



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial –PUIDI–

Análisis de la viabilidad de las organoarcillas como posibles agentes de remediación de fosfatos
en agua contaminada proveniente del lago de Amatitlán

4.8.63.6.75

Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas –IIQB–

M. Sc. Erick Giovanni Estrada Palencia (Coordinador del Proyecto de Investigación)

Ing. Mauricio Valentino Rivera Tello (Investigador)

Lic. Astrid Carolina Ubeda Contreras (Investigadora)

Br. Sofía Alejandra Pérez Gómez (Auxiliar de Investigación II)

Br. José David Lux Barrera (Auxiliar de Investigación I)

Br. María Fernanda Figueroa Estrada (Auxiliar de Investigación I)

Guatemala, 14/02/2025



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

MARN Ing. Agr. Julio Rufino Salazar

Coordinador General de Programas

Inga. Liuba Cabrera de Villagrán

Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación

Autores

Erick Giovanni Estrada Palencia, 19990245

Mauricio Valentino Rivera Tello, 20141714

Astrid Carolina Ubeda Contreras, 20241210

Sofía Alejandra Pérez Gómez, 20230937

José David Lux Barrera, 20241212

María Fernanda Figueroa Estrada, 20220743

Colaboradores (si aplica):

Br. Renato Rodolfo Rivera Tello (Investigador Asociado), Universidad del Valle de Guatemala –UVG–



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Dr. Mischa Zelzer (Profesor Asociado en Ingeniería y Biointerfase de Materiales),
Universidad de Nottingham

Dr. Florencio Rolando Cifuentes Velásquez (Director del Centro de Estudios Agrícolas y
Alimentarios –CEAA–), Universidad del Valle de Guatemala –UVG–

M.Sc. Fabiola Marisol Reyna Tobar (Coordinadora del Programa en Ciencia y Tecnología
de Alimentos -PECTA-), Universidad del Valle de Guatemala -UVG-

M. Sc. Luis Velásquez Coronado (Gerente del Centro de Investigación y Desarrollo –CID–
) , Cementos Progreso

Ing. Elvis Geovanni García Román (Gerente del Laboratorio del Centro de Investigación y
Desarrollo –CID–), Cementos Progreso

Licda. Loida Saraí Morales García (Coordinadora de Laboratorio Químico CETEC),
Cementos Progreso

Ing. José Diego Morales Ortega (Jefe de la División de Control, Calidad Ambiental y Manejo
de Lagos), Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán –
AMSA–

Lic. Herberth Alejandro Ismatul Rejopachí (Analista Profesional), Autoridad para el Manejo
Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán –AMSA–

Ing. Cesar Linneo García Contreras (Profesor Titular de la Facultad de Agronomía),
Universidad de San Carlos de Guatemala –USAC–

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la
Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número:
4.8.63.6.75 en el Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Índice general

Contenido

1. Resumen	7
Palabras clave.....	7
2. Abstract	8
Keywords.....	8
3. Introducción	9
4. Contexto de la investigación	11
5. Revisión de literatura	12
6. Planteamiento del problema.....	21
7. Preguntas de investigación.....	23
8. Objetivos.....	24
9. Hipótesis (si aplica).....	24
10. Método.....	25
10.1. Tipo de investigación.....	25
10.2. Enfoque y alcance de la investigación.....	25
10.3. Diseño de la investigación.....	25
10.4. Población, muestra y muestreo.....	25
10.5. Técnicas.....	26
10.6. Resumen de las variables o unidades de análisis	32
10.7. Procesamiento y análisis de la información.....	33
11. Aspectos éticos y legales.....	34
12. Resultados y discusión	35
13. Propiedad intelectual	50
14. Beneficiarios directos e indirectos	51
15. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	53
16. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).....	55
17. Contribución al desarrollo de iniciativas de ley	55
18. Vinculación	56
19. Conclusiones	57
20. Recomendaciones	58



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

21.	Referencias.....	59
22.	Apéndice	69
	Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación	85
	Aval del director (a) del instituto	86
	Aprobación de la Dirección General de Investigación	86

Índice de Tablas

Tabla 1.....	32
Tabla 2.....	41
Tabla 3.....	43
Tabla 4.....	44
Tabla 5.....	45
Tabla 6.....	46
Tabla 7.....	49
Tabla 8.....	51
Tabla 9.....	53

Índice de Figuras

Figura 1	37
Figura 2	38
Figura 3	39
Figura 4	40
Figura 5	47
Figura 6	48



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

1. Resumen

El fósforo es un elemento esencial para la vida en la Tierra y cumple un papel crucial en diversos procesos metabólicos en prácticamente todos los organismos vivos, siendo un componente fundamental durante el desarrollo como la síntesis de ADN, ARN ATP y transferencia de energía a nivel celular. A pesar de la importancia de dicho elemento, su disponibilidad está sujeta a la capacidad de extracción de depósitos de rocas fosfatadas, sin embargo, la sobrecarga en la industria de producción agrícola ha generado una alta dependencia de este elemento para suplir las necesidades alimenticias, incrementando el costo de los mismos y limitando su acceso.

Una problemática asociada a la utilización de este elemento es la transformación en especies fosfatadas altamente solubles, las cuales son aplicadas en exceso en las áreas de cultivo, en forma de fertilizantes, donde una parte es aprovechada por las plantas y el excedente es transportado por escorrentías hasta afluentes y finalmente reservorios de agua, esto ha provocado desequilibrios químicos en cuerpos acuáticos de Guatemala.

La investigación presente hace uso del desarrollo de organoarcillas capaces de capturar y liberar fosfatos solubles, con el objetivo de evaluar la capacidad de las mismas para regenerar fósforo en muestras de agua, para ello se utilizaron muestras de agua provenientes del lago de Amatitlán, con la finalidad de reutilizar nutrientes encontrándose que las 3 organoarcillas sintetizadas son capaces de remover de forma reversible hasta un máximo del 35% de fosfatos, lo cual las plantea como opciones viables para regeneración de nutrientes.

Palabras clave

1. Arcillas	2. Nutrientes	3. Contaminación	4. Lago	5. Regeneración
-------------	---------------	------------------	---------	-----------------



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

2. Abstract

Phosphorus is an essential element for life on Earth and plays a crucial role in various metabolic processes in practically all living organisms. It is a fundamental component during development processes such as the synthesis of DNA, RNA, ATP, and energy transfer at the cellular level. Despite the importance of this element, its availability is subject to the extraction capacity of phosphate rock deposits. However, the overload in the agricultural production industry has generated a high dependence on this element to meet food needs, increasing its cost and limiting access.

A problem associated with the use of this element is its transformation into highly soluble phosphate species, which are applied in excess in cultivation areas in the form of fertilizers. While part of these phosphates is utilized by plants, the excess is transported by runoff to water bodies and eventually to water reservoirs. This has caused chemical imbalances in aquatic bodies in Guatemala.

The present research involves the development of organoclays capable of capturing and releasing soluble phosphates, with the aim of evaluating their capacity to regenerate phosphorus in water samples. For this purpose, water samples from Lake Amatitlán were used, with the intention of reusing nutrients. The study found that the three synthesized organoclays are capable of reversibly removing up to a maximum of 35% of phosphates, making them viable options for nutrient regeneration.

Keywords

1. Clays	2. Nutrients	3. Pollution	4. Lake	5. Regeneration
----------	--------------	--------------	---------	-----------------



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

3. Introducción

El agua es un recurso esencial, que debe ser preservado adecuadamente, ya que sustenta la vida en nuestro planeta, el cual, a pesar de estar cubierto en su mayoría por agua, únicamente el 2% es agua dulce que puede ser aprovechada. Debido a la producción industrial y actividad humana, los cuerpos de agua reciben grandes cantidades de contaminación, en particular de nitrógeno y fósforo, lo cual llega a aumentar la eutrofización de los ecosistemas, siendo los fosfatos los responsables principales de esta proliferación excesiva de algas y plantas acuáticas, que llega a afectar la calidad del agua, amenazando la vida humana y los ecosistemas (Song et al., 2022; Velusamy et al., 2021). Este es el caso del lago de Amatitlán, el cual se considera que se encuentra en un estado hipereutrófico, presentando altas concentraciones de algas y fitoplancton (Romero, 2019). Por lo cual, se buscó analizar la viabilidad de las organoarcillas funcionalizadas como agentes de remediación de fosfatos en agua contaminada.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de cultivos y plantas; generalmente el suelo carece de cantidades adecuadas para ello, por lo que es un aditivo usado ampliamente en la formulación de fertilizantes, y llega a los cursos de agua a través de las aguas de lavado de los campos, donde se va acumulando y causando eutrofización, como resultado de la actividad agrícola. De esto, además del problema de la contaminación del agua, también se tiene el problema de la baja disponibilidad del fósforo en los suelos, puesto que su ciclo endógeno y alta solubilidad favorecen la acumulación de este elemento en los cuerpos de agua, siendo así que en un futuro a mediano plazo, las regiones que posean fósforo tendrán un recurso de alto valor, pues es indispensable para la actividad agrícola.

Actualmente, el desarrollo de tecnologías eficientes para la eliminación de fosfatos en agua sigue siendo un desafío. Existen varios métodos planteados para este objetivo, que pueden ser procesos químicos y físicos (electrocoagulación, ósmosis reversa, electrodiálisis, precipitación, intercambio de iones, filtración, tecnología de membranas, adición de sales metálicas), métodos biológicos (uso de plantas para biorremediación), técnicas de adsorción (adsorbentes fibrosos con zirconio, biocarbón, lodo férrico), y nanotécnicas (nano-alúmina).



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Si bien existen diversos métodos que ayudan a la eliminación de fosfatos en agua, no todos son adecuados, llegando a presentar desventajas como generación de residuos abundantes, necesidad de alto consumo de energía, necesidad de tratamientos posteriores, y baja eficiencia de remoción de fosfatos. Se ha encontrado que los métodos más eficientes son los de adsorción, siendo económicamente viables, con alta tasa de efectividad y sin producción de desechos indeseados (Song et al., 2022; Velusamy et al., 2021).

Ante estos desafíos ambientales, se propuso un método económicamente viable, respetuoso con el medio ambiente, y sostenible, en el cual se utilizaron organoarcillas, que entran en la categoría de métodos de adsorción, cuya eficiencia para la remoción de fosfatos solubles ha sido optimizada a través de la funcionalización de las mismas con aminoácidos (lisina, histidina y glicina), y que adicionalmente, tienen la capacidad de desorción (bajo las condiciones adecuadas), lo que permitió la liberación de fósforo proveniente de agua contaminada, para su aprovechamiento como nutriente; además de ayudar a la reducción de fosfatos en muestras de agua con abundante eutrofización, como lo es el lago de Amatitlán.

La investigación tuvo como objetivo determinar la viabilidad de las organoarcillas como elementos de remediación de fosfatos, encontrándose aptas para dicha actividad, pues permitieron disminuir las concentraciones de fosfatos y liberarlos en una solución acuosa alcalina.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

4. Contexto de la investigación

La presente investigación abarcó una temporalidad de 5 meses iniciando el 02 de julio al 31 de diciembre de 2024, considerando una delimitación espacial que incluye la cuenca del lago de Amatitlán donde se realizó un análisis de calidad de agua en diferentes puntos y además se realizó el muestreo para obtener una fuente de agua con fosfatos para la captura, se considera además dentro de la delimitación espacial las instalaciones del laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia; la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán; Laboratorio de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad del Valle de Guatemala.

Como población meta se consideran a productores de alimentos agrícolas del interior de la República de Guatemala, que pueden aprovechar la tecnología y el desarrollo generado en el proyecto de investigación para disponer de diversas estrategias de agricultura de mayor eficiencia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

5. Revisión de literatura

Fosfatos

El fósforo es un elemento esencial para los campos agrícolas en forma de fosfatos, pero debido a la poca solubilidad de estos, muchas veces no se encuentran en buena cantidad en los suelos, por lo que se hace necesario agregar dicho elemento en la formulación de fertilizantes como hidrogenofosfatos (Mort et al., 2024).

La industria de fertilizantes consume casi el 90% de la producción mundial de roca fosfórica. El incremento en la aplicación de estos fertilizantes fosfatados ha mejorado la concentración de fósforo en el suelo, causando una acumulación excesiva de este elemento en algunos suelos incluso hasta profundidades de 0.75 m. Esta dosis de fertilizantes fosfatados podría suponer un problema ambiental, especialmente en los cursos de agua (Fátima & Gasalla, 2022).

Siendo una parte importante el fósforo en los nutrientes del suelo para los cultivos, se ha observado que en las aguas de lavado de los campos se van acumulando especies de este elemento en los cuerpos de agua en sus formas comunes; ortofosfatos, fosfatos condensados, fosfatos unidos a moléculas orgánicas, donde su acumulación presenta una aceleración en el proceso de eutrofización, debido a la alta concentración de nutrientes de origen antropogénico. Otro de los problemas avistados en el futuro a mediano plazo, será la falta de obtención de fósforo disponible de manera ubicada en su forma de mineral, lo cual hará que las regiones que posean el elemento tendrán un recurso de alto valor, ya que repercute en los cultivos de alimentos (Chen & Graedel, 2016).

El fósforo es un nutriente crítico para la agricultura y la salud de los ecosistemas, pero su uso plantea desafíos ambientales. El exceso de fósforo en los cuerpos de agua conduce a la eutrofización, causando problemas ecológicos y económicos (Conci et al., 2024). La escorrentía agrícola y las aguas residuales son las principales fuentes de contaminación por fósforo (Pantano et al., 2016). Las plantas absorben fósforo en forma de fosfatos y fosfitos, siendo los fosfatos esenciales para la nutrición vegetal (Villegas Torres, 2016). Las bacterias juegan un papel crucial en la disponibilidad del fósforo orgánico a través de la mineralización



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

bioquímica, especialmente en ecosistemas pobres en nutrientes (Tapia-Torres & García-Oliva, 2013). Sin embargo, las reservas mundiales de roca fosfórica se están agotando, lo que podría amenazar la seguridad alimentaria en los próximos 50-100 años (Pantano et al., 2016). Para abordar estos problemas, son necesarias mejores prácticas de fertilización, tecnologías de recuperación de fósforo y estudios regionales sobre los impactos del fósforo en los sistemas acuáticos (Conci et al., 2024; Pantano et al., 2016). Estos esfuerzos son vitales para la gestión sostenible del fósforo y la protección de los recursos hídricos.

