



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

**EVALUACIÓN DE ORGANOARCILLAS
FUNCIONALIZADAS CON AMINOÁCIDOS
PARA LA CAPTURA REVERSIBLE DE FOSFATOS
EN AGUAS EUTROFIZADAS DEL LAGO
DE AMATITLÁN, GUATEMALA**

**EVALUATION OF AMINO ACID-FUNCTIONALIZED ORGANOCLAYS
FOR REVERSIBLE PHOSPHATE CAPTURE IN EUTROPHIC WATERS
FROM AMATITLÁN LAKE, GUATEMALA**

Renato Rodolfo Rivera Tello

Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala

Erick Giovanni Estrada Palencia

Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Mauricio Valentino Rivera Tello

Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Astrid Carolina Ubeda Contreras

Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Evaluación de Organoarcillas Funcionalizadas con Aminoácidos para la Captura Reversible de Fosfatos en Aguas Eutrofizadas del Lago de Amatitlán, Guatemala

Renato Rodolfo Rivera Tello¹

rrrivera@uvg.edu.gt

<https://orcid.org/0009-0004-8856-267X>

Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios
Universidad del Valle de Guatemala
Guatemala

Erick Giovanni Estrada Palencia

erickestrada.gt@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-2631-9378>

Dirección General de Investigación-DIGI-
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Mauricio Valentino Rivera Tello

mavertl11v@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-8378-921X>

Dirección General de Investigación-DIGI-
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

Astrid Carolina Ubeda Contreras

astridubeda.26@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-1286-9531>

Dirección General de Investigación-DIGI-
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

RESUMEN

La presencia de especies fosfatadas altamente solubles en los residuos generados por la industria agrícola y de origen antropogénico ha contribuido significativamente al desequilibrio químico de diversos cuerpos de agua dulce en Guatemala. En esta investigación, se emplearon muestras de agua del lago de Amatitlán —un ecosistema eutrófico— para evaluar la eficiencia de organoarcillas funcionalizadas con aminoácidos, diseñadas para la captura y liberación reversible de fosfatos solubles. El objetivo principal fue determinar la capacidad de estas organoarcillas para recuperar fósforo, con miras a su reutilización como nutriente en sistemas agrícolas. Los resultados indicaron que una de las tres variantes sintetizadas logró remover hasta un 35% de fosfatos de manera reversible, lo que las posiciona como alternativas viables para la regeneración de nutrientes, evidenciando su potencial aplicación en prácticas agrícolas sostenibles.

Palabras clave: arcillas, contaminación, lago, nutrientes, regeneración

¹ Autor principal.

Correspondencia: rrrivera@uvg.edu.gt

Evaluation of Amino Acid-Functionalized Organoclays for Reversible Phosphate Capture in Eutrophic Waters from Amatitlán lake, Guatemala

ABSTRACT

The presence of highly soluble phosphate species in waste generated by agricultural and anthropogenic activities has significantly contributed to the chemical imbalance of various freshwater water bodies in Guatemala. In this study, water samples from Lake Amatitlán —a eutrophic ecosystem— were used to evaluate the efficiency of amino acid-functionalized organoclays, designed for the reversible capture and release of soluble phosphates. The main objective was to determine the capacity of these organoclays to recover phosphorus for its potential reuse as a nutrient in agricultural systems. Results showed that one of the three synthesized variants was capable of reversibly removing up to 35% of phosphates, positioning these materials as viable alternatives for nutrient regeneration and highlighting their potential application in sustainable agricultural practices.

Keywords: clays, lake, nutrients, pollution, regeneration

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos de agua dulce constituye uno de los problemas ambientales más críticos a nivel mundial. Entre los contaminantes más relevantes se encuentran compuestos nitrogenados y fosfatados, derivados principalmente de actividades agrícolas, industriales y domésticas. El exceso de estos nutrientes provoca procesos de eutrofización, caracterizados por proliferación masiva de algas y plantas acuáticas, disminución del oxígeno disuelto y pérdida de biodiversidad, afectando la calidad del agua y la salud humana (Velusamy et al., 2021; Jwaideh et al., 2022).

En América Latina y Centroamérica, la gestión inadecuada de aguas residuales y el uso intensivo de fertilizantes han incrementado la carga de nutrientes en lagos y ríos, generando ecosistemas vulnerables a la eutrofización (Madjar et al., 2024). Este fenómeno se intensifica en regiones con baja cobertura de plantas de tratamiento y alta presión agrícola, lo que agrava los impactos sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

En Guatemala, el Lago de Amatitlán es uno de los casos más representativos. Estudios recientes lo clasifican como un ecosistema hipereutrófico, con índices de estado trófico entre 63.80 y 88.18, alta abundancia de cianobacterias del género *Microcystis* y concentraciones elevadas de coliformes fecales, lo que evidencia una severa degradación de la calidad del agua (Rodas-Pernillo & Vásquez-Moscoso, 2020).

