2015). La pasión: desastre ecológico y social. Recuperado de: <https://cmiguate.org/la-pasion-desastre-ecologico-y-social/>
- COGUANOR. (1999). Norma COGUANOR NGO 29 001:99. Agua para consumo humano. Guatemala.
- De Oliveira, T., Guegán, R., Thiebault, T., Le Milbeau, C., Muller, F., Teixeira, V., Giovanela, M. y Boussafir, M. (2016). Adsorption of diclofenac onto organoclays: Effects of surfactant and environmental (pH and temperature) conditions. *Journal of Hazardous Meterials*. 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.001>
- Ding, F., Gao, M., Shen, T., Zeng, H., & Xiang, Y. (2018). Comparative study of organo-vermiculite, organo-montmorillonite and organo-silica nanosheets functionalized by

- an ether-spacer-containing Gemini surfactant: Congo red adsorption and wettability. *Chemical Engineering Journal*, 349, 388–396. doi:10.1016/j.cej.2018.05.095
- Eljarra, E. (2015). Investigación sobre contaminantes emergentes: sustancias cotidianas con efectos tóxicos. Recuperado de: <https://rdcsic.dicat.csic.es/en/recursos-naturales-2/122-laboratories/332-investigaciones-sobre-contaminantes-emergentes-sustancias-cotidianas-con-efectos-toxicos>
- Feng, J., Liu, M., Mo, W. y Su, X. (2021). Heating temperature effect on the hygroscopicity of expanded vermiculite. *Ceramics International*, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.259>
- Flores, F. M., Loveira, E. L., Yarza, F., Candal, R., & Sánchez, R. M. T. (2016). Benzalkonium Chloride Surface Adsorption and Release by Two Montmorillonites and Their Modified Organomontmorillonites. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(1). doi:10.1007/s11270-016-3223-2
- García, M. (2016). Apuntes para espectrometría de radiación ultravioleta visible (UV/VIS). Recuperado de: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/68318/secme-1814.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gemeay, A. (2002). Adsorption characteristics and the kinetics of the cation exchange of Rhodamine-6G with Na⁺- Montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 251, 235-241. doi:10.1006/jcis.2002.8410
- Gobierno de Guatemala. (2006). Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. Guatemala.
- Groisman, L., Rav-Acha, C., Gerstl, Z., & Mingelgrin, U. (2004). Sorption and detoxification of toxic compounds by a bifunctional organoclay. *J Environ Qual*, 33(5), 1930-1936. DOI: 10.2134/jeq2004.1930

- Hall, S., Allen, F. y Brown, I. (1991). The Crystallographic Information File (CIF): a New Standard Archive File for Crystallography. *Acta Crystallography*, A47, 655-685. Doi: 10.1107/S2414314623000962
- He, H. y Zhu, J. (2017). Analysis of organoclays and organic adsorption by clay minerals. *Developments in clay science*, 8, 310-342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100355-8.00010-2>
- Heiri, O., Lotter, A., y Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Higiene Ambiental. (2015). Piretroides: de insecticidas ideales a contaminantes pseudo-persistentes. Recuperado de: <https://higieneambiental.com/productos-biocidas-y-equipos/piretroides-de-insecticidas-ideales-a-contaminantes-pseudo-persistentes>
- INACIF. (2018). Intoxicación por plaguicidas; un riesgo latente. Recuperado de: <https://www.inacif.gob.gt/index.php/servicios/k2-blog/item/24-intoxicacion-por-plaguicidas-un-riesgo-latente#:~:text=Guatemala%20es%20un%20pa%C3%ADs%20altamente,y%20en%20el%20%C3%A1rea%20dom%C3%A9stica.>
- Ismadji S., Soetaredjo F.E., Ayucitra A. (2015) Natural Clay Minerals as Environmental Cleaning Agents. *Clay Materials for Environmental Remediation*, 5-37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16712-1_2
- Kahr, G., & Madsen, F. (1995). Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption. *Applied Clay Science*, 9(5), 327-336. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(94\)00028-0](https://doi.org/10.1016/0169-1317(94)00028-0)
- Kumar, S. V., Prasannakumar, S., Sherigara, B. S., Reddy, B. S. R., & Aminabhavi, T. M. (2008). N-vinylpyrrolidone and 4-vinyl Benzylchloride Copolymers: Synthesis,