Adsorción del fósforo

La adsorción se puede definir como un proceso de superficie que conduce a la transferencia de una molécula de una masa fluida a una superficie sólida, tratando de compensar las fuerzas de atracción superficial. Esto puede ocurrir debido a fuerzas físicas o por enlaces químicos (Fátima & Gasalla, 2022).

Según Reddy y DeLaune (2008) y Weihrauch y Opp (2018) los enlaces adsorbentes más estables se crean por la adsorción de los iones a las superficies de las partículas en una fase inicial, formando grupos de iones multinucleares. Con el tiempo y el aumento de la concentración de iones, estos pueden precipitar como sólidos en las superficies de adsorción. Dentro de estos enlaces muy estables se incluiría el P “ocluido”, que se forma cuando el P se difunde a través de microporos, tanto de minerales como de complejos organometálicos, o cuando aparece cada vez más encapsulado por el crecimiento de concreciones minerales, donde difícilmente puede ser reemplazado.

Los principales factores que afectan a la capacidad de adsorción del P incluyen el pH, la calidad y cantidad de materia orgánica, la textura, la mineralogía y la presencia y cristalinidad de óxidos de Fe y Al (Fátima & Gasalla, 2022).

La adsorción de contaminantes en suelos y materiales sintéticos es un tema crucial en la química ambiental y el tratamiento de aguas residuales. En suelos, la adsorción de fósforo está influenciada por factores como el tiempo, pH, materia orgánica y óxidos de hierro y



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

aluminio La adsorción de fósforo aumenta con el tiempo y es afectada por el pH, aunque de manera limitada en el rango de 4 a 8 (Asomaning, 2020).

Los materiales sintéticos, como las hidrotalcitas (HT), han demostrado ser efectivos para la adsorción de contaminantes recalcitrantes como hidrocarburos clorados (HC) y sustancias poly- y perfluoroalquilas (PFAS) (Nicolás, 2020). El mecanismo de adsorción depende del anión intercalado en la interlámina de la HT y de las propiedades del adsorbato. Para HT orgánicas hidrofóbicas, la adsorción de HC ocurre por partición debido a fuerzas hidrofóbicas. En cambio, la adsorción de PFOS y PFOA en HT inorgánicas con carbonato se produce por fuerzas electrostáticas y puentes de hidrógeno (Nicolas, 2020).

Se han desarrollado materiales compuestos específicos para la adsorción de fosfatos en aguas residuales. Un compuesto de pollucita/ferrihidrita/hematita en forma de pellets ha mostrado efectividad en la adsorción de fosfatos mediante procesos físicos y químicos (Guaya et al., 2023). Este adsorbente no requiere ajuste de pH, lo que lo hace viable en condiciones normales de agua residual tratada. Sin embargo, la adsorción es relativamente lenta debido a la difusión intraparticular. El adsorbente en polvo mostró mejor adsorción que los pellets, posiblemente debido a que la calcinación bloquea los canales de acceso para la unión del fosfato. Aunque la regeneración de los pellets es limitada, se ha propuesto su uso como mejorador de suelos, aportando nutrientes para el crecimiento de plantas. Esto sugiere un enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de nutrientes.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Arcilla

Las arcillas son materiales compuestos por minerales, estas generalmente se refieren a los minerales filosilicatos con otros minerales que modifican sus propiedades; estos pueden variar dependiendo del porcentaje que posean de sus elementos (oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio), la mayoría de los utilizados son de origen natural, muchas de las arcillas en Guatemala tienen un origen volcánico (Davies et al., 1979; Onchoke et al., 2021), por lo que existen en gran cantidad sobre el suelo, generalmente suelen ser utilizadas en granos muy finos (menores de 4 μm), una de las propiedades por las que son muy útiles, es su plasticidad, la cual se basa en la capacidad de dar forma al material (Guggenheim & Martin, 1995).

Otra de las propiedades por las que son útiles las arcillas, es por el área superficial tan grande que pueden llegar a presentar los granos, la cual la hace atractiva para adsorción y actividades catalíticas en reacciones químicas, otros factores que pueden influenciar o darle un mayor valor a estos materiales, es su geometría, volumen de los poros en el material, la facilidad de difusión, las cuales hacen de estos, atractivos en el área de carga de un analito en específico mediante su activación o funcionalización para tener selectividad y mayor eficiencia, por ello su importancia en la industria de cemento (Suksiripattanapong et al., 2015), cerámica y la agricultura.

Muchas de estas arcillas suelen tener un origen volcánico donde Guatemala ocupa un lugar privilegiado con respecto a la riqueza de este material, las cuales hay de varios tipos, calcita, bentonita, caolín, dolomita, entre otros.

Las arcillas también pueden ser utilizadas como soportes para funcionalización, lo que permite mejorar sus propiedades y ampliar sus aplicaciones. Por ejemplo, la funcionalización de arcillas con compuestos magnéticos puede otorgarles propiedades magnéticas útiles en diversas aplicaciones industriales y ambientales. Estas arcillas funcionalizadas pueden ser empleadas en la adsorción de contaminantes, catálisis y como materiales de soporte en reacciones químicas específicas (Corne, V., et al, 2019; Fernandez, L. et al, s/f).



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Arcillas modificadas

Las arcillas han sido utilizadas como adsorbentes naturales de contaminantes, aprovechando el tamaño pequeño de partícula y su estructura laminar, otros factores que suelen gobernar el comportamiento de las arcillas como adsorbentes son su fuerza iónica, temperatura, pH de las soluciones acuosas que serán tratadas (Tsai et al., 2005). Por la naturaleza química en su superficie, al ser activadas estas pueden permitir ciertas modificaciones para agregar una funcionalidad química para tener selectividad y eficiencia sobre un analito en específico.

En la actualidad existen varias publicaciones relacionadas con arcillas modificadas, algunas ya de uso comercial y otras con potencial para la remoción y/o especiación de contaminantes (He et al., 2014). Las arcillas minerales en general poseen una estructura de láminas donde coexisten silicatos y óxidos de aluminio con diferente disposición geométrica y diferente relación de concentración características a cada tipo de arcilla, en el interior de estas láminas se encuentran cationes metálicos unidos por interacciones con grupos hidroxilos (Lee & Tiwari, 2012), con el adecuado tratamiento químico y físico se pueden agregar compuestos orgánicos sobre la superficie de las arcillas, haciendo uso de su capacidad de intercambio catiónico y/o modificaciones en los grupos funcionales de la superficie, además de la modificación del espacio interlaminar (pudiéndose contraer o expandir para alojar moléculas de diferente tamaño en su interior), su amplia utilización se ha llevado a cabo para la remoción de metales pesados como iones de plomo (Şölener et al., 2008), mercurio, cadmio, cinc (Stathi et al., 2007), cromatos (Warchoń et al., 2006), molibdato (Atia, 2008), nitratos (Xi et al., 2010), arsénico (Z. Li & Bowman, 2001) y también para la remoción de contaminantes emergentes de tipo orgánico como distintos tipos de fenoles (Richards & Bouazza, 2007), antibióticos (Polubesova et al., 2006), colorantes de uso industrial (Jović-Jovičić et al., 2010; Koswojo et al., 2010), disolventes orgánicos (Zhu et al., 2005)

La captura de fosfatos es un tópico de gran importancia y se han realizado algunos estudios al respecto utilizando materiales sintéticos como hidrotalcitas (Kuzawa et al., 2006)



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

o funcionalizaciones de arcilla caolinita con aminas alifáticas para la captación de fosfatos (Unuabonah et al., 2017).

Organoarcillas

El uso intensivo de plaguicidas o fertilizantes en la producción agrícola y otros campos de actividad constituyen una fuente de contaminación en suelos y aguas. Son múltiples las estrategias dirigidas para evitar esta problemática, entre ellas el empleo de absorbentes de minerales de las arcillas inalterados o modificados con cationes orgánicos (De Economía Y Competitividad, 2012).

Los minerales de arcilla sin modificar son absorbentes débiles para todos los contaminantes ambientales orgánicos e inorgánicos debido a su hidrofiliidad, mientras que las modificaciones con compuestos orgánicos mediante la sustitución de cationes intercambiables inorgánicos aumentan la hidrofobicidad, superficie, y carga eléctrica sobre los minerales de arcilla y los hace materiales absorbentes adecuados para una variedad de aplicaciones de remediación ambiental (Nafees & Waseem, 2014).

El término 'organoclays' denota una familia de materiales hidrofóbicos, obtenidos mediante la modificación de arcillas y minerales de arcilla con diversos compuestos orgánicos a través del proceso de intercalación y el injerto de superficie (He et al., 2014).

Este tipo de arcillas modificadas permiten la creación de nuevos materiales y nuevas aplicaciones. El foco principal de la modificación de la superficie de las arcillas es la ciencia de materiales, ya que las "organoclays" son esenciales para desarrollar nanocompuestos poliméricos (He et al., 2014). Además, se utilizan en otras aplicaciones como adsorbentes de contaminantes orgánicos en el suelo, el agua y el aire; agentes de control reológico; pinturas; cosméticos; barniz refractario; fluidos tixotrópicos, etc (De Paiva et al., 2008).

El tipo de arcilla más utilizada actualmente para la modificación orgánica es la montmorillonita, sin embargo, se han realizado estudios donde se han evaluado la intercalación química con hectorita, sepiolita y micas sintéticas. Según su uso comercial se ha catalogado a la montmorillonita como una de las arcillas con mayor potencial para ser



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

modificada por su carácter hidrofílico a organofílico para luego ser utilizada en la formación de nanocompuestos junto a algún polímero (Garzón Malusin, 2015).

Montmorillonita

Entre los minerales de arcilla, las esmectitas, especialmente la montmorillonita, se han utilizado ampliamente para preparar organoarcillas debido a sus excelentes propiedades, tales como alta capacidad de intercambio catiónico, propiedades de adsorción y gran superficie específica. Más allá de la montmorillonita, se han utilizado otros minerales arcillosos, como la hectorita, la fluorohectorita sintética, la sepiollita y las micas sintéticas (De Paiva et al., 2008).

Entre las aplicaciones industriales de las montmorillonitas se puede mencionar su uso como decolorantes de aceites (previamente tratadas con ácidos minerales), como adsorbentes de pesticidas o metales pesados en aguas residuales y como catalizadores heterogéneos para promover reacciones químicas (Vargas-Rodríguez et al., 2008).

La presencia de cationes inorgánicos interlaminares y su posibilidad de intercambio es lo que amplió considerablemente el uso de las montmorillonitas en aplicaciones tecnológicas. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la magnitud que cuantifica la tendencia de las montmorillonitas de sorber especies catiónicas de una solución, y se relaciona con la carga de capa (Gamba, 2017).

En general, el intercambio entre cationes para compensar la carga negativa de las láminas cumple con las siguientes características: (i) es reversible; (ii) el paso limitante de la velocidad es la difusión; (iii) es estequiométrico; y (iv) en la mayoría de los casos prevalece la selectividad de un catión respecto de otro (Gamba, 2017).

La selectividad por algunos cationes respecto a otros se debe a diversos factores: esferas de hidratación de los cationes en la superficie y en la solución, interacciones electrostáticas catión-superficie y catión-catión, interacciones entre las moléculas de agua y la superficie, carácter de polarizabilidad de los cationes, factores entrópicos, etc. En general



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

para las montmorillonitas, los cationes divalentes son preferidos respecto a los monovalentes, y los cationes orgánicos son preferidos respecto a los inorgánicos (Gamba, 2017).

Nanomateriales para remediación

Las tecnologías de nanoremediación implican el uso de NPs (nanopartículas) reactivas para la conversión y la desintoxicación de contaminantes. Los principales mecanismos de remediación por NPs son la catálisis y la reducción química. Además, la adsorción es otro mecanismo de eliminación para las NPs puesto que estas tienen relaciones altas de área-masa y diferentes distribuciones de sitios activos, aumentando la capacidad de adsorción (Alazaiza et al., 2021).

Los nanomateriales pueden clasificarse como naturales o manufacturados. Algunos nanomateriales naturales presentes en la composición de los suelos son: arcilla, organoarcillas, óxido de hierro y materia orgánica (Alazaiza et al., 2021). Actualmente, las organoarcillas son el nanomaterial comercial dominante para la preparación de nanocompuestos poliméricos, representando casi el 70% del volumen utilizado (De Paiva et al., 2008).

Los nanomateriales manufacturados son desarrollados o sintetizados con una propiedad única para mejorar sus aplicaciones industriales o tecnológicas, entre estos podemos mencionar, zeolitas a nanoescala, nanotubos de carbono, óxidos metálicos, nanopartículas bimetálicas (BNPs), enzimas y dióxido de titanio (TiO_2). Los cuales se han desarrollado como nanomateriales para la remediación de contaminantes (Alazaiza et al., 2021).

La nanotecnología ya ha demostrado que puede incidir en la reducción de la contaminación. Un ejemplo es el trabajo realizado por Malato et al., (2002) para fotocatalizar plaguicidas organofosforados usando nanopartículas de dióxido de titanio, para remover hasta $5\mu\text{M}/100\text{ mL}$ de agua del agua de riego. Otro estudio muestra el uso de nanopartículas de carbonato de calcio para precipitar validamicina en cultivos. Últimamente



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

se ha introducido el uso de nanoarcillas o nanocerámicos que poseen la capacidad de retener en su estructura porosa algunos plaguicidas (Marín-Bustamante et al., 2021).

La nanorremediación representa un enfoque innovador para la remediación segura y sostenible de compuestos orgánicos persistentes como plaguicidas, fertilizantes, disolventes clorados, productos químicos bromados o halogenados, sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS) y metales pesados (Ganie et al., 2021).

Aminoácidos

Los aminoácidos son moléculas presentes en todas las proteínas, estas unidades básicas de biomoléculas tienen la particularidad de poseer al menos un grupo ácido carboxílico y un grupo amino, los cuales forman un enlace, denominado enlace peptídico, que permite formar cadenas de estas moléculas, formando así péptidos o estructuras proteicas. La presencia de los grupos funcionales en los aminoácidos les permite tener distintas propiedades ácido-base, dependiendo del medio y los grupos en la cadena lateral denominada usualmente como grupo R.