Diversas tecnologías se han desarrollado para remover fosfatos del agua, incluyendo procesos químicos, biológicos y físico-químicos. Sin embargo, muchos presentan limitaciones como alto consumo energético, generación de residuos secundarios y baja eficiencia en condiciones reales (Velusamy et al., 2021; Nadagouda et al., 2024; Luo et al., 2024). Entre las alternativas más prometedoras se encuentra la adsorción, por su alta efectividad, simplicidad operativa y mínima producción de desechos (Usman et al., 2022; Song et al., 2022).

La captura de nutrientes en disolución acuosa ha sido en los últimos años sujeto de estudios intensivos, debido a la naciente 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).

Las organoarcillas funcionalizadas con aminoácidos han emergido como materiales innovadores para la remoción de fosfatos. Estas combinan la estructura laminar de las arcillas con grupos funcionales orgánicos, mejorando la afinidad por aniones fosfato. La incorporación de aminoácidos como lisina, histidina y glicina incrementa la capacidad de adsorción y permite procesos de desorción controlada, favoreciendo la recuperación del fósforo para su reutilización como nutriente (Unuabonah, 2017; Yakubu & Aliyu-Paiko, 2024).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la viabilidad de organoarcillas funcionalizadas con aminoácidos como agentes de remediación de fosfatos en agua contaminada, utilizando muestras representativas del Lago de Amatitlán. Se plantea la hipótesis de que estas organoarcillas permiten reducir significativamente la concentración de fosfatos y, bajo condiciones alcalinas, liberar el fósforo adsorbido para su aprovechamiento.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental transversal. El objetivo fue evaluar la capacidad de adsorción y desorción de fosfatos en agua mediante organoarcillas funcionalizadas con aminoácidos, como estrategia de remediación ambiental. El estudio se clasifica como aplicativo y explicativo, ya que busca aplicar conocimientos químicos en la solución de problemas ambientales, explicando los mecanismos involucrados.

Muestreo

El estudio consistió en la recolección de muestras de agua superficial del lago de Amatitlán. Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando puntos representativos del lago con alta carga de nutrientes, identificados de manera previa por personal de la Autoridad del Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlan, Guatemala -AMSA-, como puntos de monitoreo continuo los cuales se detallan en la Figura 1.

Se tomaron 2 muestras de 3 litros por cada punto de monitoreo, las cuales fueron almacenadas en contenedores plásticos, transportadas y almacenadas a 4°C hasta su análisis en el laboratorio, el muestreo se realizó durante el mes de octubre de 2024.



Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Caracterización fisicoquímica del agua: Se midieron pH, conductividad, salinidad, turbidez y fósforo soluble mediante instrumentos calibrados (pH-metro, conductímetro, turbidímetro y espectrofotómetro UV/Vis).

Activación de arcilla: Se preparó una suspensión de arcilla (1.5 g/10 mL agua), sonicada por 1 hora en baño ultrasónico. Luego se dejó reposar una hora, se separó el sobrenadante, se secó a 120 °C por seis horas, se pulverizó y se volvió a secar a 90 °C por 24 horas (Pérez-Rodríguez et al., 2006; Tyagi et al., 2006)

Preparación de soluciones de aminoácidos: Glicina, histidina y lisina se disolvieron en agua destilada para obtener soluciones 0.1 mM (Benetoli et al., 2007)

Funcionalización de arcilla: Se mezcló arcilla activada con soluciones de aminoácidos previamente preparadas en una proporción 35:65 (g:mL), esto se mantuvo en agitación por 24 h. Se centrifugó a 2400 RPM, se secó a 105 °C por 24 h, se lavó con agua destilada hasta pH neutro y se secó a 50 °C, con esto se obtuvieron 3 diferentes organoarcillas correspondiente a cada uno de los aminoácidos evaluados (Benetoli et al., 2007; Unuabonah et al., 2017).

Cuantificación de aminoácidos residuales: Se utilizó el método de ninhidrina, para el cual se mezclaron 1 mL del sobrenadante de la funcionalización con 2 mL de ninhidrina, se calentó en baño maría por 15 min, se enfrió en hielo, se añadieron 2 mL de etanol al 50% y se midió la absorbancia a 575 nm. Se empleó una curva de calibración validada (Sun et al., 2006).

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

Se mezclaron 100 mL de agua con 2 g de organoarcilla por dos horas. Se tomaron 0.5 mL, se diluyeron en 4.5 mL de agua, se filtraron, y se añadieron 3.5 mL del filtrado con 1 mL de reactivo de vanadato/molibdato y 1 mL de agua. Se midió la absorbancia a 420 nm y se calculó la concentración mediante curva de calibración con fosfato monoácido de potasio (Standard Methods Committee of the American Public Health Association et al., 2017; Unuabonah et al., 2017).