- Characterization and Reactivity Ratios. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 45(10), 821–827. doi:10.1080/10601320802300545
- Lee, S. y Tiwari, D. (2012). Organo and inorgano-orga-no-modified cays in the remediation of aqueous solutions: An overview. *Applied Clay Science*, 59(60), 84-102. doi:10.1016/j.clay.2012.02.006
- Liu, H., Jiang, L., Lu, M., Liu, G., Li, T., Xu, X., Li, L., Lin, H., Lv, H., Huang, X., & Xu, D. (2019). Magnetic solid-phase extraction of pyrethroid pesticides from environmental water samples using Deep eutectic solvent-type surfactant modified magnetic zeolitic imidazolate framework-8. *Molecules*, 24, 4038. doi:10.3390/molecules24224038
- Liu, S., Wu, P., Chen, M., Yu, L., Kang, C., Zhu, N., & Dang, Z. (2017). Amphoteric modified vermiculites as adsorbents for enhancing removal of organic pollutants: Bisphenol A and Tetrabromobisphenol A. *Environmental Pollution*, 228, 277–286. doi:10.1016/j.envpol.2017.03.082
- Madejová, J., Gates, W. P., & Petit, S. (2017). IR Spectra of Clay Minerals. *Infrared and Raman Spectroscopies of Clay Minerals*, 107–149. doi:10.1016/b978-0-08-100355-8.00005-9
- MAGA. (2016). Agenda Rural 2016-2020. Recuperado de: <https://www.maga.gob.gt/download/agendarural-1620.pdf>
- Marković, M., Daković, A., Rottinghaus, G. E., Petković, A., Kragović, M., Krajišnik, D., & Milić, J. (2017). Ochratoxin A and zearalenone adsorption by the natural zeolite treated with benzalkonium chloride. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 529, 7–17. doi:10.1016/j.colsurfa.2017.05.05
- Marzec, A., Szadkowski, B., Rogowaki, J., Rybinsky, P. y Maniukiewicz, W. (2020). Novel eco-friendly hybrid pigment with improved stability as a multifunctional additive for elastomer composites with reduced flammability an oH sensing properties. *Dyes and Pigments*. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108965>

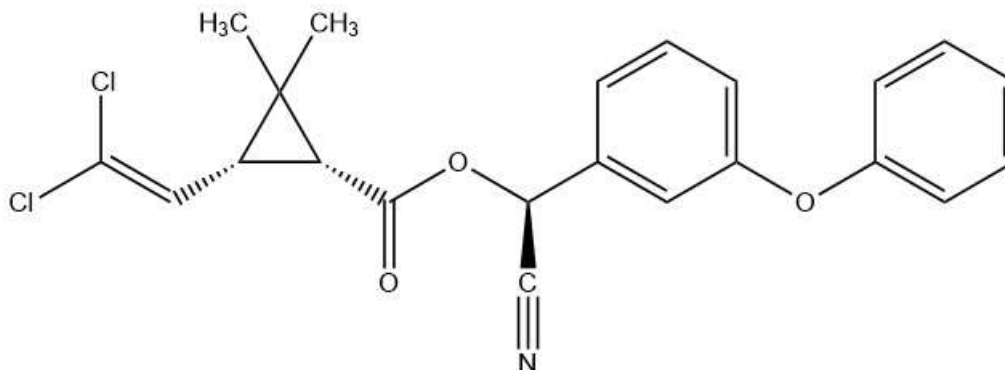
- Matusik, J., & Kłapyta, Z. (2013). Characterization of kaolinite intercalation compounds with benzylalkylammonium chlorides using DRX, TGA/DTA and CHNS elemental analysis. *Applied Clay Science*, 83-84, 433–440. doi:10.1016/j.clay.2013.07.019
- Mir-Marqués, A., Martínez-García, M., Garrigues, S., Cervera, M. L., & de la Guardia, M. (2016). Green direct determination of mineral elements in artichokes by infrared spectroscopy and X-ray fluorescence. *Food Chemistry*, 196, 1023–1030. doi:10.1016/j.foodchem.2015.10.048
- Momma, K. e Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*, 44, 1272-1276. <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>
- Moradpour, T., Abbasi, A., & Daftari-Besheli, M. (2016). Ultrasonic sybthesis of $\{Zn_4O(C_{24}H_{15}N_6O_6)_2(H_2O)*6H_2O*DMF\}$ 3D MOF nanostructures: new precursor to prepare zinc oxide nanoparticles and their application for α -cypermethrin absorption. *Springer*, 42, 7923-7933. doi: 10.1007/s11164-016-2569-9
- Nejaei, A., Rahmanifar, B., Maleki, A., & Gazani, Z. (2017). Collagen-based CuO nanoparticles: a new adsorbent for removal of cypermethrin from water. *Fresenius Environmental Bulletin*. 26(4), 2739-2746.
- Neumann, R., Lima, G., Gaspar, J., Palmieri, M. y Silva, S. (2011). The mineral pase quantification of vermiculite and interstratified clay minerals-containing ores by X-ray diffraction and Rietveld method after K cation exchange. *Minerals Engineering*, 24(12), 1323-1334. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.017>
- Ng, C., Losso, J., Marshall, W. y Rao, R. (2002). Freundlich adsorption isotherms of agricultural by-product-based powdered activated carbons in a geosmin-water system. *Bioresource Technology*, 85, 131-135. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00093-7)