La habilidad para mantener una carga formal definida, producida por la protonación o desprotonación de los grupos funcionales, permite utilizar de manera selectiva a los aminoácidos. Esta propiedad ha permitido su incorporación en matrices inorgánicas, como las arcillas, donde se establecen equilibrios electrostáticos entre la carga del aminoácido y la carga de la superficie, lo cual permite retener a los aminoácidos en su superficie para su utilización. (Benetoli et al., 2007; Rangel-Rivera et al., 2014).

También se ha reportado su uso para biomateriales, incorporando películas delgadas de quitosano, ácido poligalacturónico e hidroxiapatita, obteniendo resultados preliminares prometedores respecto a la remediación (Katti et al., 2010).



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

6. Planteamiento del problema

En las últimas décadas ha cobrado relevancia la tecnología y técnicas destinadas a disminuir la presencia de contaminación en los recursos hídricos y ecosistemas acuáticos. La actualización de los procesos en materia de agua potable, así como el plan estratégico de UNICEF 2022-2025, establecen acciones para el fortalecimiento de los sistemas de agua y promover el acceso seguro, a mediano y largo plazo, enfatizando el factor de sostenibilidad en las diferentes etapas (UNICEF, 2019; UNICEF, 2022)

A pesar de las múltiples acciones realizadas en los últimos años aún no es posible establecer sistemas apropiados para la reducción de elementos contaminantes provenientes de actividades antropogénicas, para Guatemala se calculan 5000 metros cúbicos/habitante/año de agua, sin embargo este valor se ve opacado por la combinación de contaminación superficial, desechos vertidos y la propia geografía del país, los cálculos resultantes establecen para el departamento de Guatemala un valor de 600 metros cúbicos/habitante/año, además de reportar una alta incidencia de fallecimientos en niños menores de 5 años a causa de enfermedades diarreicas agudas (EDAS) causadas por falta de acceso a agua potabilizada (Cuevas et al., 2014)

El fósforo minado es transformado y convertido en especies fosforadas solubles usadas principalmente en la producción de fertilizantes (Schaum, 2018) diversos estudios confirman que la actividad de mayor impacto hacia los cuerpos de agua proviene de las actividades agrícolas, (Smith et al., 2017; Ouyang et al., 2019) siendo uno de estos contaminantes las especies fosforadas, a pesar de muchas estrategias adoptadas en los últimos años menos del 20% de este elemento es reciclado de forma apropiada, mientras que el resto se considera un contaminante, (Rojas-Rodríguez et al., 2020). Considerando que las concentraciones ligeramente elevadas de este elemento conducen al detrimento sistemático de la calidad del agua, reduciendo la biodiversidad tanto en flora como fauna e incrementa los riesgos para la salud humana (Schaum, 2018) es necesario abordar la contaminación presente en nuestros cuerpos acuáticos.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

De manera particular el lago de Amatitlán cuenta con desequilibrios químicos causados por la presencia excesiva de contaminantes provenientes de las descargas industriales, poblacionales y factores como las deposiciones atmosféricas (Van Tuylen, 2020; Dix et al., 2022) siendo una de las problemáticas actuales el estado de eutrofización con el que cuenta dicho cuerpo acuático, a pesar de las diferentes normativas que han disminuido la carga contaminante, aún presenta altos niveles de eutrofización.

Por lo anterior surge la necesidad de evaluar métodos y enfoques distintos para subsanar las problemáticas ambientales que enfrenta el país, para ello se plantea la utilización de organoarcillas capaces de capturar fósforo en forma de fosfatos y posteriormente liberarlo para su reutilización, esto para establecer las bases de una línea de investigación centrada en el desarrollo de fertilizantes en un proceso circular que conduzca a un sistema de reciclaje de nutrientes a futuro.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

7. Preguntas de investigación

¿Las organoarcillas pueden disminuir la concentración de fósforo en una matriz acuosa, al existir otros compuestos químicos presentes?

¿Es posible utilizar las organoarcillas como agentes remediadores de fosfatos en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán?

¿Existe una disminución en la capacidad de adsorción/desorción de las organoarcillas luego de al menos 3 ciclos de adsorción/desorción?

¿Es posible afinar el modelo matemático, para mejorar la predicción de materiales remediadores capaces de ser utilizados en muestras de agua simuladas en laboratorio?



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8. Objetivos

Objetivo General

1. Analizar la viabilidad de las organoarcillas compuestas por bentonita y aminoácidos (lisina, histidina y glicina) como posibles agentes de remediación de fosfatos, en muestras provenientes del lago de Amatitlán.

Objetivos específicos

1. Evaluar la capacidad de adsorción/desorción de la organoarcilla compuesta por bentonita y lisina 2 milimolar, en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán.
2. Evaluar la capacidad de adsorción/desorción de la organoarcilla compuesta por bentonita e histidina 2 milimolar, en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán.
3. Evaluar la capacidad de adsorción/desorción de la organoarcilla compuesta por bentonita y glicina 2 milimolar, en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán.
4. Caracterizar el comportamiento cinético de las organoarcilla mediante al menos 3 ciclos de adsorción/desorción en muestras de agua.

9. Hipótesis (si aplica)

H1: Las organoarcillas sintetizadas son capaces de adsorber fósforo en solución, en una matriz acuosa que presenta contaminantes adicionales.

H0: Las organoarcillas sintetizadas no son capaces de adsorber fósforo en solución, en una matriz acuosa que presenta contaminantes adicionales.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

10. Método

10.1. Tipo de investigación.

B). Investigación aplicada: si la investigación generó nuevos conocimientos, pero está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico; los resultados son aplicables en productos, operaciones, métodos o sistemas.

10.2. Enfoque y alcance de la investigación.

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, pues el comportamiento de adsorción evaluado se expresa en términos numéricos, además del tratamiento estadístico para determinar la significancia de dicho comportamiento, datos que sustentaran el desarrollo del modelo matemático propuesto

10.3. Diseño de la investigación.

Se utilizó un enfoque cuantitativo experimental, diseñando una matriz de muestras de organoarcillas partiendo del estudio de Estrada y colaboradores (Estrada y colaboradores, esto permitió delimitar el número de organorcillas a tres, las cuales fueron evaluadas para la remoción de fósforo en una muestra de agua obtenida del lago de Amatitlán.

Siendo las variables de estudio el aminoácido anclado a la organoarcilla, realizando 5 repeticiones de cada lectura para representatividad estadística de los resultados.

10.4. Población, muestra y muestreo.

Se obtuvieron muestras de agua provenientes del lago de Amatitlán, las cuales fueron en primera instancia caracterizadas fisicoquímicamente (pH, conductividad, salinidad, turbidez y contenido de fósforo soluble), estos parámetros permitieron establecer una línea base para evaluar el efecto que las organoarcillas tuvieron en las muestras de agua respecto a las concentraciones de fósforo en disolución.

Se realizaron análisis de adsorción/desorción empleando las organoarcillas previamente sintetizadas en las muestras de agua, estableciendo la capacidad de adsorción de fosfatos en cada una, la cantidad de fósforo adsorbido se determinó por diferencia entre la



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

concentración de fosfatos previa al contacto con organoarcillas y posterior al proceso de adsorción, además de un blanco de arcillas como control, se evaluó la desorción en un pH alcalino que permite la disociación de los iones fosfatos debido a la ionización y diferencia de cargas. En cada etapa del proceso se determinó la concentración de fósforo en las soluciones, permitiendo así cuantificar cuánto ha sido retenido por las organoarcillas, se utilizó un método espectroscópico UV/Vis así como curvas de calibración apropiadas para el intervalo de concentraciones presente en las muestras de agua.

10.5. Técnicas

Activación de Arcilla

Materiales

- Arcilla bentonita
- Agua ultrapura
- Papel filtro
- Vasos de precipitado de 500 mL
- Probeta de 100 mL
- Erlenmeyer de 500 mL
- Mortero y pistilo
- Baño de ultrasonidos
- Balanza analítica
- Horno de secado

Método basado en (Pérez-Rodríguez et al., 2006; Tyagi et al., 2006)

Se realizó una suspensión de arcilla empleando una relación de 1.5 gramos de arcilla por cada 10 mL de agua. Esta dispersión se sonicó por un tiempo de 1 hora, tras lo cual fue



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

dejada en reposo durante 1 hora, para separar la fase acuosa de la suspensión. Se removió la fase acuosa y se dejó la arcilla activada mediante ultrasonidos en un horno a 120° C, durante un tiempo mínimo de 6 horas. Posteriormente se trasladó a un mortero donde fue pulverizada. Y llevada nuevamente a secar a una temperatura de 90° C por 24 horas.

Preparación de aminoácidos

Materiales

- Lisina
- Histidina
- Glicina
- Agua destilada
- Balones aforados
- Balanza analítica

Método basado en Benetoli et al., (2007)

Los aminoácidos evaluados fueron disueltos en agua destilada, para obtener una solución 0.1 milimolar.

Organoarcillas

Materiales

- Arcilla sonicada
- Solución de aminoácidos
- Ninhidrina
- Etanol absoluto
- Cloruro de estaño



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Ácido cítrico
- Citrato de sodio
- Agua desionizada
- Ácido Clorhídrico
- Balones aforados de 50 mL
- Tubos de ensayo
- Vasos de precipitado de 250 mL
- Erlenmeyer de 250 mL
- Agitadores magnéticos
- Planchas de agitación
- Balanza analítica
- Espectrofotómetro

Método basado en Benetoli et al., (2007) y Unuabonah et al., (2017)

La arcilla sonicada, así como un blanco sin sonicación, fue colocada en un Erlenmeyer de 250 mL, empleado una relación arcilla:aminoácidos 35:65, en gramos y mililitros respectivamente. Esta dispersión se mantuvo en agitación durante 24 horas.

La arcilla funcionalizada con aminoácidos fue centrifugada a 2400 RPM (aislando el gel obtenido del sobrenadante el cual se utilizará para determinar la cantidad de aminoácidos retenidos), el gel obtenido fue llevado a un horno de secado a 105° C durante 24 horas para eliminar el agua residual.

Las organoarcillas obtenidas fueron lavadas hasta un pH neutro con agua destilada y posteriormente secadas a 50° C.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Aminoácidos residuales basado en (Sun et al., 2006)

Se determinó mediante espectrofotometría UV/Vis, empleando el método de ninhidrina. Una muestra del sobrenadante de la funcionalización de la arcilla fue mezclada con el reactivo de ninhidrina, para determinar su absorbancia en la región visible, la concentración se determinó empleando una curva de calibración haciendo uso de una serie de muestras de aminoácidos y ninhidrina validada para el rango de concentraciones utilizado en el experimento, para determinar la efectividad del proceso de funcionalización.

Se tomó 1 ml de las muestras y de un blanco carente de aminoácidos, a cada uno se añadieron 2 ml del reactivo de ninhidrina, esto se calentó en un baño maría (en ebullición) por 15 minutos, luego fueron enfriados en un baño de hielo y se adicionaron 2 ml de etanol al 50%, al desarrollarse la coloración violeta, se cuantificó la absorbancia a 575 nm.

Ninhidrina: 1.0 g de ninhidrina en 20 ml de etanol absoluto y 0.04 g de cloruro de estaño en 25 ml de una solución buffer de citrato (pH 5) o buffer de acetato (pH 6).

Buffer de citrato: se prepara añadiendo 20 ml de ácido cítrico (0.05 g de ácido cítrico en 50 ml de agua destilada) y 29.5 ml de citrato de sodio (2.94 g de citrato de sodio en 100 ml de agua destilada).

Adsorción de fosfatos

Materiales

- Organoarcillas
- Fosfato monoácido de potasio (K_2HPO_4)
- Molibdato de amonio tetrahidratado ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)
- Metavanadato de amonio (NH_4VO_3)
- Ácido Clorhídrico (concentrado) (HCl)
- NaOH



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Muestras de agua recolectadas
- Agua desmineralizada
- Beakers de 250 mL
- Erlenmeyer de 500 mL
- Tubos de ensayo
- Balones aforados de 25 mL
- Balón aforado de 100 mL
- Celda de vidrio
- Balanza analítica
- Espectrofotómetro UV/Vis

Método Basado en Unuabonah et al., (2017) y Standard Methods 4500-P Phosphorus, (2018)

El proceso de adsorción se llevó a cabo con las 3 organoarcillas obtenidas, además de un blanco sin funcionalizar, se utilizaron muestras de agua previamente caracterizadas para conocer la concentración de fósforo y pH en ellas.

Se mantuvieron 100 mL de agua en presencia de 2 gramos de organoarcillas en agitación durante un tiempo de 2 horas. Transcurrido este intervalo de tiempo se tomaron 0.5 mL de la solución, se diluyó en 4.5 mL de agua destilada y fueron filtrados. A 3.5 mL del filtrado serán añadidos 1 mL de reactivo de color y 1 mL de agua destilada, se determinó la absorbancia en un espectrofotómetro UV/Vis a 420 nm, la concentración se determinó empleando una curva de calibración de fosfatos elaborada con fosfato monoácido de potasio en un intervalo adecuado para las muestras de agua.

Desorción de fósforo: las pruebas de desorción se realizaron a un pH de 10, tomando 2 gramos de arcilla funcionalizada, la cual previamente ha sido sometida al proceso de



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

adsorción, esta se dispersó en 100 ml de agua destilada, donde se ajustó el pH mediante la adición de hidróxido de sodio se mantuvo en agitación durante 24 horas, con la finalidad de cuantificar la liberación de fósforo, en función del tiempo, en un medio alcalino que promueva la disociación de las especies cargadas. Finalmente se cuantificó el fósforo liberado mediante el método de vanadato/molibdato.