Ensayos de desorción: Se dispersaron 2 g de organoarcilla previamente usada en adsorción en 100 mL de agua destilada, ajustando el pH a 10 con NaOH. Se agitó por 24 h y se cuantificó el fósforo liberado (Bektas et al., 2021).

Las organoarcillas fueron sometidas a un proceso iterativo de adsorción desorción, para caracterizar su comportamiento y reutilización para la captura y liberación de fósforo (Standard Methods Committee of the American Public Health Association et al., 2017; Unuabonah et al., 2017).

Ciclos de regeneración: La capacidad de reutilización de las organoarcillas se evaluó mediante ensayos cinéticos en tres ciclos consecutivos de adsorción y liberación de fosfatos.

En cada ciclo se consideró 1 gramo de arcilla en 50 mL de agua del punto de muestreo evaluado. Las muestras se sometieron a agitación en condiciones controladas (250 rpm durante 24 horas), y tras cada fase de adsorción, se procedió a la liberación bajo condiciones alcalinas (pH 10, mediante la adición de NaOH 1.0 N).

Cinética de liberación: Se evaluó la liberación controlada de fósforo desde una organoarcilla funcionalizada con glicina (Orga-Gly), previamente cargada con fosfatos a una concentración de 30 mg/g $\pm$ 1.3. La muestra se colocó en una solución con pH 6.5 y conductividad eléctrica 2.9 mS/cm, bajo agitación constante durante 24 horas. Se realizaron mediciones periódicas a 2, 4, 12, 18 y 24 h, cuantificando el fósforo liberado (mg) mediante análisis colorimétrico.

Para describir la cinética, se aplicó el modelo de pseudo-segundo orden (PSO) según Ho y McKay, utilizando la forma lineal (ecuación 1):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

Donde q_t es la cantidad liberada a tiempo t , q_e la capacidad en equilibrio y k la constante de velocidad.

Se ajustaron los datos experimentales mediante regresión lineal de $\frac{t}{q_t}$ vs. t , calculando q_e , k mediante la pendiente y el intercepto de la gráfica, la tasa inicial $h = kq_e^2$ y el coeficiente de determinación R^2 .

Además, se generó la curva predicha con la forma integrada del PSO (ecuación 2):

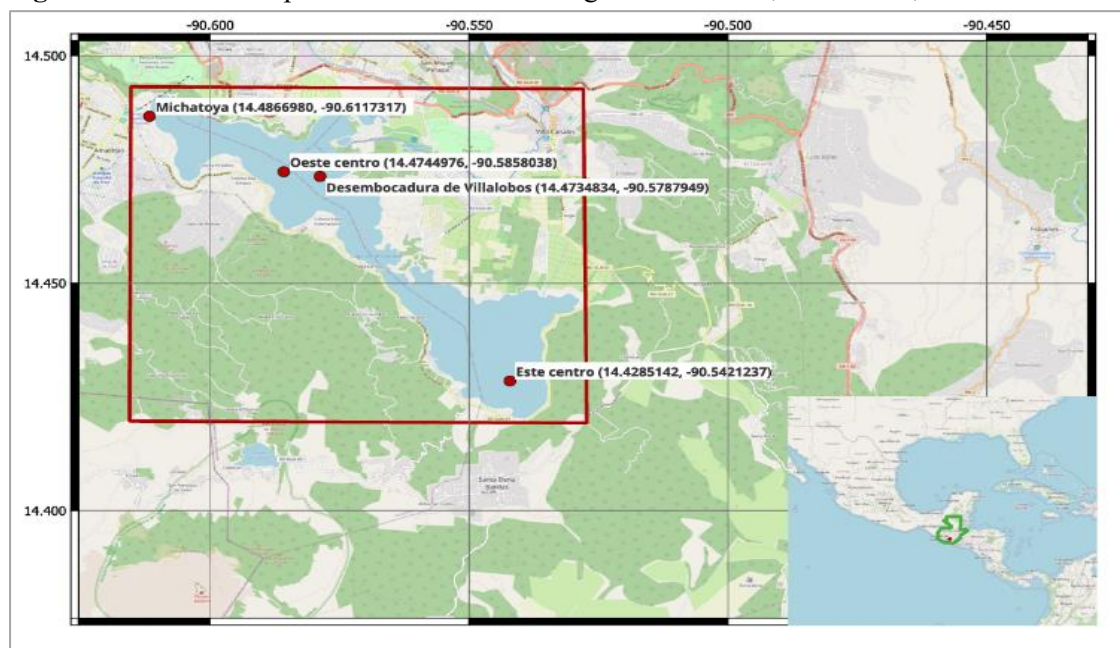
$$q_t(t) = \frac{kq_e^2 t}{1 + kq_e^2 t}$$

Análisis estadístico: se reportan los valores promedio de 5 repeticiones y la desviación estándar asociada cuando sea aplicable, se realizó un análisis ANOVA, para determinar la significancia del proceso de funcionalización en la captura y liberación de fosfatos.