- Olmo, M. y Nave, R. (s.f). Energías experimentales de rayos X y alfa K. Recuperado de:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/kxray.html#c1>
- Organización Mundial de la Salud. (2019). Clasificación recomendada por la OMS de los plaguicidas por el peligro que presentan y directrices para la clasificación.
<https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1319595/retrieve>
- Pal, O., & Vanjara, A. (2000). Removal of malatihion and butachlor from aqueous solution by clays and organoclays. *Separation and Purification Technology*, 24(1-2), 167-172.
[https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00226-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00226-4)
- Pérez-Maqueda, L. A. (2003). Study of natural and ion exchanged vermiculite by elimination thermal analysis, TG, DTA and XRD. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 71(3), 715–726. doi:10.1023/a:1023353521235
- Rivas, I. (2015). Diseño, desarrollo y evaluación de una formulación de microcápsulas del piretroide cipermetrina (Tesis doctoral). Universidad Complutense, Madrid, España.
- Rivas, P., Ollier, R., Alvarez ,V., & Huck, C. (2021). Enhancing the integration of bentonite clay with polycaprolactone by intercalation with a cationic surfactant: effects on clay orientation and composite tensile properties. *Journal of Materials Science*, 56, 5595-5608. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05603-5>
- Samayoa, L. (2009). Análisis de la legislación que regula el uso de los pesticidas o plaguicidas y efectos que produce en el medio ambiente guatemalteco (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala.
- Schomakers, J., Mentler, A. y Mayer, H. (2014). Determination of dissolved organic carbon in soils with UV spectroscopy, ultrasonic dispersion pre-treatment and separation with size exclusion chromatography. *Journal of Soil Science*, 4(2), 127-142. DOI: 10.3232/SJSS.2014.V4.N2.01
- Schulze, D. (2005). Encyclopedia of soils in the environment. *Clay Minerals*, 246-254. DOI: 10.1016/b0-12-348530-4/00189-2

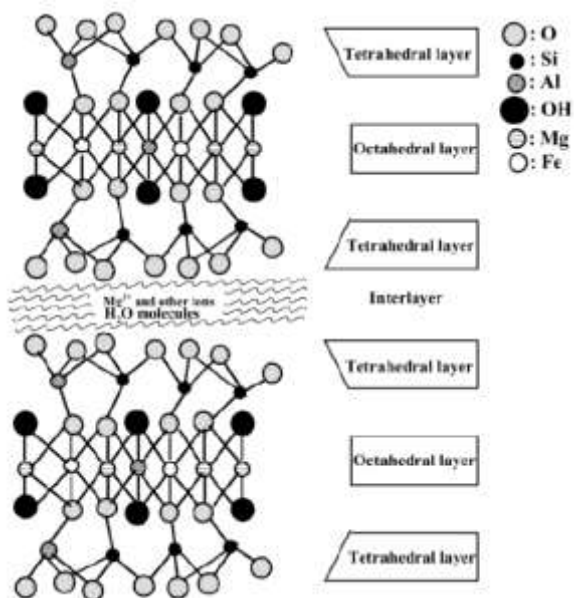
- Stawiński, W., Węgrzyn, A., Freitas, O., Chmielarz, L., Mordarski, G., & Figueiredo, S. (2017). Simultaneous removal of dyes and metal cations using an acid, acid-base and base modified vermiculite as a sustainable and recyclable adsorbent. *Science of The Total Environment*, 576, 398–408. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.1
- Tavacoli, M., Hajimahmoodi, M., Shemirani, F., Dezfali, A., & Khanavi, M. (2017). Application of Fe₃O₄/RGO nanocomposite as a sorbent of pesticides. *Springer* 80, 1423-1432. doi: 10.1007/s10337-017-3361-8
- Tuchowska, M., Wolowiec, M., Solinska, A., Koscielniak, A., & Bajda, T. (2019) Organo-modified vermiculite: Preparation, characterization and sorption of arsenic compounds. *Minerals*, 9(8), 483. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9080483>
- Universidad Nacional Costa Rica. (s.f). Cipermetrina. Recuperado de: <http://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr/index.php/base-de-datos-menu/124-cipermetrina>
- Uzoije, A., Kamalu, C., & Basil, U. (2015). Adsorption kinetics and mechanisms of cypermethrin and dichlorovos on heterogeneous activated carbon porous media. *Open Access Library Journal*, 2, 1-15. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101988>
- VWR. (s.f.). Orbital Shakers. Recuperado de: <https://es.vwr.com/store/category/agitadores-orbitales/595665>
- Wang, Y. y Sun, Z. (2021). Modified preparation, and characteristics of vermiculite as catalysts support for catalytic pyrolysis. *E3S Web of Conferenses*, 271 (04009). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127104009>
- Xi, Y., Ding, Z., He, H., y Forst, R. (2004). Structure of organoclays-an X-ray diffraction and thermogravimetric analysis study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), 116-120. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.053>
- Yadav, E., Tiwari, A., Nishad, R. y Singh, M. (2019). Computational evaluation of electronic properties, reactivity parameters and toxicities of alpha-cypermethrin and beta-cyfluthrin pyrethroids. *Biochemical and Cellular Archives*, 19(1), 1239-1246. DOI: 10.35124/bca.2019.19.1.1239.

Zhang, Z., Liao, L., & Xia, Z. (2010). Ultrasound-assisted preparation and characterization of anionic surfactant modified montmorillonites. *Applied Clay Science*, 50(4), 576-581.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.017>

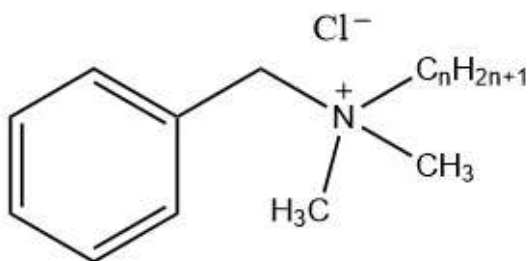
ANEXOS

Anexo 1: Estructura molecular del piretroide cipermetrina

Fuente: Elaboración propia.