Las organoarcillas fueron sometidas a un proceso iterativo de adsorción desorción, para caracterizar su comportamiento y reutilización para la captura y liberación de fósforo.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

10.6. Resumen de las variables o unidades de análisis

Tabla 1

Objetivos, variables, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Evaluar la capacidad de adsorción/desorción de la organoarcilla compuesta por bentonita y lisina 2 milimolar, en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán.	Lisina retenida; Fósforo retenido/liberado	Espectrofotómetro UV/Vis Espectroscopio	Unidades de absorbancia Concentraciones molares retenidas/liberadas
Evaluar la capacidad de adsorción/desorción de la organoarcilla compuesta por bentonita e histidina 2 milimolar, en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán.	Histidina retenida; Fósforo retenido/liberado	Espectrofotómetro UV/Vis	Unidades de absorbancia Concentraciones molares retenidas/liberadas.
Evaluar la capacidad de adsorción/desorción de la organoarcilla compuesta por	Glicina retenida; Fósforo retenido/liberado	Espectrofotómetro UV/Vis	Unidades de absorbancia Concentraciones molares



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
bentonita y glicina 2 milimolar, en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán.			retenidas/liberadas
Caracterizar el comportamiento cinético de las organoarcilla mediante al menos 3 ciclos de adsorción/desorción en muestras de agua.	el Fósforo retenido y liberado, a cada ciclo de análisis	Espectrofotómetro UV/Vis	Unidades de absorbancia Concentraciones molares retenidas/liberadas

10.7. Procesamiento y análisis de la información.

En el presente estudio, se llevó a cabo un procesamiento y análisis de la información recolectada, siguiendo una metodología de investigación cuantitativa.

Para el análisis de los aminoácidos y el fósforo, se emplearon métodos de espectrofotometría. Su utilización se justifica por su sensibilidad y precisión en la cuantificación de compuestos en solución al utilizar curvas de calibración para relacionar las absorbancias medidas con las concentraciones de aminoácidos funcionalizados y el fósforo retenido.

En cuanto a los procedimientos estadísticos, se utilizaron diferentes pruebas de análisis dentro de los cuales se incluyen las pruebas de hipótesis, correlación, pruebas comparativas, así como el tratamiento de los datos mediante el modelo matemático generado en la fase 1 que describe el comportamiento de organoarcillas empleando técnicas



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

informáticas para este último caso, considerando un mínimo de 5 repeticiones para cada muestra de organoarcilla, reportando los valores promedio para cada caso.

Pruebas de hipótesis: Se utilizaron pruebas de hipótesis para determinar si existen diferencias significativas en la adsorción/desorción de los aminoácidos y el fósforo entre las diferentes organoarcillas y el blanco. Estas pruebas permitieron establecer el nivel de significancia estadística y evaluar la confiabilidad de las estimaciones realizadas.

11. Aspectos éticos y legales

El tipo de investigación no requiere la consideración de un comité ético y/o legal, sin embargo, la fase de carácter ambiental (muestreo de agua) se realizó en coordinación con la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Amatitlán –AMSA–, considerando las disposiciones adecuadas para el caso.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

12. Resultados y discusión

La captura de nutrientes en disolución acuosa ha sido en los últimos años sujeto de estudios intensivos, debido a la creciente necesidad de impulsar sistemas y mecanismos de cultivo y control medioambiental de mayor eficiencia, investigaciones recientes han señalado a materiales arcillosos modificados (modified clay minerals -mCMs- por sus siglas en inglés) como materiales de alta capacidad, en particular su utilización en la captura de fosfatos ha sido evaluada recientemente por Bao y colaboradores, encontrando resultados favorables para arcillas modificadas mediante diversas técnicas (Bao et al., 2024)

El estudio presentado en esta investigación, toma como base los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto de investigación titulado “Evaluación de adsorción-desorción de fósforo empleando arcillas modificadas con aminoácidos y desarrollo de modelo matemático que describa su comportamiento” ejecutado gracias al apoyo de la Dirección General de Investigación -DIGI- y la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde se encontraron resultados compatibles con la utilización de organoarcillas para la captura de fosfatos.

Utilizando agua procedente del lago de Amatitlán como fuente de fósforo, pues dicho cuerpo acuático presenta diversas alteraciones en su composición química (principalmente en los valores de Fósforo y Nitrógeno) derivadas de la carga excesiva proveniente de afluentes que lo alimentan según lo reportado por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-, haciéndolo un candidato ideal para la evaluación de captura de nutrientes.

Considerando lo anterior se prepararon 3 diferentes organoarcillas funcionalizando bentonita con los aminoácidos: glicina, histidina y lisina. haciendo uso del método reportado por Estrada y colaboradores para la síntesis de organoarcillas mediante activación ultrasónica (Estrada, E., Chanta, W. y Rivera, R., 2021). Las cuales fueron utilizadas para evaluar la captura reversible de fósforo en una muestra de agua del lago de Amatitlán.

El lago de Amatitlán ubicado en el municipio de Amatitlán, departamento de Guatemala, constituye un recurso vital para los pobladores actuales y las futuras



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

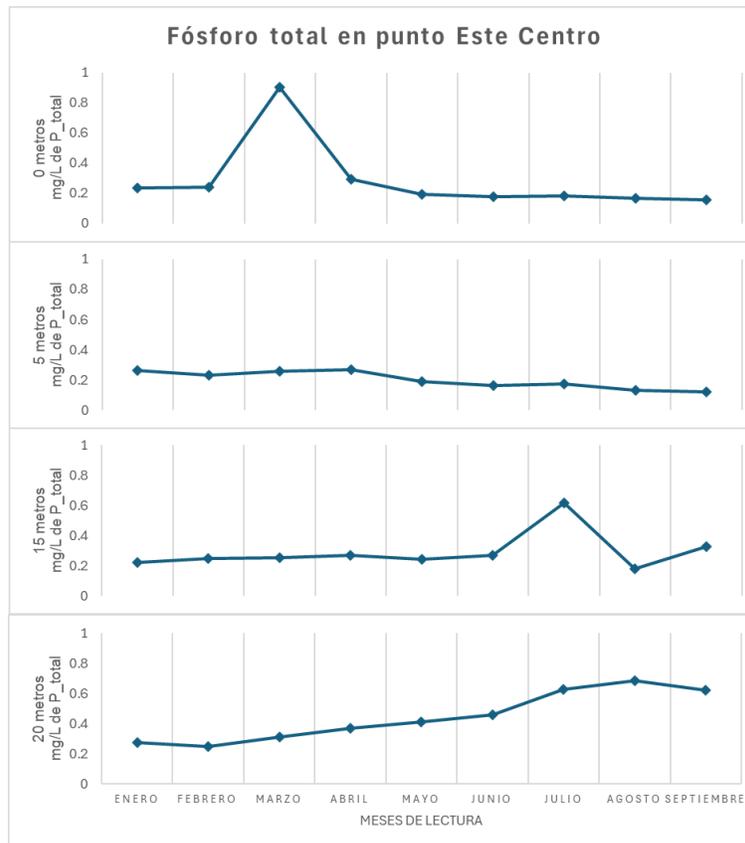
generaciones, sin embargo diversas prácticas y el aumento excesivo en actividades industriales y la población han provocado un estado de deterioro, lo cual realza la importancia de afrontar el problema desde diversos enfoques, se reporta que desde el año 2007 se mantiene un análisis constante de la calidad del agua del lago (AMSA, 2022), mediante un monitoreo permanente que ha permitido generar una biblioteca de datos de alto valor la cual reporta diversos parámetros fisicoquímicos, en análisis de esta data permitió evidenciar variaciones entre temporadas secas y lluviosas así como diferentes regiones con variación en su composición química, las regiones más limpias son aquellas alejadas de desembocaduras de ríos, mientras que las más sobrecargadas se ubican en la desembocadura del río Villalobos y el inicio del río Michatoya.

Se evidencia de igual forma una variación en las concentraciones promedio a diferentes profundidades, siendo este un factor importante al considerar su reciclaje como nutrientes, la Figura 1 a 3 presentan el análisis de los datos de monitoreo de fosforo total a diferentes profundidades, en todos los casos se supera el limite permitido de 0.1 mg/L, y se evidencia la estratificación del contenido de fosfatos, lo cual se interrelaciona con la biodisponibilidad de este y la proliferación de especies que se aprovechan de este como nutriente, a expensas de alterar el ecosistema general y causar un detrimento a largo plazo.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 1

Fosforo total en punto Este Centro



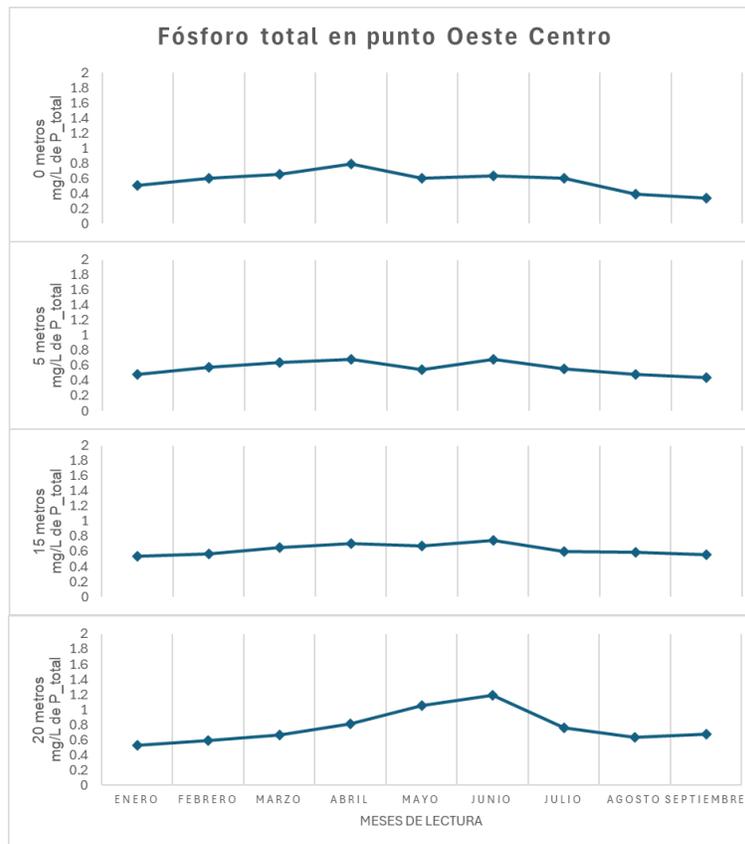
La Figura 1 representa la concentración de Fosforo total en el punto Este centro durante un periodo de 9 meses

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán - AMSA-

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 2

Fosforo total en punto Oeste Centro



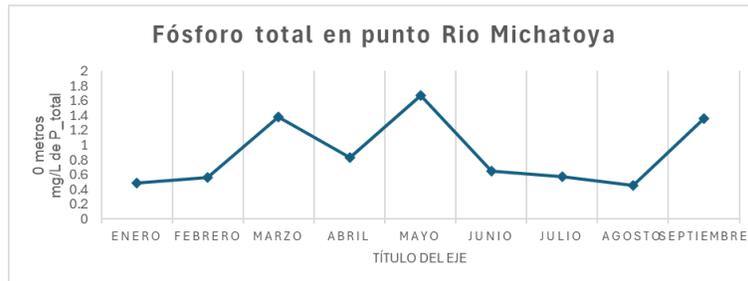
La Figura 2 representa la concentración de Fosforo total en el punto Oeste centro durante un periodo de 9 meses

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán - AMSA-

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 3

Fosforo total en punto Rio Michatoya



La Figura 3 representa la concentración de Fosforo total en el punto Rio Michatoya durante un periodo de 9 meses

Fuente: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán - AMSA-

Por estas razones y en coordinación con personal de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y el Lago de Amatitlán -AMSA-, se realizó un muestreo para establecer una línea base del estado fisicoquímico general del lago, monitoreando 4 puntos estratégicos, que permitieron evidenciar las diversas variaciones en las regiones del lago, respecto a los parámetros fisicoquímicos reportados en esta investigación, es importante resaltar que las dinámicas de adsorción/liberación de fosforo son altamente influenciadas por las demás especies químicas presentes, por lo que su caracterización conlleva la cuantificación de los diferentes parámetros en la muestra de estudio.

Los puntos de muestreo se reportan en la Figura 4, mediante un mapa que indica el sitio de muestreo, así como las coordenadas asociadas, es importante resaltar que dichas lecturas se realizaron durante el mes de octubre, que se reporta como temporada de altas lluvias, lo cual influye en las concentraciones de los parámetros analizados, siendo más bajas en temporada lluviosa que en temporada seca.

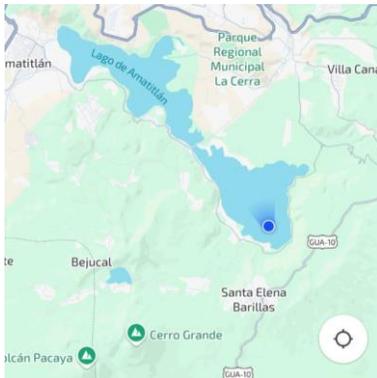
Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 4

Ubicación de puntos de muestreo del lago de Amatitlán

Figura 4a

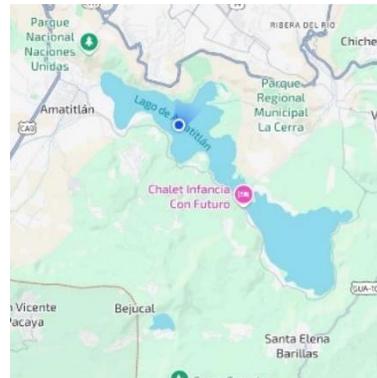
Punto “Este centro”



La figura 4a presenta el punto de muestreo con coordenadas: “14.4285142, - 90.5421237”

Figura 4b

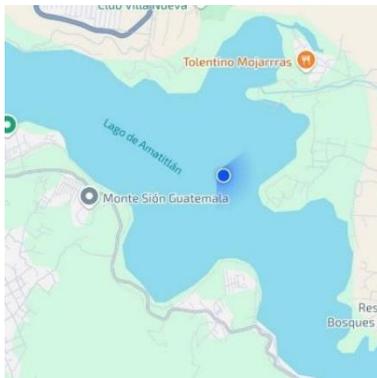
Punto “Oeste centro”



La figura 4b presenta el punto de muestreo con coordenadas: “14.4744976, - 90.5858038”

Figura 4c

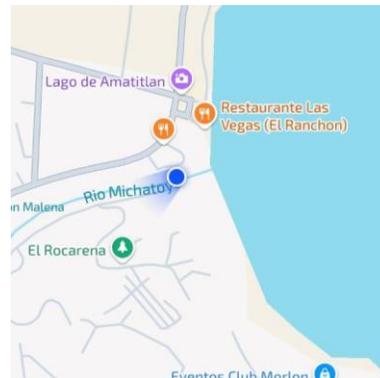
Punto “Desembocadura de Villalobos”



La figura 4c presenta el punto de muestreo con coordenadas: “14.4734834, - 90.5787949”

Figura 4d

Punto “Michatoya”



La figura 4d presenta el punto de muestreo con coordenadas: “14.4866980, - 90.6117317”

La Figura 4 presenta los 4 puntos de muestreo monitoreados durante la fase de muestreo del proyecto



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Los parámetros analizados in situ se reportan en la Tabla 2, encontrándose que los puntos de mayor contaminación son la desembocadura del río Villalobos y el inicio del río Michatoya, valores consistentes con los reportados por Oliva y colaboradores quienes durante el año 2020 realizaron un trabajo de investigación respecto a la determinación de microplásticos en el lago de Amatitlán (Oliva et al, 2021), reportando de igual forma parámetros fisicoquímicos consistentes con los obtenidos durante el muestreo de esta investigación.