En la Figura 2, se resume la metodología empleada durante el desarrollo de la investigación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 1 Ubicación de puntos de muestreo del lago de Amatitlán, Guatemala, octubre 2025



El cuadrado rojo enmarca el lago de Amatitlán y se señalan los cuatro puntos de muestreo, con las coordenadas asociadas.

El recuadro inferior derecho, permite observar la posición de Guatemala (enmarcada en verde) en la región latinoamericana.

Figura 2 Metodología experimental y desarrollo de la investigación



Se describe el proceso desde la recolección de muestras, síntesis de organoarcillas y análisis de resultados

Tabla 1 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 1 presenta los parámetros analizados durante el muestreo en el mes de octubre de 2024, en el lago de Amatitlán, Guatemala.

Tabla 2 Determinación de fósforo en forma de ortofosfatos

Muestra	Resultado (ppm)
Este centro	0.0478
Oeste centro	0.2260
Desembocadura Villalobos	0.2383
Michatoya	0.2216

Expresa el promedio de las lecturas de ortofosfatos, mediante el método de vanadato/molibdato a 420 nm

Tabla 3 Captura de fosfatos en una muestra de agua proveniente del lago de Amatitlán

Organoarcilla	Concentración inicial (ppm)**	Concentración final (ppm)**	Desviación estándar
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

Tabla 4 Captura de fosfatos por parte de organoarcillas

Organoarcilla	miligramos de P capturado (mg)	% de captura	Desviación estándar
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.

Tabla 5 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	100	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		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 cinco réplicas por cada experimentación.

Tabla 6 Análisis de varianza, para adsorción de fosfatos

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Muestra	2	196.363	98.181	14091.746	8.0086e-53
Ciclo	2	220.071	110.035	15793.131	1.0317e-53
Muestra:Ciclo	4	2.527	0.631	90.691	2.7572e-18
Residuo	36	0.250	0.006	NA	NA

Resultados del ANOVA aplicado a los porcentajes de adsorción en diferentes muestras y ciclos de regeneración. Se incluyen grados de libertad (Df), suma de cuadrados (Sum Sq), media cuadrática (Mean Sq), valor F (F value) y nivel de significancia (Pr).

Tabla 7 Análisis de varianza, para liberación de fosfatos

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Muestra	2	1948.882	974.441	77085.525	4.2419e-66
Ciclo	2	3482.575	1741.287	137748.785	1.2311e-70
Muestra:Ciclo	4	241.691	60.422	4779.888	1.6222e-48
Residuals	36	0.455	0.012	NA	NA

Resultados del ANOVA aplicado a los porcentajes de liberación en diferentes muestras y ciclos de regeneración. Se incluyen grados de libertad (Df), suma de cuadrados (Sum Sq), media cuadrática (Mean Sq), valor F (F value) y nivel de significancia (Pr).

Tabla 8 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 8 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

Tabla 9 Datos experimentales y ajuste al modelo cinético de pseudo-segundo orden (PSO) para la liberación de fósforo

Tiempo (h)	qt observado (mg)	t/qt (h/mg)	qt predicho PSO (mg)
2	8.58	0.233100233	8.011575938
4	12.57	0.318217979	12.69446386
12	20.03	0.599101348	20.79957617
18	23.1	0.779220779	23.2764901
24	25.13	0.955033824	24.75017528

qt = fósforo liberado a lo largo del tiempo (h)

t/qt = relación entre tiempo y fósforo liberado

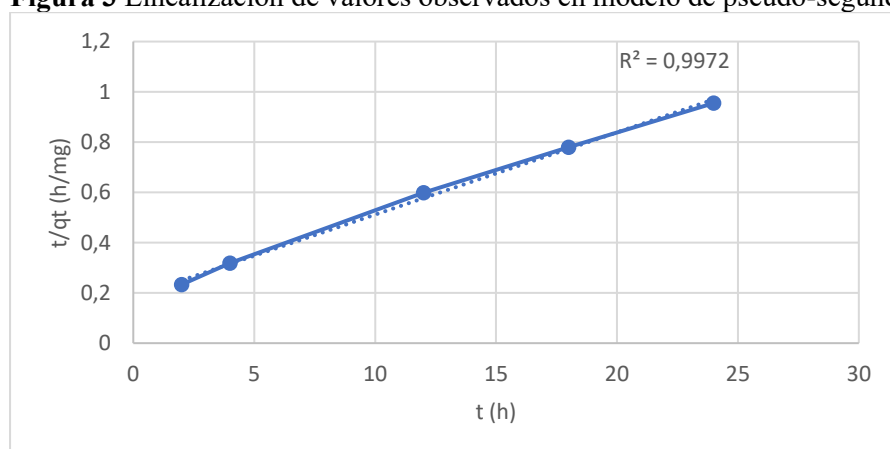
qt predicho = mg de fósforo predichos con el modelo cinético de pseudo-segundo orden, empleando las ecuaciones descritas en metodología