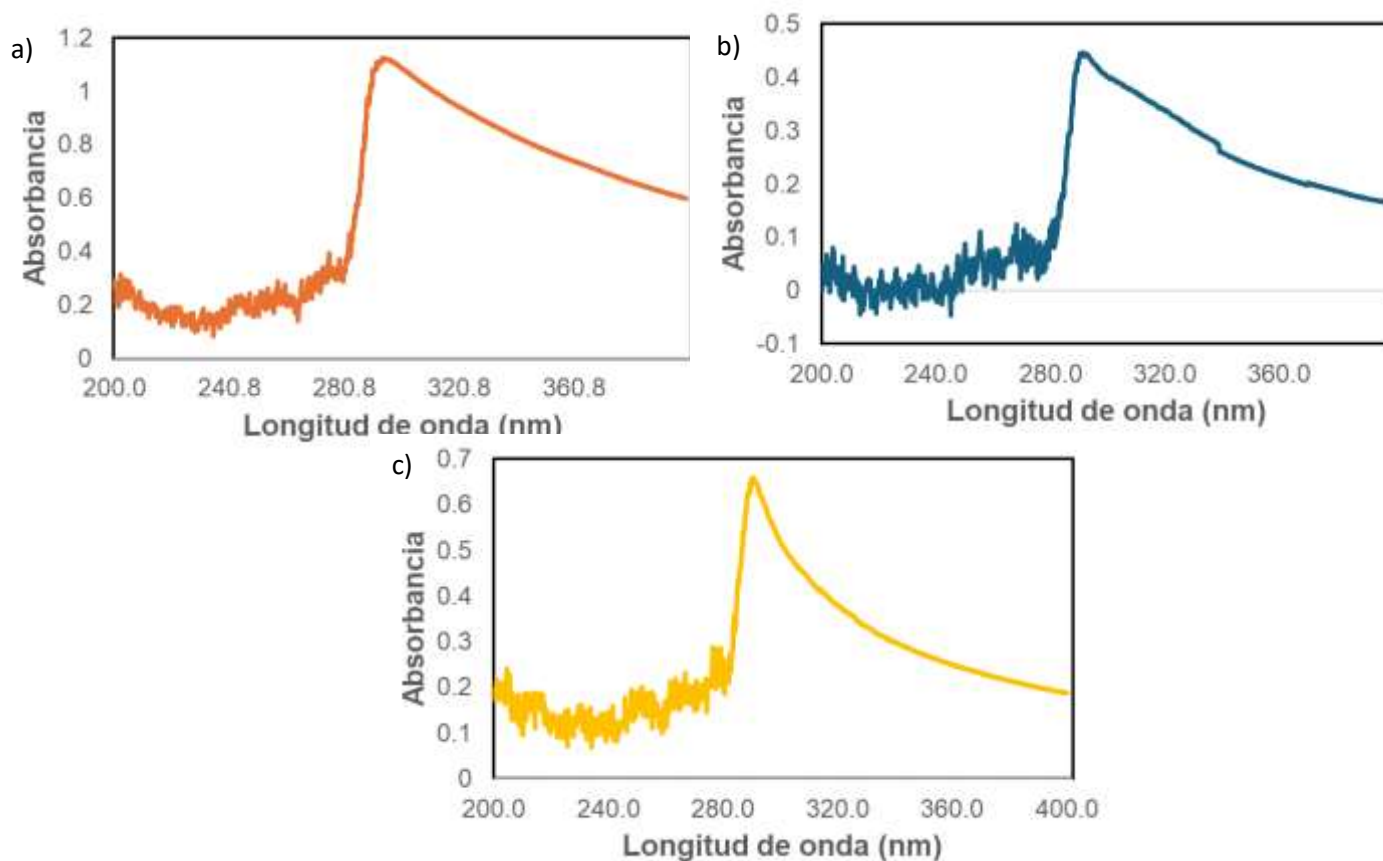
Anexo 2: Estructura molecular de la arcilla vermiculita.

Fuente: (Jermakka. et al., 2015)

Anexo 3: Estructura molecular de la sal cuaternaria de amonio cloruro de benzalconio.

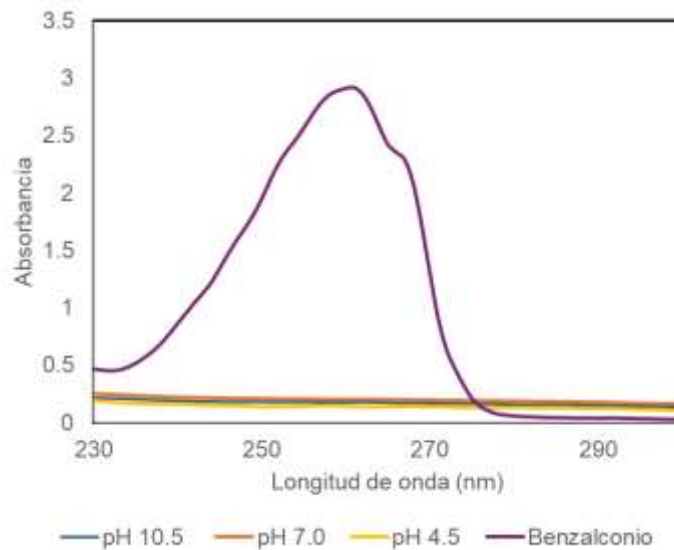
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Barrido espectrofotométrico UV de 200 a 400nm.



Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Química Orgánica, T10, USAC.

Anexo 5: Barrido espectrofotométrico UV de 230 a 300 nm a solución de benzalconio y soluciones blanco.



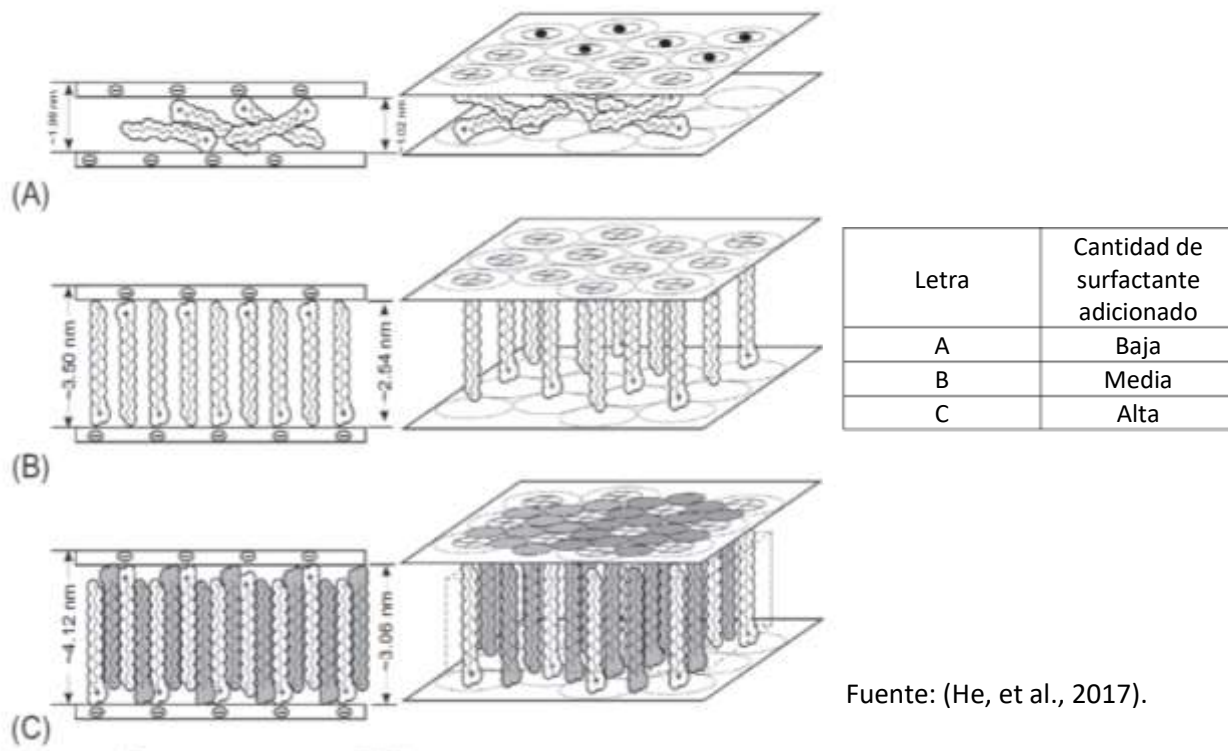
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio químico CETEC, Cementos Progreso.

Anexo 6: Tabla para elaboración de Figura no. 5 “Capacidad de adsorción de cipermetrina adsorbida a diferentes pH empleando las arcillas modificadas.” Y la Figura no 6 “: Comparación de capacidad máxima de adsorción OVerM 50% vs OVerM 100% en diferentes

Arcilla	Medio	Concentración inicial	q	Desviación q
OVerM 50%	Ácido (4.5)	25	2.55902614	0.09654813
		50	5.29905189	0.17411370
		100	7.65649946	3.28184189
		110	9.38867140	0.36664849
		125	9.53250562	1.42606100
	Básico (10.5)	25	4.37975196	0.50738764
		50	8.76978716	1.12105441
		100	18.9195532	2.75197761
		110	21.7145059	1.29045956
		125	22.9877467	1.65008947
	Neutro (7)	25	9.62255899	0.24684132
		50	15.8489341	3.37979938
		100	29.3396441	1.72276794
		110	32.3541442	1.55651479
		125	32.6586394	1.40919369
OVerM 100%	Ácido (4.5)	25	2.06396728	0.9025860
		50	4.04273960	0.1164514
		100	6.53286505	0.2793689
		110	6.95139547	0.2412546
		125	9.39590759	0.8166033
	Básico (10.5)	25	4.18503937	2.35251642
		50	6.61477046	3.49506651
		100	6.99954388	0.70222756
		110	7.44358921	0.20554688
		125	9.56055118	1.58469868
	Neutro (7)	25	5.66378794	0.2001965
		50	10.8537806	0.44083903
		100	18.6898939	2.92535673
		110	23.5378106	4.17055212
		125	28.1111811	4.29450966