Tabla 2

Parámetros fisicoquímicos tomados en los puntos de muestreo del lago de Amatitlán.

Parámetro (unidades)	Valor			
	Este centro	Oeste centro	Desembocadura Villalobos	Michatoya
pH	9.41	8.48	8.13	8.69
Temperatura (°C)	24.40	27.08	26.71	26.30
Conductividad eléctrica (µS/cm)	591.9	594.0	604.6	591.6
Salinidad (ppt)	0.27	0.27	0.28	0.27
Oxígeno disuelto (mg/L)	11.40	8.05	4.57	10.69
Saturación de oxígeno disuelto (%)	163.9	116.8	65.9	153.0
Turbiedad (NTU)	23.3	12.3	11.5	12.7
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.06	0.17	0.22	0.17
NH ₃ total (mg/L)	0.16	0.20	0.24	0.22
Clorofila (µg/L)	17.89	31.11	29.73	52.45
Potencial de óxido-reducción (mVORP)	62.2	72.8	84.3	82.5
Sólidos disueltos totales (ppm)	234	240	244	239

La Tabla 2 presenta los parámetros fisicoquímicos de los 4 puntos de muestreo analizados, cuantificados mediante sondas multiparamétricas.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

La Tabla 2 presenta los valores reportados por la sonda multiparámetros utilizada durante el monitoreo en el lago de Amatitlán, realizado en fecha 16 de octubre de 2024 en coordinación con personal de AMSA, empleando sondas multiparamétricas para la cuantificación de valores, es importante resaltar que diversas investigaciones reportan que el manejo de parámetros químicos en cuerpos acuáticos está sujeto a un balance de vital importancia, lo cual resalta la necesidad de encontrar estrategias efectivas y características para cada cuerpo de agua analizado, y considerar niveles de descarga, posibles estrategias de remediación y desarrollar tecnologías eficaces (Boratto et al., 2024; Luo et al., 2024).

En la Tabla 3 se presenta un parámetro de vital importancia tanto para el estudio presentado, como para la salud del lago en general. Los fosfatos son comúnmente uno de los nutrientes limitantes en lagos para el crecimiento de diversos organismos, estando vinculados de manera directa con los niveles de eutrofización donde ha pasado de ser un nutriente a un contaminante (Yan et al., 2016), los valores reportados en la Tabla 3 permiten explicar el estado del lago observado, pues el punto con menor cantidad de fosfatos presentaba características visuales distintas al resto, mientras que los puntos de mayor concentración de fosfatos, presentaban una mayor concentración de algas y olor característico.

Los valores reportados presentan consistencia con los estudios de Oliva y colaboradores (2021) y el estudio de Van Tuylen (2020) quienes evaluaron bajo enfoques distintos el estado fisicoquímico del lago de Amatitlán.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 3

Determinación de fósforo en forma de ortofosfatos

Muestra	Absorbancia (abs)	Resultado (ppm)
Este centro	0.0279	0.0478
Oeste centro	0.1320	0.2260
Desembocadura Villalobos	0.1357	0.2383
Michatoya	0.1294	0.2216

Determinación inicial de fósforo en forma de ortofosfatos realizada en cooperación con el departamento de Fisicoquímica de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y el Lago de Amatitlán -AMSA-

Con base en los resultados obtenidos en la Tabla 3 se realizaron los ajustes necesarios en las curvas de calibración para el intervalo de lectura apropiado en las muestras de agua, seleccionando como fuente de agua, la muestra proveniente del río Michatoya pues presenta valores altos de fosfatos, especies nitrogenadas, además de ser un punto de monitoreo de relativa accesibilidad, lo cual hace que el estudio pueda ser monitoreado con mayor practicidad, pues los valores reportados en este punto permanecen con mayor consistencia, según los datos reportados por AMSA.

La Tabla 4 presenta el estado inicial de la muestra de fosfatos analizada, empleando un método de vanadato/molibdato para la cuantificación de fósforo se reporta la concentración inicial de la muestra de agua, y la concentración final de fosfatos presentes, estos resultados se complementan con la Tabla 4 donde se presentan los miligramos de fósforo adsorbido y un porcentaje de captura, encontrándose que la mejor organoarcilla para la captura de fósforo en agua proveniente del lago de Amatitlán corresponde a la funcionalizada con el aminoácido glicina, seguida de la organoarcilla con lisina y finalmente



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

histidina, los 3 casos presentan valores semejantes para materiales arcillosos modificados, como el caso de Peña y colaboradores quienes en 2020 reportaron una modificación de arcillas con iones hierro y magnesio encontrado porcentajes de captura en el rango de 30% (Peña et al., 2020)

Tabla 4

Captura de fosfatos en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán

Organoarcilla	Concentración n (ppm)**	Concentración inicial final (ppm)**	Desviación estándar (s)
Arcilla s/t*		0.2146	0.002
Orga-gly	0.2289	0.1477	0.003
Orga-hys		0.1601	0.001
Orga-lys		0.1561	0.002

*Arcilla s/t: arcilla sin tratamiento como valor de control.

**Las concentraciones se expresan en partes por millón, considerando ortofosfatos presentes en la muestra de agua, antes y después de estar en contacto con las organoarcillas.

Los valores reportados en la Tabla 5 presentan el promedio de 5 repeticiones y la desviación estándar asociada, expresando miligramos de fósforo capturado por cada gramo de organoarcilla evaluado, manteniendo una relación de 1 gramo por cada 50 ml de agua, se presenta como parámetro comparativo la arcilla s/t, que corresponde a la arcilla sin tratamiento, reportando para esta un 6.24 % de captura.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 5

Captura de fosfatos por parte de organoarcillas

Organoarcilla	miligramos de fósforo capturado (mg)	Porcentaje de captura (%)	Desviación de estándar (s)
Arcilla s/t	0.00143	6.24	0.002
Orga-gly	0.00812	35.48	0.003
Orga-hys	0.00688	30.06	0.001
Orga-lys	0.00728	31.81	0.002

Se expresan los miligramos capturados de fósforo por cada gramo de organoarcilla evaluada, de igual forma se reporta un porcentaje de captura de fósforo, durante el primer ciclo de adsorción.

Las organoarcillas sintetizadas fueron evaluadas de manera cinética a lo largo de 3 ciclos de adsorción y liberación de fosfatos, con el objetivo de evaluar la reutilización de estas como una matriz de regeneración de fosfatos, resultados de experimentaciones previas indican que el decaimiento en la actividad de adsorción/liberación se evidencian a partir del 2do ciclo (Estrada, E., Chanta, W. y Rivera, R., 2021).

La Tabla 6 presenta los porcentajes de adsorción y liberación para cada uno de los ciclos evaluados, se determinó que el rango de adsorción en el primer ciclo se mantiene en el rango de 30%, el cual decae en cada ciclo, este comportamiento puede evidenciarse en la Figura 2 que presenta los porcentajes en cada ciclo, observándose un comportamiento similar en las 3 organoarcillas sintetizadas.

Por otra parte los resultados de liberación presentan un panorama alentador, pues estudios similares como el de Peña y colaboradores (2020), presentan liberaciones en el rango de 20%, lo cual vuelve a las arcillas modificadas con estructuras inorgánicas poco compatibles con la reutilización, mientras que las modificaciones con moléculas orgánicas como los aminoácidos presentan una interacción de menor fuerza entre los fosfatos y las

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

organoarcillas, este comportamiento fue evidenciado y constituye una base importante para el estudio, en la fase de experimentación previa, donde los resultados de termogravimetría y difracción de rayos X indican una interacción principalmente electrostática y pocas variaciones en las fases mineralógicas, lo que indica una mayor reversibilidad en la captura de fósforo.

Tabla 6

Cinética de adsorción/liberación de fósforo

Muestra	inicial (%) *	Ciclo 1				Ciclo 2				Ciclo 3			
		Ads	s	Lib	s	Ads	s	Lib	s	Ads	s	Lib	s
Orga-gly		35.48	0.003	88.21	0.092	34.37	0.112	80.30	0.064	30.12	0.119	68.56	0.158
Orga-hys	100	30.06	0.001	78.83	0.079	29.85	0.062	63.52	0.157	25.65	0.109	58.72	0.074
Orga-lys		31.81	0.002	92.93	0.058	30.26	0.118	85.96	0.074	26.35	0.085	68.12	0.061

* La concentración inicial de ortofosfatos se consideró como 100% para la evaluación de los ciclos de adsorción/liberación, con la finalidad de expresar porcentajes de captura y liberación.

Ads: hace referencia a la adsorción expresada en porcentaje (%), indica que porcentaje de los fosfatos originales fueron capturados por la arcilla

Lib: hace referencia a la liberación expresada como un porcentaje (%) del total adsorbido, en la fase ads correspondiente.

s: indica la desviación estándar asociada al valor reportado, considerando 5 réplicas por cada experimentación.

La Tabla 6 presenta los 3 ciclos de adsorción/liberación evaluados, en cada ciclo se reporta, el promedio de las lecturas, expresadas como un porcentaje de adsorción y liberación, así como la desviación estándar asociada.

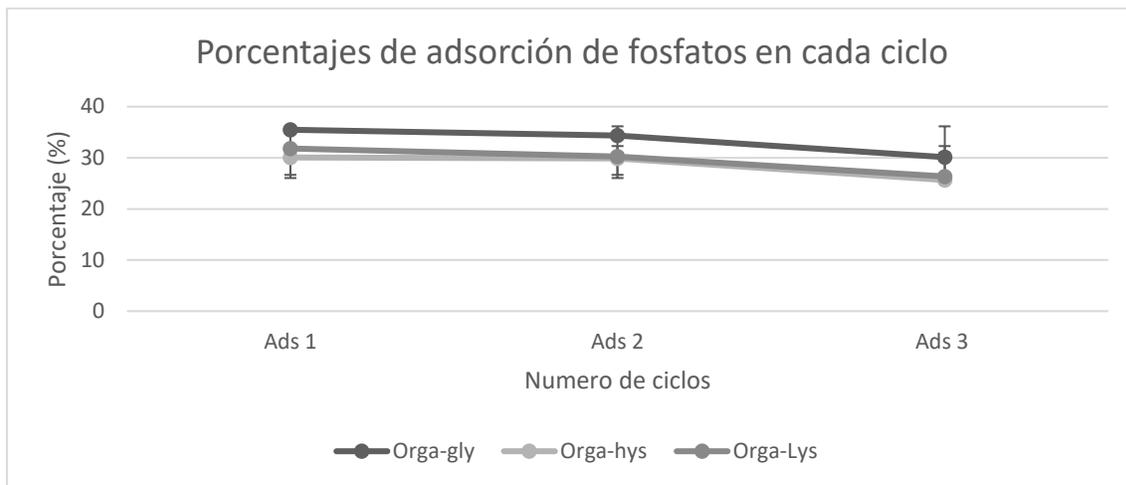
La Figura 5 y 6 presentan la adsorción y liberación respectivamente es importante notar que la liberación varía de manera más pronunciada que la captura, indicando que los sitios de unión de fósforo en las organoarcillas, posiblemente se encuentren cada vez más “ocupados” (Chang et al., 2017; Guimarães & Lima Neto, 2023; Y. Li et al., 2023), lo cual

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

indica que otras especies químicas pueden hacer uso de las organoarcillas como soporte para su transporte, lo cual puede dar lugar a diferentes materiales que permitan regenerar nutrientes y/o eliminar contaminantes de cuerpos acuáticos.

Figura 5

Gráfico de adsorción de fosfatos.

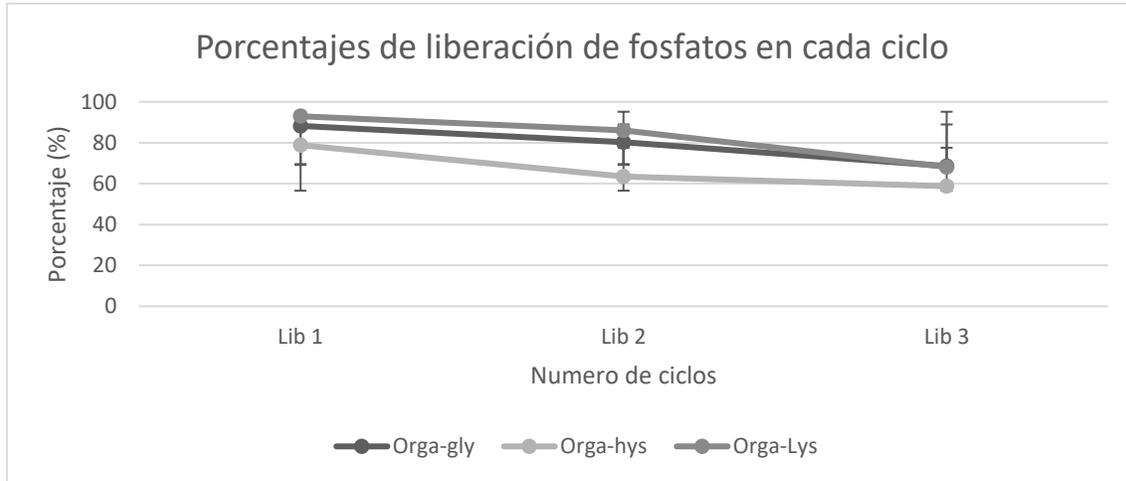


El gráfico presenta la variación en las cantidades de fósforo adsorbidas en cada ciclo de captura.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 6

Gráfico de liberación de fosfatos.