Tabla 10 Valores cinéticos calculados

Parámetro	Valor
q_e (mg)	30.553
k ($\text{mg}^{-1}\text{h}^{-1}$)	0.00582
h (mg h^{-1})	5.429
R^2	0.9972

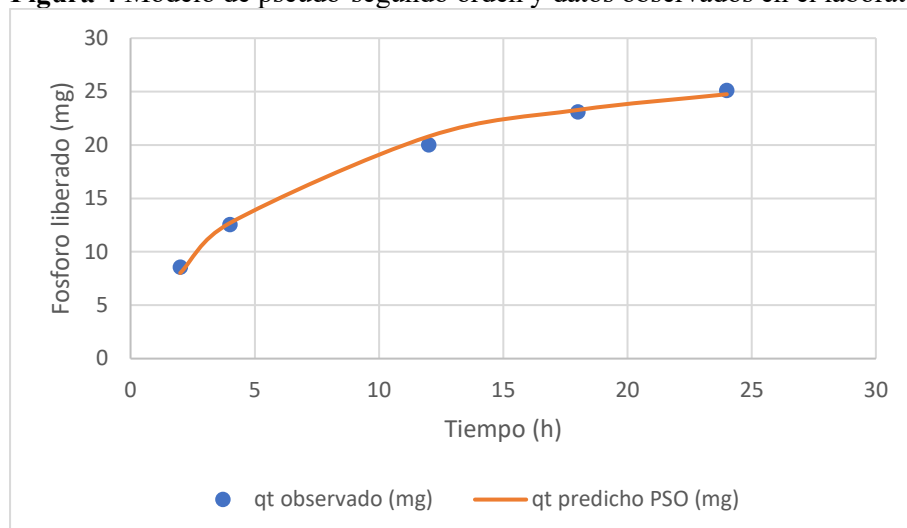
q_e = capacidad en equilibrio; k = constante cinética; h = tasa inicial; R^2 = coeficiente de determinación del ajuste.

Los parámetros se obtuvieron mediante la linealización del modelo PSO (t/qt vs. t), calculando q_e a partir de la pendiente y k a partir del intercepto, según la ecuación 1

Figura 3 Linealización de valores observados en modelo de pseudo-segundo orden

La Figura 3 presenta la transformación de los datos de cinética, empleando los valores observados en la prueba de liberación cinética

Figura 4 Modelo de pseudo-segundo orden y datos observados en el laboratorio



La Figura 4 presenta los datos experimentales (qt observado (mg)) y el modelo de pseudo-segundo orden (qt predicho PSO (mg)) empleando la ecuación 2

A continuación se discuten los resultados respecto a la calidad del agua en el lago de Amatitlán y la efectividad de la remediación propuesta. Se discuten inicialmente los parámetros fisicoquímicos y niveles de fosfatos que confirman el estado eutrófico del cuerpo de agua. Seguidamente, se evalúa el desempeño de las organoarcillas funcionalizadas (Orga-gly, Orga-lys y Orga-hys), analizando estadísticamente su capacidad de captura, los mecanismos cinéticos de liberación controlada y su viabilidad para ser reutilizadas en ciclos sucesivos.

Los parámetros analizados in situ se reportan en la Tabla 1, encontrándose que el punto de mayor riesgo eutrófico corresponde a Michatoya, esto considerando los valores de clorofila 52.45 $\mu\text{g/L}$, saturación de oxígeno 153% y pH 8.69, pues son indicativos de un crecimiento excesivo de algas (Bougarne et al., 2019), destaca además el punto de desembocadura del río Villalobos, pues este afluente está identificado por AMSA como foco de contaminación ya que arrastra desechos sólidos de diferentes puntos de la ciudad de Guatemala hasta el lago y prolifera el crecimiento de algas (AMSA, 2025), los valores encontrados son consistentes con lo reportado por Oliva et al. (2021) quienes durante el año 2020 realizaron una determinación de microplásticos en el lago de Amatitlán, reportando una alta carga de contaminantes en el cuerpo acuático.