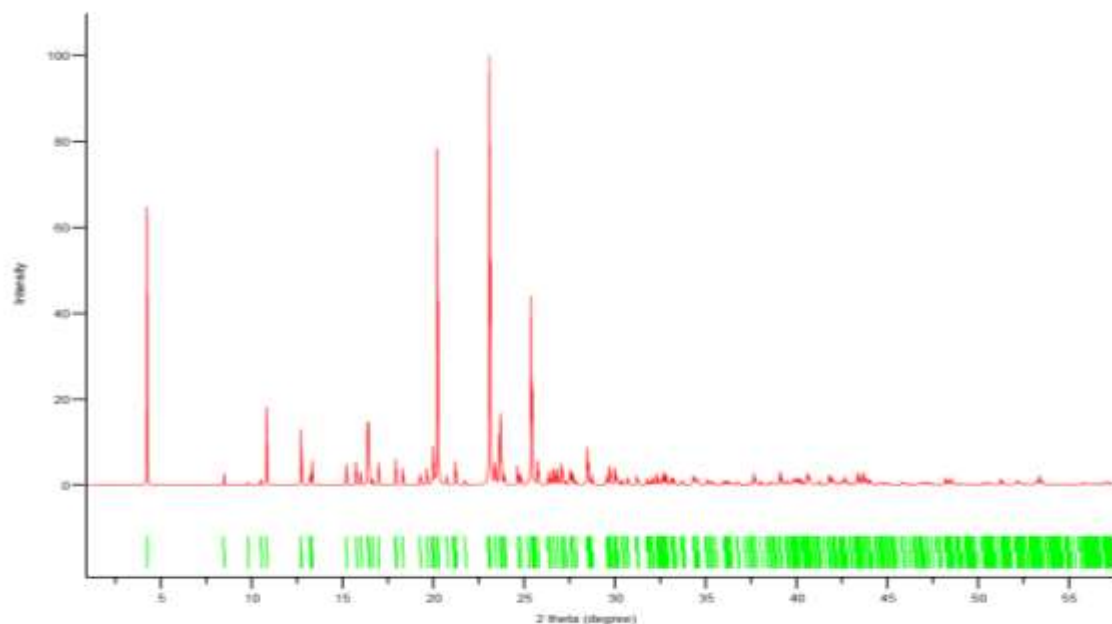
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Química Orgánica, T10, USAC.

Anexo 7: Ejemplificación de la interacción de la arcilla con benzalconio en diferentes grados de saturación de las organoarcillas.



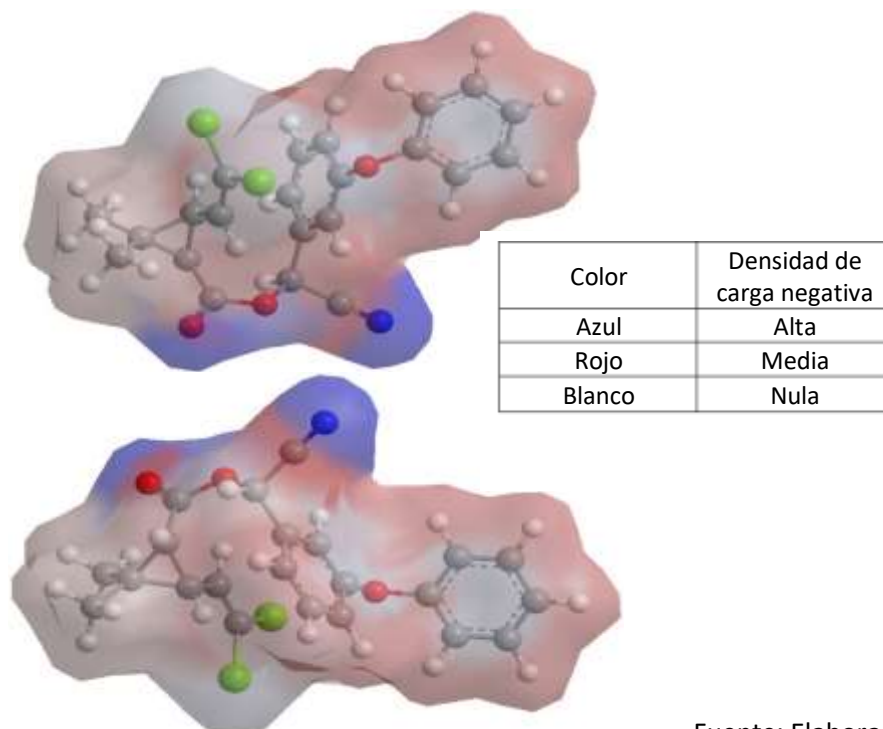
Fuente: (He, et al., 2017).

Anexo 8: Patrón de difracción del cloruro de benzalconio.