El gráfico presenta la variación en el porcentaje de liberación (una liberación de 100% indicaría que todo el fósforo capturado fue liberado).

La contaminación de cuerpos hídricos en Guatemala va cada vez en aumento, y es uno de los más grandes problemas de la sociedad y con mayor trascendencia por sus implicaciones directas sobre la vida. Uno de los principales ejemplos es la contaminación de uno de los cuerpos de agua dentro del área metropolitana de la Ciudad de Guatemala, el Lago de Amatitlán, la destrucción de éste es un fenómeno antrópico que crece aceleradamente, ya que este cuerpo lacustre recibe aguas residuales que producen áreas urbanas y rurales de los 14 municipios que conforman la Cuenca del lago, y en su mayoría la contaminación es proveniente de actividades agrícolas, comerciales, industriales y domiciliarias. (Olayo & Peláez Sánchez, 2015)

El fósforo es un componente común de los fertilizantes agrícolas, el estiércol y los desechos orgánicos en las aguas residuales y los efluentes industriales. Es un elemento esencial para la vida vegetal, pero cuando hay demasiado fósforo en el agua, puede acelerar la eutrofización (reducción del oxígeno disuelto en los cuerpos de agua causada por un



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

aumento de los nutrientes minerales y orgánicos) de los ríos y lagos (Biswas Chowdhury & Zhang, 2021; Yan et al., 2016)

Los valores encontrados para la liberación de fósforo por parte de las organoarcillas sintetizadas presentan una alta compatibilidad con sistemas de cultivo, pues las concentraciones de liberación superan el 60% sin estimulación externa (requerimientos de plantas), esto combinado con el efecto beneficioso de la aplicación de aminoácidos a sistemas de cultivos, presenta un punto de partida apropiado para investigaciones agrícolas/químicas que hagan uso de estos materiales para mejorar la producción de cultivos.

Esto fue analizado mediante el estudio cinético de liberación de fosfatos, una muestra de organoarcillas (Orga-Gly) cargada de fosfatos a una concentración de 30 mg/g +/- 1.3 fue evaluada en una solución de pH y conductividad eléctrica controlada (pH: 6.5, CE: 2.9 mS/cm), esta se mantuvo en agitación durante un periodo de 24 horas realizando lecturas periódicas durante este tiempo, los resultados de liberación se reportan en la Tabla 7.

Tabla 7

Cinética de liberación controlada de fósforo

Muestra	Tiempo				
	2 horas	4 horas	12 horas	18 horas	24 horas
Orga-gly	8.58 mg	12.57 mg	20.03 mg	23.1 mg	25.13 mg

La tabla 7 presenta los miligramos (mg) liberados durante el estudio cinético de la organoarcilla funcionalizada con el aminoácido glicina a lo largo de un periodo de 24 horas

Dentro de los resultados evidenciados durante la experimentación surge la viabilidad y recomendación de realizar cultivos de tomate y solanáceas similares en sistemas hidropónicos incluyendo organoarcillas como sustrato, además de expandirse a otros cultivos pues su bajo costo de adquisición y poca preparación para la captura de nutrientes las hace apropiadas a diversos sistemas de cultivos eficientes.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

13. Propiedad intelectual

La fase actual del proyecto no contempla ninguna gestión de propiedad intelectual, sin embargo, futuras aplicaciones de las organoarcilla pueden aplicarse a la fabricación de productos de comercialización, al validar su utilización en sistemas de cultivos o como fuente de nutrientes para diferentes aplicaciones.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

14. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 8

Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos	Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)
Organoarce illas reversible s	Instituciones académicas (Universidad de San Carlos de Guatemala; Universidad del Valle de Guatemala); agricultores, entidades de gobierno (AMSA)	30	Estudiantes, investigadores y docentes de áreas de química, cinética, agronomía, cuyos estudios se centren en captura de nutrientes/contaminantes	Línea de investigación de materiales de captura reversible de nutrientes/contaminantes como estrategia de remediación del medio ambiente	Instituciones académicas (Universidad de San Carlos de Guatemala; Universidad del Valle de Guatemala, agricultores, entidades de gobierno (AMSA)
Liberación de fosfatos	Instituciones académicas (Universidad de San Carlos de	100	Estudiantes, investigadores y docentes de áreas de química,	Metodologías de investigación para la síntesis de	Entidades académicas, agricultores, entidades de



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos	Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)
recuperados	Guatemala; Universidad del Valle de Guatemala); agricultores		cinética, agronomía, cuyos estudios se centren en captura y liberación de nutrientes	nanomateriales con actividad de adsorción/liberación de fosfatos a partir de muestras de agua.	gobierno relacionadas a temas agroindustriales



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

15. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Tabla 9

Estrategia de divulgación y difusión de los resultados

	Sí	No
Presentación TV		X
Entrevistas radiales		X
Podcast		X
Entrevista DIGI		X
Recursos audiovisuales		X
Congresos científicos nacionales o internacionales	X	
Talleres		X
Publicación de libro		X
Publicación de artículo científico		X
Divulgación por redes sociales institucionales		X
Presentación pública		X
Presentación autoridades USAC		X
Presentación a beneficiarios directos	X	
Entrega de resultados		X
Docencia en grado	X	
Docencia postgrado		X
Póster científico		X



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

	Sí	No
Trifoliales		X
Conferencias	X	
Otro (describe)		X



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

16. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

En el contexto de las prioridades nacionales de desarrollo, esta propuesta de investigación se alinea con varios objetivos. En primer lugar, aborda la meta 6.3 relacionada con la mejora de la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación en vertimientos y la minimización de la descarga de materiales y productos químicos. Además, busca reducir las aguas residuales no tratadas y establecer líneas investigativas para la reutilización de nutrientes. En segundo lugar, contribuye a la seguridad alimentaria y nutricional (meta 2.3) al aumentar la productividad agrícola y los ingresos de los pequeños productores, especialmente entre las comunidades indígenas y los pescadores. Esto se logra al proporcionar acceso a fuentes de agua menos contaminadas y al implementar sistemas de reutilización de macronutrientes esenciales para la producción, como el fósforo.

Esta investigación está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Específicamente, se relaciona con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al establecer una línea de investigación orientada hacia el aprovechamiento de nutrientes desechados y promover prácticas agrícolas menos invasivas al contar con tecnología que permita disminuir el impacto agrícola en cuerpos acuáticos.

17. Contribución al desarrollo de iniciativas de ley

No aplica por la naturaleza de la investigación.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

18. Vinculación

Se realizó un proceso vinculativo con la Autoridad del Manejo Sustentable de la Cuenca y el Lago de Amatitlán, con quienes se coordinó el muestreo y quienes apoyaron en todo momento, las consultas y dudas referentes a la calidad del agua, así como su opinión técnica respecto a las estrategias de captura de nutrientes de muestras de agua del lago

Se realizó un vínculo de investigación con el Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios de la Universidad del Valle de Guatemala, con quienes se establecieron futuras investigaciones respecto al uso de organoarcillas y aminoácidos en sistemas de cultivos, se realizó una visita Campus Altiplano UVG para conocer los sistemas de cultivos montados y su posible aplicación con organoarcillas.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

19. Conclusiones

La organoarcilla compuesta por bentonita y lisina (orga-lys) demostró una capacidad de captura de fosfatos del 31.81% en las muestras de agua del lago de Amatitlán y una liberación del 92.93% en medio alcalino, evidenciando su naturaleza reversible.

La organoarcilla compuesta por bentonita e histidina (orga-hys) logró una captura de fosfatos del 30.06% en las muestras de agua del lago de Amatitlán y una liberación del 78.83% en medio alcalino, confirmando su capacidad reversible.

La organoarcilla compuesta por bentonita y glicina (orga-gly) mostró una capacidad de captura de fosfatos del 35.48% en las muestras de agua del lago de Amatitlán y una liberación del 88.21% en medio alcalino, destacando su naturaleza reversible.

Se caracterizó el comportamiento cinético de las organoarcillas mediante 3 ciclos de adsorción/liberación de fosfatos en medio alcalino. Los resultados mostraron que las organoarcillas sintetizadas (orga-gly, orga-hys y orga-lys) presentan una naturaleza reversible, con capacidades de adsorción y liberación consistentes en cada ciclo.

Se estableció la viabilidad del uso de organoarcillas en sistemas de cultivo de tomate y plantas menores como el berro, mediante el análisis de requerimientos nutricionales y dosificación de estos, gracias al vínculo colaborativo con Universidad del Valle de Guatemala



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

20. Recomendaciones

Considerando la disminución en la actividad regenerativa de las organoarcillas se sugiere plantear un diseño que permita cuantificar más elementos presentes en las muestras de agua, con la finalidad de caracterizar el comportamiento de las organoarcillas ante diferentes especies iónicas y/o metales.

Se encontraron diversas aplicaciones de organoarcillas, desde liberación de nutrientes hasta la captura de contaminantes, se recomienda evaluar diferentes estructuras orgánicas e inorgánicas para la captura.

Considerando la viabilidad de su utilización en suelos, se recomienda una fase subsiguiente que aplique las organoarcillas en sistemas de cultivo como estrategias para mejorar la salud y los nutrientes de cultivos



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

21. Referencias

- Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. a. M., Bashir, M. J., Copty, N. K., Amr, S. S. A., Abushammala, M. F., & Maskari, T. A. (2021a). Recent Advances of Nanoremediation Technologies for Soil and Groundwater Remediation: A Review. *Water*, 13(16), 2186. <https://doi.org/10.3390/w13162186>
- Asomaning, S. K. (2020). Processes and factors affecting phosphorus sorption in soils. *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90719>
- Atia, A. A. (2008). Adsorption of chromate and molybdate by cetylpyridinium bentonite. *Applied Clay Science*, 41(1), 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.09.011>
- Bao, T., Dantie, M. M., Wang, C. Y., Chen, Z., Tao, Q., Wei, W., Cho, K., Yuan, P., Frost, R. L., & Ni, B.-J. (2024). Comprehensive review of modified clay minerals for phosphate management and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141425>
- Benetoli, L. O. B., de Souza, C. M. D., da Silva, K. L., de Souza, I. G., de Santana, H., Paesano, A., da Costa, A. C. S., Zaia, C. T. B. V., & Zaia, D. A. M. (2007). Amino Acid Interaction with and Adsorption on Clays: FT-IR and Mössbauer Spectroscopy and X-ray Diffractometry Investigations. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 37(6), 479-493. doi.org/10.1007/s11084-007-9072-7
- Biswas Chowdhury, R., & Zhang, X. (2021). Phosphorus use efficiency in agricultural systems: A comprehensive assessment through the review of national scale substance flow analyses. *Ecological Indicators*, 121, 107172. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107172>
- Boratto, T. H. A., Campos, D. E. D., Fonseca, D. L., Soares Filho, W. A., Yaseen, Z. M., Gorgoglione, A., & Goliatt, L. (2024). Hybridized machine learning models for phosphate pollution modeling in water systems for multiple uses. *Journal of Water Process Engineering*, 64, 105598. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105598>
- Chang, J., Clay, D., Arnall, B., Reicks, G., Clay, D., Clay, S., & Bruggeman, S. (2017). *Essential Plant Nutrients, Fertilizer Sources, and Application Rates Calculations*. <https://doi.org/10.2134/practicalmath2017.0026>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Chen, M., & Graedel, T. E. (2016). A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts. *Global Environmental Change*, 36, 139-152. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.12.005>
- Conci, E., Civit, B. M., & Becker, A. R. (2024). Impacto Ambiental del Fósforo en Sistemas Acuáticos Regionales. *AJEA*, *AJEA* 37. <https://doi.org/10.33414/ajea.1694.2024>
- Corne, V., Romano, M. S., Maskavizan, A. J., & Centurión, E. (2019). Adsorción de cromo en materiales arcillosos funcionalizados con compuestos orgánicos. IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental, Argentina. <https://ria.utn.edu.ar/bitstreams/f28771ec-0d9b-4a41-a50d-088bfd75a9c5/download>
- Cuevas R, Rodríguez K, Muñoz V, Castro V y Maturell M. (2014) Enfermedad diarreica aguda en niños guatemaltecos menores de 5 años. *MediSan*; 18(11):1515-1523.
- Davies, D. K., Almon, W. R., Bonis, S. B., & Hunter, B. E. (1979). Deposition and Diagenesis of Tertiary-Holocene Volcaniclastics, Guatemala. En P. A. Scholle & P. R. Schluger (Eds.), *Aspects of Diagenesis* (Vol. 26, p. 0). SEPM Society for Sedimentary Geology. <https://doi.org/10.2110/pec.79.26.0281>
- Dix, M. A., Gomez, S., Garcia-Oliva, O. F., Dix, M. W., Romero-Oliva, C. S., & Garcia-Polo, J. (2022). Ingreso de Nitrógeno y fósforo al lago Atitlán (Guatemala) vía Deposición Atmosférica. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 9(1), 8–20. <https://doi.org/10.36829/63cts.v9i1.1043>
- De Economía Y Competitividad, M. (2012a, November 24). Organoarcillas como enmiendas para aumentar la eficacia y reducir el impacto contaminante de herbicidas en suelos agrícolas. DIGITAL.CSIC. <http://hdl.handle.net/10261/61036>
- Estrada, E., Chanta, W. y Rivera, R., (2022) Evaluación de adsorción-desorción de fósforo empleando arcillas modificadas con aminoácidos y desarrollo de modelo matemático que describa su comportamiento. (informe final) Dirección general de Investigación -DIGI-. <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2022-61.pdf>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Fátima, A., & Gasalla, R. (2022). Adsorción y desorción de fósforo y elementos traza en suelos y bioadsorbantes [Tesis de doctorado]. Universidad de Santiago de Compostela
- Fernández, L., Sánchez, M., Cravero, F., Gatti, M., Parolo, M., & De la Cruz Vivanco, C. (n.d.). Funcionalización de arcillas y aplicaciones. Universidad Nacional del Comahue. http://saasa.unsl.edu.ar/orales/Fernandez_Laura.pdf
- Gamba, M. (2017a). Montmorillonitas modificadas para la retención de pesticidas poscosecha (imazalil y tiabendazol). <https://doi.org/10.35537/10915/60347>
- Ganie, A. S., Bano, S., Khan, N., Sultana, S., Rehman, Z., Rahman, M. M., Sabir, S., Coulon, F., & Khan, M. M. (2021a). Nanoremediation technologies for sustainable remediation of contaminated environments: Recent advances and challenges. *Chemosphere*, 275, 130065. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130065>
- Garzón Malusin, C. H. (2015a). Nanocompuestos de mezclas de resinas epóxicas y aminas alifáticas con organoarcillas modificadas. [Tesis de graduación]. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Guaya, D., Jiménez, R., & Angamarca, A. (2023). Síntesis de un composito pollucita/ferrihidrita/hematita: pellets para la adsorción de fosfatos a partir de agua residual sintética. *Axioma*, 1(28), 24–32. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i28.867>
- Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA and CMS Nomenclature Committees. *Clay Minerals*, 30(3), 257-259. <https://doi.org/10.1180/claymin.1995.030.3.09>
- Guimarães, B. M. D. M., & Lima Neto, I. E. (2023). Analysis of total nitrogen and chlorophyll a correlations in reservoirs in Ceará/Brazil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 28, e20230015. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220230015>
- He, H., Ma, L., Li, Z., Frost, R. L., Theng, B. K., & Bergaya, F. (2014a). Synthesis of organoclays: A critical review and some unresolved issues. *Applied Clay Science*, 100, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.02.008>
- Jović-Jovičić, N., Milutinović-Nikolić, A., Banković, P., Mojović, Z., Žunić, M., Gržetić, I., & Jovanović, D. (2010). Organo-inorganic bentonite for simultaneous adsorption of