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 2 presentan la cuantificación de fosfatos en los cuatro puntos monitoreados: Este centro (0.0478 ppm), Oeste centro (0.2260 ppm), desembocadura del río Villalobos (0.2383 ppm) y Michatoya (0.2216 ppm). De acuerdo con la clasificación de la OECD, tres de los cuatro puntos se consideran hipertróficos, siendo el valor más alto el de la desembocadura del río Villalobos, mientras que el punto Este centro, con el valor más bajo, se clasifica como eutrófico.

Este escenario coincide con estudios previos que reportan aportes significativos de contaminantes y residuos sólidos desde la cuenca del río Villalobos (Van Tuylen, 2020; Oliva et al., 2021), lo que refuerza la necesidad de estrategias sostenibles para la remediación.

La aplicación de organoarcillas funcionalizadas con aminoácidos representa una alternativa prometedora e innovadora, no solo por su capacidad de adsorción de fosfatos, sino también por la posibilidad de desorción controlada para recuperar fósforo como nutriente, contribuyendo a la economía circular y a la reducción del impacto ambiental.

Para evaluar la adsorción de fosfatos, se funcionalizaron tres organoarcillas con diferentes aminoácidos y se sometieron a agitación en una muestra de agua con concentración inicial de 0.2289 ppm, determinada mediante el método colorimétrico de vanadato/molibdato. Los resultados (Tabla 3 y Tabla 4) muestran que la arcilla sin tratamiento redujo la concentración a 0.2146 ppm, equivalente a un 6.24 % de captura (0.00143 mg de fósforo por gramo de material). En contraste, las organoarcillas lograron remociones significativamente mayores: Orga-gly (0.1477 ppm; 35.48 %), Orga-lys (0.1561 ppm; 31.81 %) y Orga-hys (0.1601 ppm; 30.06 %).

Estos valores confirman que la funcionalización incrementa la capacidad de adsorción, probablemente por la presencia de grupos amino que favorecen interacciones electrostáticas y adsorción superficial con aniones fosfato, tal como se ha reportado en estudios previos sobre arcillas modificadas (Unuabonah et al., 2017; Yakubu & Aliyu-Paiko, 2024).

La eficiencia observada en las organoarcillas funcionalizadas (30–35 % de captura) es comparable con la reportada por Peña et al. (2020), quienes lograron porcentajes cercanos al 30 % mediante la

modificación de arcillas con iones metálicos. Sin embargo, este tipo de materiales presenta limitaciones importantes en cuanto a regeneración, ya que la adsorción ocurre por precipitación o formación de complejos insolubles, lo que impide la liberación controlada del fósforo para su aprovechamiento.

Las organoarcillas sintetizadas fueron evaluadas a lo largo de tres ciclos de adsorción y liberación de fosfatos para determinar su potencial de reutilización como matrices regenerables. Los resultados (Tabla 5) muestran que la eficiencia de adsorción en el primer ciclo se mantiene en el rango de 30–35 %, con valores de liberación superiores al 78 %, lo que indica una alta capacidad para recuperar el fósforo capturado. Sin embargo, se observa un decaimiento progresivo en la eficiencia de adsorción a partir del segundo ciclo, alcanzando valores cercanos al 25–30 % en el tercer ciclo, comportamiento consistente con lo reportado por Estrada et al. (2023) en estudios previos sobre materiales funcionalizados.

Este comportamiento es consistente con lo reportado por el análisis de termogravimetría y difracción de rayos X, que evidencian interacciones de tipo electrostático y variaciones en las fases mineralógicas de las organoarcillas, indicando una mayor separación interlaminar producto del proceso de activación y funcionalización (Estrada et al., 2023).

El análisis estadístico mediante ANOVA reveló diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) en la capacidad de adsorción y liberación de fosfatos (Tablas 6 y 7) entre las muestras evaluadas y a lo largo de los ciclos de regeneración. En ambos procesos, el factor “Ciclo” mostró el mayor efecto ($F = 15,793$ para adsorción y $F = 137,748$ para liberación), lo que indica que la reutilización de las organoarcillas influye de manera determinante en su desempeño. Asimismo, la interacción entre muestra y ciclo fue significativa ($p < 0.001$).

Sugiriendo que la respuesta del material depende tanto de la composición inicial como del número de reutilizaciones. Estos resultados confirman la hipótesis de que la funcionalización con aminoácidos mejora la eficiencia del material, aunque se observa una tendencia decreciente en la adsorción tras ciclos sucesivos.

Respecto al estudio cinético la organoarcilla funcionalizada con glicina (Orga-Gly) mostró una liberación acumulada de fósforo de 25.13 mg en 24 horas (Tabla 8), a partir de una carga inicial de 30 mg/g.

El incremento rápido en las primeras 12 horas ($\approx 66\%$) seguido de una fase más lenta indica un mecanismo de liberación controlada, probablemente influenciado por interacciones ácido-base y enlaces electrostáticos entre los grupos amino y la superficie arcillosa (Brandão-Lima et al., 2022).