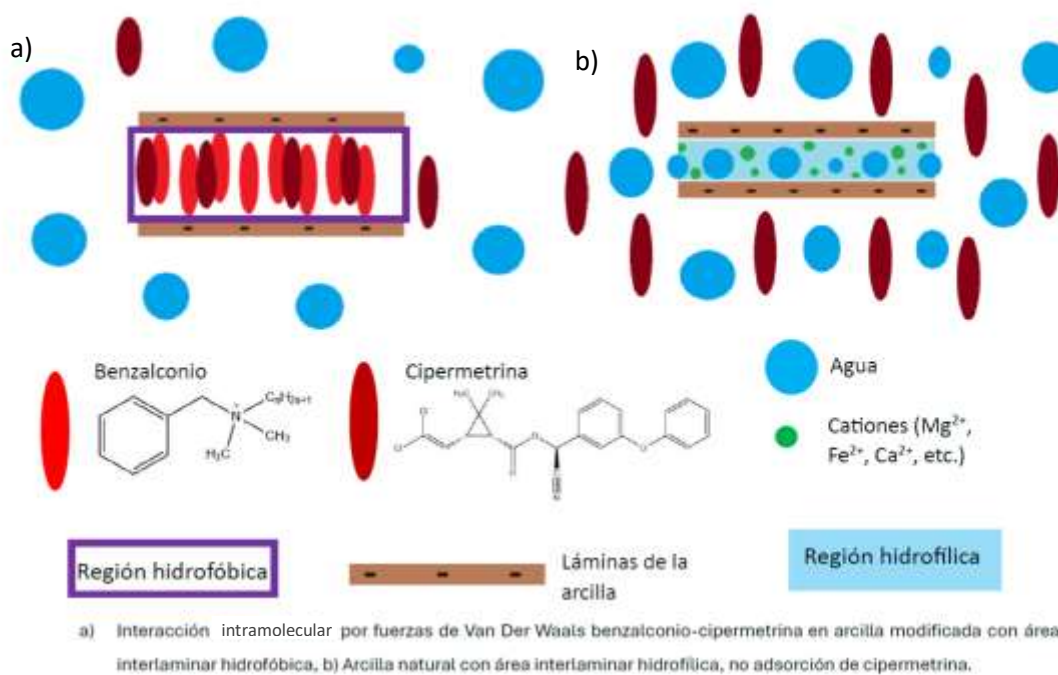
Fuente: (Momma, 2011).

Anexo 9: Densidades de carga de la cipermetrina.



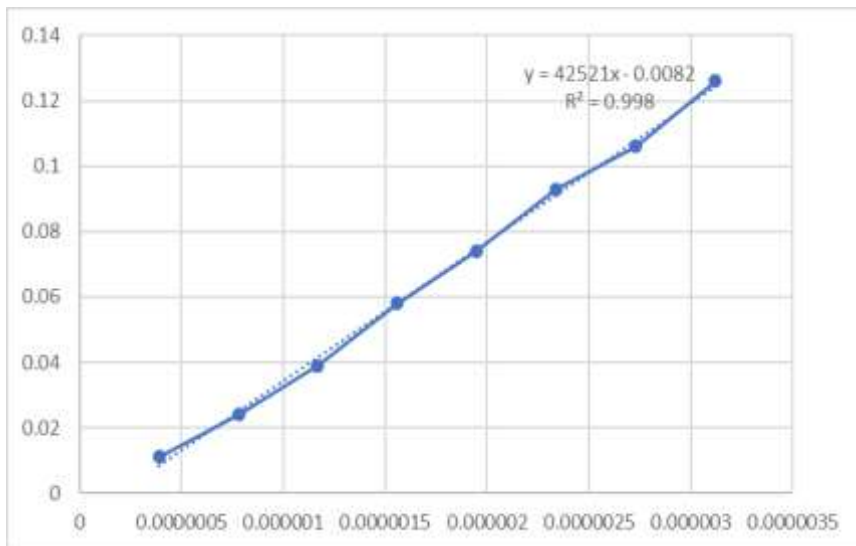
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10: Representación gráfica interacción arcilla modificada-cipermetrina y arcilla natural-cipermetrina.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11: Ecuación de la curva de AM para la determinación de CIC de la vermiculita.



$$y = 42521x - 0.0082$$

$$R^2 = 0.998$$

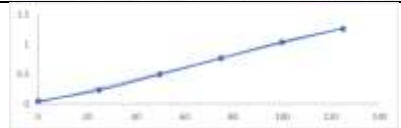
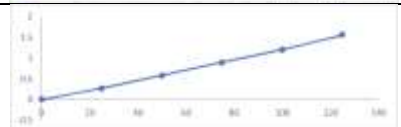
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio Químico, CETEC, Cementos Progreso.

Anexo 12: Ecuaciones de la curva para la determinación de adsorción de OVerm 50%.