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Acid Orange 10 and lead ions. *Applied Clay Science*, 47(3), 452-456.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.005>
- Katti, K. S., Ambre, A. H., Peterka, N., & Katti, D. R. (2010). Use of unnatural amino acids for design of novel organomodified clays as components of nanocomposite biomaterials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1917), 1963-1980.
doi.org/10.1098/rsta.2010.0008
- Koswojo, R., Utomo, R. P., Ju, Y.-H., Ayucitra, A., Soetaredjo, F. E., Sunarso, J., & Ismadji, S. (2010). Acid Green 25 removal from wastewater by organo-bentonite from Pacitan. *Applied Clay Science*, 48(1), 81-86.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.023>
- Kuzawa, K., Jung, Y.-J., Kiso, Y., Yamada, T., Nagai, M., & Lee, T.-G. (2006). Phosphate removal and recovery with a synthetic hydrotalcite as an adsorbent. *Chemosphere*, 62(1), 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.015>
- Lee, S. M., & Tiwari, D. (2012). Organo and inorgano-organo-modified clays in the remediation of aqueous solutions: An overview. *Applied Clay Science*, 59-60, 84-102. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.02.006>
- Li, Y., Liu, Y., Wang, H., Zuo, Z., Yan, Z., Wang, L., Wang, D., Liu, C., & Yu, D. (2023). *In situ* remediation mechanism of internal nitrogen and phosphorus regeneration and release in shallow eutrophic lakes by combining multiple remediation techniques. *Water Research*, 229, 119394. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119394>
- Li, Z., & Bowman, R. S. (2001). Retention of inorganic oxyanions by organo-kaolinite. *Water Research*, 35(16), 3771-3776. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00120-8)
- Luo, R., Li, W., Zhong, J., Dai, T., Liu, J., Zhang, X., Chen, Y., & Gao, G. (2024). Combining Multiple Remediation Techniques Is Effective for the Remediation of Eutrophic Flowing Water. *Water*, 16(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/w16060858>
- Marín-Bustamante, M. Q., Hernández-Flores, A., & Cásarez-Santiago, R. G. (2021a). Nanotecnología y Agricultura: Detección, Monitoreo y Remediación de



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Contaminantes. Revista Salud Y Administración, 8(23), 29–35.
<https://cdam.unsis.edu.mx/revista/index.php/saludyadmon/article/download/214/167>
- Mort, H., Metson, G. S., Neset, T.-S., Rodriguez, C., Martin-Ortega, J., Chapman, P. J., & Stutter, M. (2024). *Phosphorus, Eutrophication and the Importance of Scales: A Place-Based Transdisciplinary Analysis of Scalar Dynamics* (SSRN Scholarly Paper 4769535). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4769535>
- Nafees, M., & Waseem, A. (2014a). Organoclays as Sorbent Material for Phenolic Compounds: A Review. *Clean-soil Air Water*, 42(11), 1500–1508.
<https://doi.org/10.1002/clen.201300312>
- De Nicolás, V. A. (2020). Removal of recalcitrant compounds from water using synthetic hydrotalcites. <https://doi.org/10.14201/gredos.144012>
- Olayo, L. F., & Peláez Sánchez, R. (2015, noviembre). *Crecimiento urbano y contaminación del lago de Amatitlán: El caso de Villa Canales y Villa Nueva 2005-2014* [Monografía, EPS, Tesis nivel técnico, seminario]. Dirección General de Investigación. <http://digi.usac.edu.gt/>
- Oliva, B., Muñoz, A., García, D., Rosales, M. y Santos, F. (2021) Determinación de microplásticos y tierras raras en agua y peces del lago de Amatitlán. (informe final) Dirección general de Investigación -DIGI-.
<https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/resumenes2020/inf2056.html>
- Onchoke, K. K., Nicholson, P. S., Cecil, L. G., Friedfeld, R. B., Taylor, J., & Weatherford, W. P. (2021). Comprehensive structural and compositional investigation of Maya pottery sherds from Lake Petén Itzá, Guatemala, Central America. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 36, 102767.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102767>
- Ouyang, W., Hao, X., Wang, L., Xu, Y., Tyskland, M., Gao, X., & Lin, C. (2019). Watershed diffuse pollution dynamics and response to land development assessment with riverine sediments. *Science of The Total Environment*, 659, 283–292.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.367>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- De Paiva, L. B., Morales, A., & Díaz, F. J. (2008a). Organoclays: Properties, preparation and applications. *Applied Clay Science*, 42(1–2), 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.02.006>
- Pantano, G., Grosseli, G. M., Mozeto, A. A., & Fadini, P. S. (2016). Sustainability In Phosphorus Use: A Question Of Water And Food Security. *Química Nova*. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160086>
- Peña, K., Erreyes, T., & Guaya, D. (2020). Uso de arcillas naturales para la recuperación de fosfatos a partir de soluciones acuosas. *Axioma*, 22, Article 22.
- Polubesova, T., Zadaka, D., Groisman, L., & Nir, S. (2006). Water remediation by micelle–clay system: Case study for tetracycline and sulfonamide antibiotics. *Water Research*, 40(12), 2369–2374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.04.008>
- Pérez-Rodríguez, J. L., Pascual, J., Franco, F., Jiménez de Haro, M. C., Duran, A., Ramírez del Valle, V., & Pérez-Maqueda, L. A. (2006). The influence of ultrasound on the thermal behaviour of Clay Minerals. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(4–5), 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.07.015>
- Rangel-Rivera, P., Rangel-Porras, G., Pfeiffer-Perea, H., & Lima-Muñoz, E. (2014). Thermoanalytical study of acid-treated clay containing amino acid immobilized on its surface. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115(2), 1359–1369. doi.org/10.1007/s10973-013-3464-x
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008a). Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. <http://doi.org/10.1201%2F9780203491454>
- Richards, S., & Bouazza, A. (2007). Phenol adsorption in organo-modified basaltic clay and bentonite. *Applied Clay Science*, 37(1), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.11.006>
- Rojas-Rodríguez, I. S., Coronado-García, M. A., Rossetti-López, S. R., y Beltrán-Morales, F. A. (2020). Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la Actividad Agrícola en la Cuenca Baja del río mayo en el Estado de Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 247–256. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.642>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Romero, C. (2019). “A nivel mundial han existido casos más dramáticos de contaminación que Amatitlán y se han rescatado exitosamente”/ Entrevistada por Bárbara Argüello. Dirección General de Investigación (DIGI). <https://investigacionparatodos.usac.edu.gt/entrevistas/item/32-contaminaci%C3%B3n-lago-de-amatit%C3%A1n>
- Schaum, C. (2018). Phosphorus: Polluter and resource of the future. IWA Publishing.
- Smith, L., Inman, A., Lai, X., Zhang, H., Fanqiao, M., Jianbin, Z., Burke, S., Rahn, C., Siciliano, G., Haygarth, P. M., Bellarby, J., & Surridge, B. (2017). Mitigation of diffuse water pollution from agriculture in England and China, and the scope for Policy Transfer. *Land Use Policy*, 61, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.028>
- Song, Y., Song, X., Sun, Q., Wang, S., Jiao, T., Peng, Q., & Zhang, Q. (2022). Efficient and sustainable phosphate removal from water by small-sized Al(OH)₃ nanocrystals confined in discarded Artemia Cyst-shell: Ultrahigh sorption capacity and rapid sequestration. *Science of the Total Environment*, 803, 150087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150087>
- Şölener, M., Tunali, S., Özcan, A. S., Özcan, A., & Gedikbey, T. (2008). Adsorption characteristics of lead(II) ions onto the clay/poly(methoxyethyl)acrylamide (PMEA) composite from aqueous solutions. *Desalination*, 223(1), 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.221>
- Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 4500-p phosphorus In: *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. Lipps WC, Baxter TE, Braun-Howland E, editors. Washington DC: APHA Press.
- Stathi, P., Litina, K., Gournis, D., Giannopoulos, T. S., & Deligiannakis, Y. (2007). Physicochemical study of novel organoclays as heavy metal ion adsorbents for environmental remediation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 316(2), 298-309. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.07.078>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Suksiripattanapong, C., Srijumpa, T., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Arulrajah, A., & Du, Y. j. (2015). Compressive strengths of water treatment sludge-fly ash geopolymer at various compression energies. *Lowland Technology International*, 17(3), 147-156. https://doi.org/10.14247/lti.17.3_147
- Sun, S.-W., Lin, Y.-C., Weng, Y.-M., & Chen, M.-J. (2006). Efficiency improvements on ninhydrin method for amino acid quantification. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(2), 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.04.006>
- Torres, O. G. V. (2016). Importancia De Los Fosfatos Y Fosfitos En La Nutrición De Cultivos. *Acta Agrícola Y Pecuaria*, 2(3), 55–61. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6201359.pdf>
- Tsai, W. T., Chang, Y. M., Lai, C. W., & Lo, C. C. (2005). Adsorption of basic dyes in aqueous solution by clay adsorbent from regenerated bleaching earth. *Applied Clay Science*, 29(2), 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.10.004>
- Tyagi, B., Chudasama, C. D., & Jasra, R. V. (2006). Characterization of surface acidity of an acid montmorillonite activated with hydrothermal, ultrasonic and microwave techniques. *Applied Clay Science*, 31(1–2), 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.07.001>
- United Nations Children’s Fund (UNICEF). (2022). Plan Estratégico de UNICEF 2022-2025. Plan Estratégico 2022-2025. <https://www.unicef.org/sites/default/files/2022-02/UNICEF-strategic-plan-2022-2025-publication-EN.pdf>
- United Nations Children’s Fund (UNICEF), & World Health Organization. (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene I 2000-2017. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene. <https://www.unwater.org/publications/who/unicef-joint-monitoring-program-water-supply-sanitation-and-hygiene-jmp-progress-0>
- Unuabonah, E. I., Agunbiade, F. O., Alfred, M. O., Adewumi, T. A., Okoli, C. P., Omorogie, M. O., Akanbi, M. O., Ofomaja, A. E., & Taubert, A. (2017). Facile synthesis of new amino-functionalized agrogenic hybrid composite clay adsorbents for phosphate



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- capture and recovery from water. *Journal of Cleaner Production*, 164, 652-663.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.160>
- Van Tuylen, S. Estado de los cuerpos de agua de la Cuenca del Lago de Amatitlán 2020. Guatemala: Autoridad Para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán –AMSA, 2020.
- Vargas-Rodríguez, Y. M., Gómez-Vidales, V., Vázquez-Labastida, E., García-Bórquez, A., Aguilar-Sahagún, G., Murrieta-Sánchez, H., & Salmón, M. (2008a). Caracterización espectroscópica, química y morfológica y propiedades superficiales de una montmorillonita mexicana. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 25(1), 135–144. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2553953.pdf>
- Velusamy, K., Periyasamy, S., Kumar, P. S., Vo, D. V. N., Sindhu, J., Sneka, D., & Subhashini, B. (2021). Advanced techniques to remove phosphates and nitrates from waters: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3165–3180.
<https://doi.org/10.1007/s10311-021-01239-2>
- Warchoń, J., Misaelides, P., Petrus, R., & Zamboulis, D. (2006). Preparation and application of organo-modified zeolitic material in the removal of chromates and iodides. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1410-1416.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.028>
- Weihrauch, C., & Opp, C. (2018a). Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. *Geoderma*, 325, 183–194.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.047>
- Xi, Y., Mallavarapu, M., & Naidu, R. (2010). Preparation, characterization of surfactants modified clay minerals and nitrate adsorption. *Applied Clay Science*, 48(1), 92-96.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.047>
- Yan, Z., Han, W., Peñuelas, J., Sardans, J., Elser, J. J., Du, E., Reich, P. B., & Fang, J. (2016). Phosphorus accumulates faster than nitrogen globally in freshwater ecosystems under anthropogenic impacts. *Ecology Letters*, 19(10), 1237-1246.
<https://doi.org/10.1111/ele.12658>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Zhu, L., Tian, S., & Shi, Y. (2005). Adsorption of volatile organic compounds onto porous clay heterostructures based on spent organobentonites. *Clays and Clay Minerals*, 53(2), 123-136. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2005.0530202>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

22. Apéndice

Figura 1

Bentonita adquirida como materia prima para funcionalización y posteriores pruebas de adsorción y desorción



Fuente: Fotografía propia obtenida por el M. Sc. Erick Estrada el 24 de junio de 2024.