Este comportamiento coincide con estudios que reportan cinéticas ajustadas a modelos de pseudo-segundo orden y procesos de difusión intraparticular en materiales arcillosos modificados (Edet & Ifelebuegu, 2020; Onishi et al., 2020). Además, la funcionalización con biomoléculas como glicina puede reducir la lixiviación y prolongar la disponibilidad del fósforo, similar a lo observado en sistemas basados en bentonita y polímeros (Verma et al., 2023) y en fertilizantes encapsulados con quitosano (García-Ilizaliturri et al., 2025). Estos resultados sugieren que Orga-Gly podría mejorar la eficiencia del uso de fósforo y disminuir pérdidas por escorrentía, contribuyendo a prácticas agrícolas más sostenibles (Bao et al., 2024)

El ajuste cinético de la liberación de fósforo desde la organoarcilla funcionalizada con glicina (Orga-Gly) mostró una excelente concordancia con el modelo de pseudo-segundo orden (PSO), como se observa en la Figura 3 y la Tabla 9, donde la relación t/q_t frente a t presentó una alta linealidad ($R^2 = 0.9972$). Este comportamiento indica que el proceso está gobernado por interacciones específicas entre el fosfato y los grupos funcionales de la matriz, más que por difusión externa, lo que coincide con la interpretación original del modelo propuesto por Ho y McKay (1999).

La Figura 4 presenta la concordancia entre los valores experimentales y los predichos por el PSO, validando su aplicabilidad para describir la liberación controlada en este sistema. Los parámetros cinéticos resumidos en la Tabla 10 ($q_e = 30.553$ mg, $k = 0.00582$ mg-1h-1, $h = 5.429$ mgh-1) indican que, tras 24 h, se liberó aproximadamente el 82% de la capacidad de equilibrio, lo que confirma un perfil de liberación gradual con potencial para aplicaciones agrícolas donde se busca reducir pérdidas por lixiviación y mejorar la eficiencia del fósforo (Lakshani, et al. 2023)

Los resultados obtenidos evidencian que la funcionalización de arcillas con aminoácidos no solo mejora significativamente la capacidad de adsorción de fosfatos, sino que también permite su liberación controlada, favoreciendo la reutilización del fósforo como nutriente. Este comportamiento confirma el potencial de las organoarcillas como materiales regenerables en sistemas de remediación ambiental, contribuyendo a la reducción de la eutrofización y al aprovechamiento sostenible de recursos.

Lo que orienta futuras investigaciones hacia la optimización de procesos de regeneración, análisis de nuevas matrices de captura y la integración de estos materiales en estrategias de economía circular para la gestión de nutrientes en cuerpos de agua contaminados.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que las organoarcillas sintetizadas mediante funcionalización de bentonita con aminoácidos (glicina, lisina e histidina) presentan eficiencia en la adsorción de fosfatos en medios acuosos, alcanzando porcentajes de captura de hasta 35.48%, valores comparables con los reportados en la literatura para materiales arcillosos modificados. Esto valida su potencial como alternativa viable para la remediación de cuerpos de agua eutrofizados, como el lago de Amatitlán.

A diferencia de estudios previos realizados únicamente en condiciones controladas con soluciones sintéticas que contenían fosfatos, este trabajo aporta evidencia experimental en muestras reales de agua hipereutrófica, lo que representa un avance significativo hacia la aplicación práctica de estas tecnologías en escenarios ambientales complejos.

El estudio cinético de adsorción-desorción demostró que las organoarcillas presentan una capacidad reversible significativa para la captura de fosfatos, con porcentajes de liberación superiores al 78% en condiciones alcalinas. Esta característica, atribuida a interacciones electrostáticas débiles entre los fosfatos y las matrices orgánicas, sugiere que estas organoarcillas pueden ser reutilizadas en múltiples ciclos, lo cual representa una ventaja económica y ambiental frente a otros materiales adsorbentes inorgánicos.