Medio	Ecuación de la curva	R ²	Gráfica
Ácido	$y = 0.0119x + 0.0466$	0.9973	
Básico	$y = 0.0086x + 0.0153$	0.9962	
Neutro	$y = 0.0096x + 0.145$	0.9906	

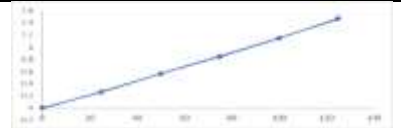
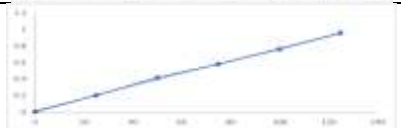
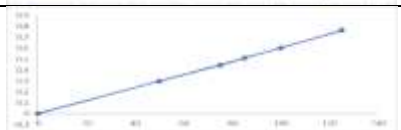
Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Química Orgánica, T10, USAC.

Anexo 13: Ecuaciones de la curva para la determinación de adsorción OVerM 100%.

Medio	Ecuación de la curva	R ²	Gráfica
Ácido	$y = 0.0111x + 0.0952$	0.9958	
Básico	$y = 0.01x + 0.0112$	0.9972	
Neutro	$y = 0.0125x - 0.0265$	0.9986	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Química Orgánica, T10, USAC.

Anexo 14: Ecuaciones de la curva para la determinación de adsorción de la arcilla natural.

Medio	Ecuación de la curva	R ²	Gráfica
Ácido	$y = 0.0061x - 0.0037$	0.9994	
Básico	$y = 0.0076x + 0.0145$	0.9990	
Neutro	$y = 0.0125x - 0.0265$	0.9986	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Química Orgánica, T10, USAC.

Anexo 15: Síntesis de OVerM antes y después de ser sometido a ultrasonido por 24 horas.



Fuente: Elaboración propia.

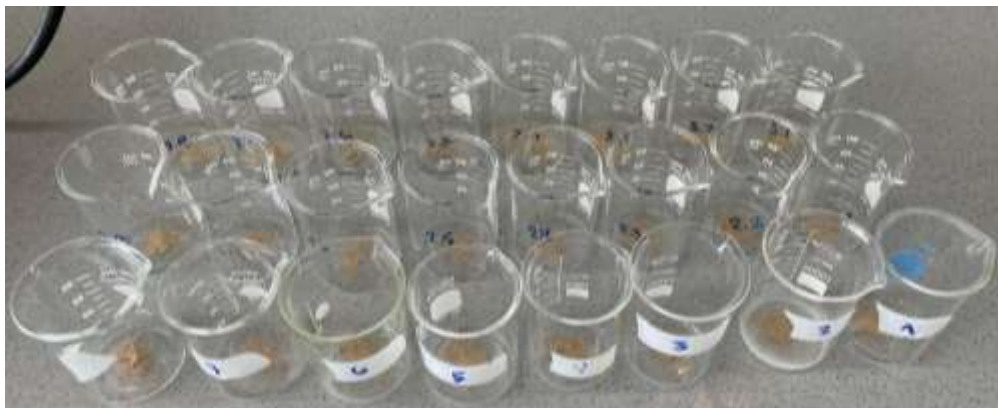
Anexo 16: Pesaje de arcillas para las pruebas de adsorción.



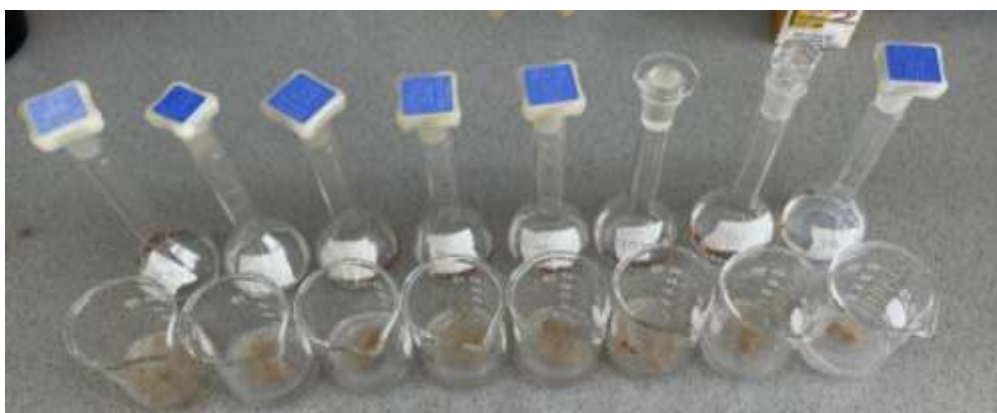
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 17: Equipo para la realización de la adsorción de cipermetrina del medio.

Arcilla pesada en los Beaker



Soluciones de cipermetrina



Solución de cipermetrina adicionada a la arcilla en 3 pH diferentes



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 18: Equipo para la agitación de las arcillas con cipermetrina a diferentes pH.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 19: Potenciómetro utilizado para la medición del pH.



Fuente: Elaboración propia.



Sara Marcela Salazar Ordoñez



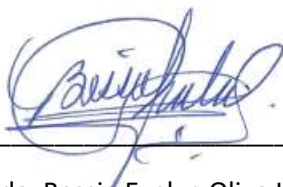
Dr. Byron José López Mayorga

Asesor



M. Sc. Carlos Enrique Torres Méndez

Asesor



Licda. Bessie Evelyn Oliva Hernández

Directora de Escuela de Química



Dr. Juan Francisco Pérez Sabino

Decano en Funciones de la Facultad de ciencias Químicas y Farmacia