Figura 2

Sonda digital multiparamétrica a prueba de agua de Hanna Instruments, cotizada para hacer mediciones in situ en el lago de Amatitlán



Fuente: Fotografías propias obtenidas en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 3

Reunión de planificación y organización con el equipo de investigación



Fuente: Captura de pantalla tomada por el Br. Renato Rivera, de reunión de organización híbrida en la Escuela de Química, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 4

Espacio físico limpiado y preparado para almacenamiento de reactivos, cristalería e insumos necesarios para el proyecto de investigación

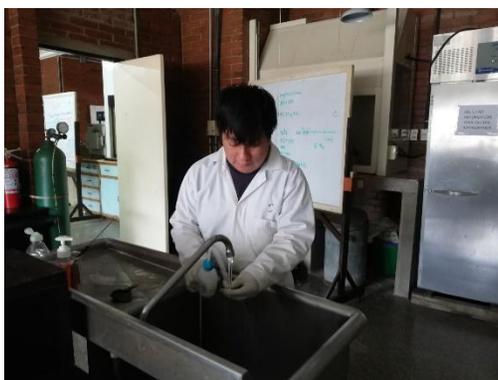


Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Fisicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 5

Lavado con jabón libre de fosfatos y preparación de cristalería a utilizar en la ejecución de la etapa experimental



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 6

Pesado de bentonita para su activación por ultrasonido



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 7

Bentonita durante proceso de activación por ultrasonido



Fuente: Fotografías propias obtenidas en el laboratorio del Departamento de Fisicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 8

Filtrado de bentonita activada por ultrasonido



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Fisicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 9

Evaporación de agua de la bentonita previo a secado en horno a 120 °C por 24 horas



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Fisicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 10

Proceso de centrifugación para obtener el sobrenadante para la determinación de aminoácidos residuales y porcentaje de retención



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Fisicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 11

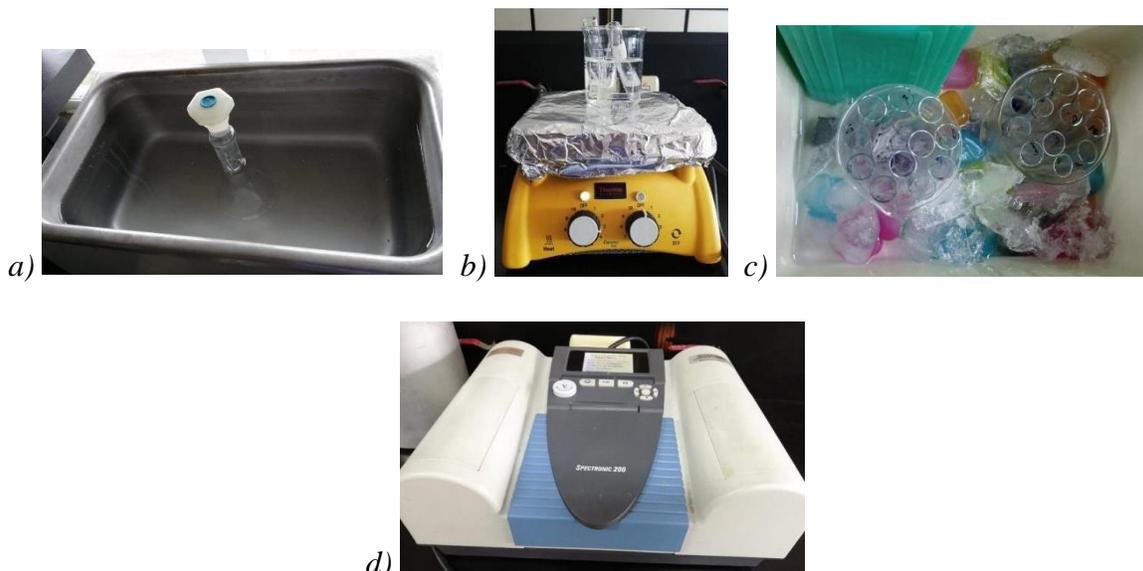
Primer lote de arcillas activadas y funcionalizadas con aminoácidos



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 12

Preparación de reactivos, medición de la curva de calibración y determinación de aminoácidos residuales: a) preparación de buffer de citrato, b) muestras en baño María, c) muestras en baño de hielo y d) determinación de aminoácidos por espectrofotometría visible

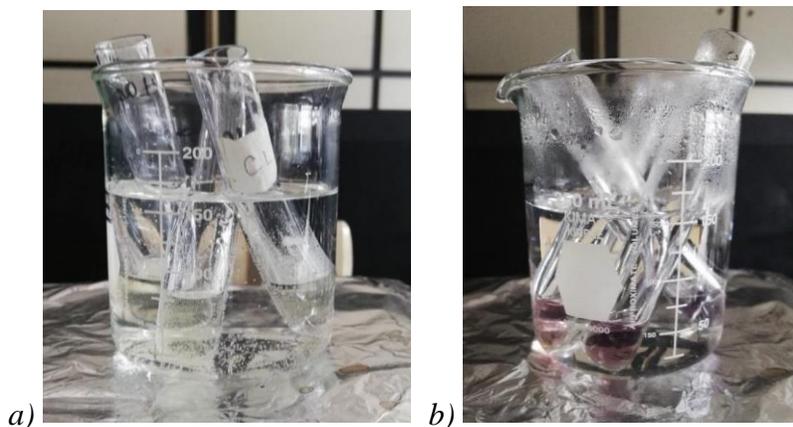


Fuente: Fotografías propias obtenidas en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 13

Desarrollo de color violeta en las muestras de aminoácidos para su determinación espectrofotométrica con ninhidrina: a) al agregar la ninhidrina y b) después del baño María



Fuente: Fotografías propias obtenidas en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 14

Disoluciones de prueba de lisina a baja concentración (0.04 mM, 0.05 mM y 0.10 mM) para su determinación espectrofotométrica con ninhidrina



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 15

Preparación de puntos para curvas de calibración y muestras para determinación de aminoácidos por el método de la ninhidrina



Fuente: Fotografías propias obtenidas en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Figura 16

Determinación espectrofotométrica de aminoácidos en puntos de curvas de calibración y muestras de aminoácidos residuales



Fuente: Fotografía propia obtenida en el laboratorio del Departamento de Físicoquímica, edificio T-12, Campus Central, Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 17

Cuatro puntos de muestreo en el lago de Amatitlán: a) Este Centro, b) Oeste Centro, c) río Villalobos y d) río Michatoya.



Fuente: Capturas de pantalla de la aplicación Google Maps obtenidas durante el muestreo en el lago de Amatitlán, Guatemala, Guatemala.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 18

Muestreo en el lago de Amatitlán, con apoyo del personal de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán –AMSA–



Fuente: Fotografías propias obtenidas en el lago de Amatitlán, Guatemala, Guatemala.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 19

Medición de parámetros in situ en el lago de Amatitlán, con apoyo del personal de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán –AMSA–



Fuente: Fotografías propias obtenidas en el lago de Amatitlán, Guatemala, Guatemala.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Apéndice 2

Protocolo de Muestreo

Propósito de la medición para la que se hará el muestreo: Determinación de fosfatos en muestras de agua contaminada proveniente del lago de Amatitlán y pruebas de remoción y liberación con organoarcillas.

¿Cuándo? Miércoles 16 de octubre de 2024

¿Dónde? Lago de Amatitlán, Guatemala, Guatemala

¿Cómo se colectaron las muestras?

- *Tipo de muestra:* Simple
- *Cantidad de puntos de muestreo:* Dos
- *Ubicación aproximada de puntos de muestreo:* Una en las orillas del lago y otro al centro del lago
- *Volumen de muestra por punto:* Considerar todas las mediciones y pruebas a las que se desea someter para coleccionar un volumen suficiente (por ejemplo, determinación de fosfatos, pruebas de absorción con los tres diferentes tipos de organoarcilla, ciclos de absorción y desorción, etc.)

Aproximadamente 3 galones por punto de muestreo.

- *Profundidad del punto de muestreo:*
- *Parámetros que se determinarán in situ:*
 - Color (espectrofotométrico)
 - Turbidez (nefelométrico)
 - Olor
 - pH



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Conductividad
- Temperatura
- Oxígeno disuelto (% y mg/L)

Material y equipo de muestreo:

- GPS
- Sonda multiparamétrica
- Colorímetro portátil
- *Mantenimiento:*
 - Disolución de almacenamiento de los electrodos
 - Disolución de limpieza de propósito general
- *Calibración:* Disolución de calibración rápida

Recipientes de muestreo:

- *Material:* Plástico o vidrio
- *Capacidad:* 1 galón c/u
- *Cantidad:* 6 (3 por punto de muestreo)
- *Procedimiento y materiales para limpieza:* No requiere un lavado especial. Si fuera un recipiente de vidrio para determinación de fosfatos sí se debería lavar primero con 1 + 1 HNO₃
- *Estabilizantes:* H₂SO₄ concentrado (pH < 2).



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- *Condiciones y materiales para almacenamiento:* Almacenar a 4 °C. Verificar qué método de preservación utilizan en AMSA y por cuánto tiempo se podrá almacenar la muestra.
- *Materiales para el etiquetado:*
 - Etiquetas con adhesivo ya preparadas
 - Cinta adhesiva
 - Papel
 - Lápiz o lapicero (utilizar tintas a prueba de agua)

Procedimientos de pretratamiento de la muestra: Filtrar para analizar fosfatos disueltos. Preservar añadiendo 2 mL de H₂SO₄ concentrado por litro. Almacenar a 4 °C.

Procedimientos de sub-muestreo: No aplica.

Registro de la muestra:

- *Etiquetado:* Cada muestra se identificará con
 - Código de identificación único
 - Nombre del responsable del muestreo
 - Número del método de muestreo empleado (si aplica)
 - Fecha del muestreo
 - Hora exacta del muestreo
 - Ubicación exacta del punto de muestreo



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Preservante utilizado (si aplica), así como fecha y hora de su adición
- Indicación de si la muestra fue filtrada o no
- Tipo de muestra (simple o compuesta)

Blancos: Se recomienda tomar blancos de campo, de recipiente y de viaje.

Consideraciones:

- Asegurarse de que todo el equipo que se usará en el muestreo esté limpio y libre de contaminantes.
- No enjuagar con muestra la botella previamente lavada para no perder preservantes añadidos con antelación y para no obtener resultados erróneos por compuestos que se adhieren a las paredes del recipiente.
- No llenar recipiente en toda su capacidad, ni llenarlo de más si ya tiene un preservante para no diluirlo ni perderlo por derrames.
- Dejar al menos 1% del volumen del recipiente sin llenar, considerando la expansión térmica y para homogeneizar la muestra previo a su análisis.
- Si se tomará una muestra compuesta, refrigerarla.
- Como preservante, utilizar ácidos ultrapuros.
- Si se tomará una muestra compuesta, el preservante debe añadirse al inicio para que cada porción sea preservada tan pronto como sea colectada.
- En la acidificación, considerar que la dilución sea despreciable o lo suficientemente reproducible para aplicar un factor de corrección de dilución.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

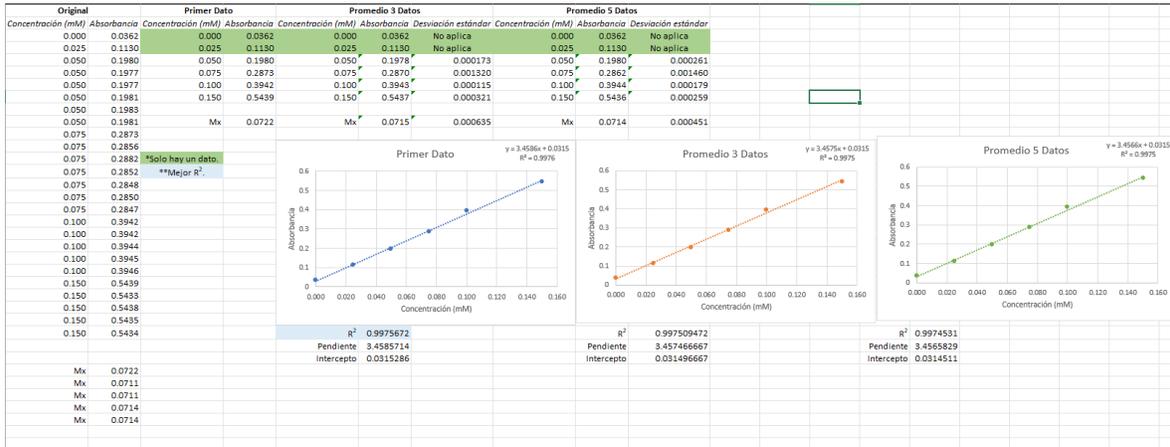
- Si se filtrarán las muestras, hacerlo antes de acidificarlas y lo más pronto posible luego de la toma de muestra.
- Para muestras filtradas se recomienda la acidificación a menos que se vayan a realizar mediciones de especiación.
- Los procesos de filtración suelen realizarse con filtros de poros de 0.45 μm . El filtro debe limpiarse sumergiéndolo en ácido diluido, seguido por agua destilada.
- Evitar tomar muestras en áreas con gran turbulencia o cerca de presas.
- Identificar clara y adecuadamente cualquier muestra que se sepa que es o se sospeche que sea peligrosa debido a inflamabilidad, corrosividad, toxicidad, poder oxidante o radiactividad.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Apéndice 3

Curvas de calibración



Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación, artículos 13 y 20, dejo constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordino ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

<p>M. Sc. Erick Giovanni Estrada Palencia Coordinador del Proyecto de Investigación</p>	 Firma
<p>Fecha: 14/02/2025</p>	

Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: director del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<p>Vo.Bo. Dra. María Eunice Enríquez Cotton Directora del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas –IIQB–</p>	 Firma 
<p>Fecha: 14/02/2025</p>	

Aprobación de la Dirección General de Investigación

<p>Vo.Bo. Inga. Liuba Cabrera de Villagrán Coordinador(a) del programa universitario de investigación</p>	 Firma
<p>Fecha: 14/02/2025</p>	



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

<p>Vo.Bo. MARN Ing. Agr. Julio Rufino Salazar</p> <p>Coordinador General de Programas</p>	<p>Firma</p>
<p>Fecha: 14/02/2025</p>	

/Digi2024