Agradecimientos

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación (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. Asimismo, los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Valle de Guatemala por el valioso soporte y los aportes brindados para la realización de este estudio.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA). (2025). Unidad de Mantenimiento y Limpieza del Lago. Recuperado de <https://amsa.gob.gt/unidad-de-mantenimiento-y-limpieza-del-lago/>
- Bao, T., Damtie, M. M., Wang, C. yan, 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. <https://doi.org/10.1007/s11084-007-9072-7>
- Bektaş, T. E., Uğurluoğlu, B. K., & Tan, B. (2021). Phosphate removal by ion exchange in batch mode. *Water Practice & Technology*, 16(4), 1343–1354. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.072>
- Bougarne, L., Ben Abbou, M., El Haji, M., & Bouka, H. (2019). Carlson's Index and OECD Classification for the Assessment of Trophic Status of Bab Louta Dam. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 10(5), 878–885. <https://www.researchgate.net/publication/351733101>
- Brandão-Lima, L. C., Silva, F. C., Costa, P. V. C. G., et al. (2022). Clay mineral minerals as a strategy for biomolecule incorporation: Amino acids approach. *Materials*, 15(1), 64. <https://doi.org/10.3390/ma15010064>
- Edet, U. A., & Ifelebuegu, A. O. (2020). Kinetics, isotherms, and thermodynamic modeling of the adsorption of phosphates from model wastewater using recycled brick waste. *Processes*, 8(6), 665. <https://doi.org/10.3390/pr8060665>
- Estrada, E., Chanta, W., & Rivera, R. (2023). Evaluación de adsorción-desorción de fósforo empleando arcillas modificadas con aminoácidos y desarrollo de modelo matemático que describa su comportamiento. Informe final de investigación. Dirección General de Investigación (DIGI),



- García-Ilizaliturri, J., et al. (2025). Controlled-release phosphorus fertilizers manufactured with chitosan derivatives: An effective alternative for enhanced plant development. *Plants*, 14(4), 610. <https://doi.org/10.3390/plants14040610>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Jwaideh, M. A. A., Sutanudjaja, E. H., & Dalin, C. (2022). Global impacts of nitrogen and phosphorus fertiliser use for major crops on aquatic biodiversity. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 3113–3132. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02078-1>
- Lakshani, N., et al. (2023). Release kinetic models and release mechanisms of controlled-release and slow-release fertilizers. *ACS Agricultural Science & Technology*, 3(4), 620–635. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.2c00234>
- 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), 858. <https://doi.org/10.3390/W16060858>
- Madjar, R. M., Scăețeanu, G. V., & Sandu, M. A. (2024). Nutrient water pollution from unsustainable patterns of agricultural systems: Effects and measures of integrated farming. *Water*, 16(21), 3146. <https://doi.org/10.3390/w16213146>
- Nadagouda, M. N., Varshney, G., Varshney, V., & Hejase, C. A. (2024). Recent advances in technologies for phosphate removal and recovery: A review. *ACS Environmental Au*, 4(3), 271–291. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.3c00069>
- Oliva, B., Muñoz, M., García, D., Rosales, M., & Santos, F. (2021). *Determinación de microplásticos y tierras raras en agua y peces del lago de Amatitlán*. <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2020-56.pdf>
- Onishi, B. S. D., Ferreira, C. R., Urbano, A., & Santos, M. J. (2020). Modified hydrotalcite for phosphorus slow-release: Kinetic and sorption-desorption processes in clayey and sandy soils. *Applied Clay Science*, 197, 105759. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105759>

- Peña, K., Erreyes, T., & Guaya, D. (2020). Uso de arcillas naturales para la recuperación de fosfatos a partir de soluciones acuosas. *Axioma: Revista de Docencia, Investigación y Proyección Social*, 22, 2020 (Ejemplar Dedicado a: Revista de Docencia, Investigación y Proyección Social de La PUCE-SI), 12–17.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8361808&info=resumen&idioma=SPA>
- 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>
- Rodas-Pernillo, E., & Vasquez-Moscoso, C. A. (2020). Evaluación anual del fitoplancton y su respuesta a la calidad de agua en el lago de Amatitlán, Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 7(2), 170–188. <https://doi.org/10.36829/63CTS.V7I2.708>
- 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>
- Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). 4500-P PHOSPHORUS. In Lipps, W. C., Baxter, T. E., & Braun-Howland, E. (Eds.), 4500-P Phosphorus in Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association.
<https://doi.org/doi:10.2105/SMWW.2882.093>
- 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(2–3), 112–117. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2005.04.006>
- 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>

- 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 capture and recovery from water. *Journal of Cleaner Production*, 164, 652–663. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.160>
- Usman, M. O., Aturagaba, G., Ntale, M., & Nyakairu, G. W. (2022). A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater. *Water Science & Technology*, 86(12), 3113–3132. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.382>
- van Tuylen, S. (2020). Estado de los Cuerpos de Agua de la Cuenca del Lago de Amatitlán 2020. Informe técnico. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), Guatemala.
- 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* 2021 19(4), 3165–3180. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01239-2>
- Verma, Y., Datta, S. C., Mandzhieva, S. S., et al. (2023). Release behavior of phosphorus from bentonite clay-polymer composites with varying cross-linker levels, and neutralization degree. *Eurasian Soil Science*, 56(Suppl. 1), S214–S226. <https://doi.org/10.1134/S1064229323601476>
- Yakubu, A., & Aliyu-Paiko, M. (2024). Preparation and characterization of amino acid-modified nanoclay. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, 10(2), 45–56. <https://www.ajol.info/index.php/dujopas/article/view/281269>
- 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>