

**ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA.**

1

Adsorción de los aniones nitrato y fosfato de aguas residuales provenientes del sector agrícola: una revisión sistemática.

Frank Sebastián Villa Lobo

Mario Felipe Quevedo Lozano

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero químico

Director

Diana Paola Duarte Duarte

Doctora en Ingeniería Química

Codirector

Fernando Viejo Abrante

Doctor en Ciencia y Tecnología de materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

**ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA.**

2

Dedicatoria

Dedicado a Gloria Esther Lobo (Mi golla) y Frank Villa Torres (Mi viejo), ángeles que han acompañado mi lucha, en las buenas y en las malas, los quiero muchísimo y los llevare siempre en mi corazón.

-Frank.

Este trabajo es dedicado a mis apás, Sonia Lozano (mi moma) y Gildardo Quevedo (mi papi). Sin su apoyo, cariño, comprensión y esfuerzo, nada de lo que he conseguido sería posible. Agradezco enormemente a la vida por darme los mejores padres del mundo quienes siempre han dado todo de sí para darnos a mi hermano y a mí las mejores oportunidades materiales posibles y un afecto infinito. Gracias también a mis tíos, hermanos y prima.

-Mario.

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

3

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, a mi familia, a mis amigos y a toda aquella persona que haya sembrado un granito de amor y comprensión en mi persona. Me siento bendecido de tener en mi vida personas que se hayan tomado la molestia de apoyarme. Gracias también a Diana Paola Duarte Duarte y Fernando Viejo Abrante por su apoyo incondicional y por no temer a corregirnos cuando la ocasión lo ameritaba.

Gracias a Baruc Leal Rojas, a los miembros de la "mafia": Guillermo Martínez, Sebastian Ruiz Tortello, Sebastian Cifuentes, Andres Bolaño, Jose Cabello, Natalia Márquez, Daniel Ospina y a José "el secuestrado" Ascanio. Gracias infinitas a Mario Quevedo, por la paciencia y la amistad incondicional.

-Frank.

Hay muchos, muchísimos, a quienes debo agradecer.

Agradezco a todas aquellas personas que han creído en mí, me han apoyado y dado una mano a lo largo de los años. A mis padres y familia, gracias por la vida y las oportunidades, por todo. A Frank por los buenos y enriquecedores momentos trabajando como compañeros de tesis y amigos. Gracias a todos los profes que han aportado en mi formación profesional y académica; Diana Paola Duarte Duarte, Fernando Viejo Abrante, Edgar René Ramírez Lamus, Carlos Andrés Hernández Barrios, Norcy Gutierrez Cruz, Nohora Alicia Sanabria y Henry Ovalle. Infinitas gracias a nuestros directores de trabajo creer en nosotros y darnos la oportunidad de trabajar con ustedes, por creer en nosotros, por la paciencia y dedicación. Infinitas gracias a ambos. También mil y mil gracias a Catalina Camargo, Juliana Herrera,

**ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA.**

4

Julieth García, Andrea Turizo, Iván Suárez y Mayadir Sandoval por la inspiración que han generado en mí desde que empecé el pregrado y en los últimos años.

Mil y mil gracias a mi amada novia, Valeria Patiño Fuenmayor, por su compañía y apoyo sin titubeos a lo largo de estos 3 años que me han permitido crecer y desarrollarme en todos los ámbitos. También, por su puesto, muchas gracias a mis adorados amigos; Frank, Andrea, Shirly, Gabriel, Baruc, David, Eliana, Javier, Andrea G., Silvia, Erika, Nathalia D., Oliva, Vivian, Jorge, a “nakamas”, “triple threat triad” y a los chicos de Manejo de Fluidos. Todas las personas mencionadas han sido parte de uno o varios pilares de mi vida, por lo que pase lo que pase, las llevo en el alma.

-Mario.

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

5

Tabla de contenido

Introducción.....	14
1 Metodología	17
1.1 Búsqueda de la información	17
1.2 Selección de la información.....	18
1.3 Análisis de la información	19
2 Resultados y discusión	21
2.1 Selección de la información: resultados del protocolo PRISMA	21
2.2 Análisis bibliométrico.....	23
2.3 Análisis de los materiales adsorbentes e iones adsorbidos	26
2.3.1 Óxidos e hidróxidos de metales.....	29
2.3.1.1 Minerales	31
2.3.1.2 Óxidos e hidróxidos de metales sintéticos.....	33
2.3.2 Materiales carbonosos	36
2.3.2.1 Biocarbones	36
2.3.2.2 Otros materiales carbonosos	38
2.3.3 Materiales poliméricos y resinas de intercambio iónico	39
2.3.3.1 Biopolímeros.....	40
2.3.3.2 Resinas de intercambio iónico	40

**ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA.**

6

2.4	Análisis de las variables operativas del proceso de adsorción de nitrato y fosfato	42
2.4.1	Concentración inicial del soluto	42
2.4.2	Cantidad de material adsorbente.....	43
2.4.3	Temperatura y análisis termodinámico.....	44
2.4.4	pH del medio acuoso	46
2.4.5	Presencia de iones competencia en la solución	49
2.4.6	Métodos de recuperación del adsorbente.....	52
3	Conclusiones	55
	Referencias bibliográficas	57
	Apéndices	77

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

7

Listado de tablas

Tabla 1. Criterios de elección de información empleados para la revisión sistemática.....	18
Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda planteadas para cada base de datos y resultados obtenidos.....	21
Tabla 3. Distribución de artículos seleccionados en los periodos 2011-2015 y 2016-2021 usando el software Rayyan.....	22
Tabla 4. Países con más artículos publicados sobre la adsorción de nutrientes en cuerpos de agua.....	24
Tabla 5. Artículos más citados sobre adsorción de nutrientes en cuerpos de agua.....	25
Tabla 6. Revistas más citadas sobre adsorción de nitrato y fosfato para la mitigación de la eutrofización en cuerpos de agua.....	26
Tabla 7. Resumen de las principales variables termodinámicas analizadas en la adsorción de nitratos y fosfatos.....	45

Listado de figuras

Figura 1. Resumen de la metodología implementada.....	17
Figura 2. Resumen del proceso de búsqueda y selección de la información de acuerdo con el protocolo PRISMA.....	22
Figura 3. Esquema general las variables de salida y entrada de un proceso de adsorción.....	27
Figura 4. Distribución anual de artículos por tipo de material.....	29
Figura 5. Distribución de las capacidades máximas de adsorción de fosfato por tipo de material reportadas en los artículos leídos.....	30
Figura 6. Distribución de las capacidades máximas de adsorción de nitrato por tipo de material reportadas en los artículos leídos.....	30

**ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA.**

9

Listado de apéndices

Apéndice A: Ranking de autores por número de participaciones en los artículos abarcados
en la revisión..... 77

Apéndice B: Ranking de revistas por número de participaciones en los artículos abarcados
en la revisión..... 78

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

10

Resumen

Título: Adsorción de los aniones nitrato y fosfato de aguas residuales provenientes del sector agrícola: una revisión sistemática*

Autores: Mario Felipe Quevedo Lozano, Frank Sebastián Villa Lobo**

Palabras clave: remoción de aniones, nitrato, fosfato, adsorción, agua residual en el sector agrícola

Descripción: Debido al elevado crecimiento poblacional y demanda de alimento, el uso de fertilizantes en 2019 fue 4 veces la cantidad usada en 1960. El uso excesivo de estas sustancias, ricas en nitratos y fosfatos, causan eutrofización, fenómeno que genera el crecimiento descontrolado de algas acuáticas, resultando en hipoxia en los cuerpos hídricos. Entre los tratamientos que existen para remover estos nutrientes, se destaca la adsorción, por tener altos porcentajes de remoción, ser económico y de fácil control. En este trabajo los autores siguieron el protocolo PRISMA para realizar una revisión sistemática de literatura, publicada entre 2016 y 2021, sobre la adsorción de nitrato y fosfato en aguas residuales agrícolas. Entre los principales hallazgos se destacan que: 1) la mayoría de materiales tienen matrices basadas en estructuras carbonosas, poliméricas u óxidos/hidróxidos de metales; 2) en algunos casos su fuente puede ser económica y tener métodos de síntesis relativamente sencillos 3) poseen alta área superficial y pueden ser modificados con fases activas metálicas y orgánicas que mejoran sus propiedades adsorbentes; 4) las variables operativas son temperatura, pH del medio, concentraciones iniciales de adsorbato, iones competencia y dosis de adsorbente y 5) los mecanismos más comunes de adsorción son la interacción

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

11

electrostática entre aniones y grupos protonados en la superficie del material, y la interacción química por intercambio de ligandos y enlaces químicos. Finalmente, este trabajo permitió identificar tendencias, aspectos claves y desafíos futuros relacionados con los materiales actualmente usados para la adsorción de nitratos y fosfatos en aguas residuales del sector agrícola.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte, doctora en Ingeniería Química. Codirector: Fernando Viejo Abrante, doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

12

Abstract

Title: A systematic review of adsorbent materials for nitrate and phosphate removal from wastewater in the agricultural sector*

Authors: Mario Felipe Quevedo Lozano, Frank Sebastián Villa Lobo**

Keywords: removal of anions, nitrate, phosphate, adsorption, wastewater in the agricultural sector

Abstract. Due to the growing world population and food demand, usage of fertilizers in 2019 was 4 times the amount in 1960. The excessive use of these compounds, rich in nitrate and phosphate, causes eutrophication, a phenomenon that leads to the overgrowth of aquatic algae, which generates hypoxia in water bodies. Among the existing treatments for the removal of these nutrients, adsorption is a method that stands out because of its high removal percentages, economic feasibility and easy to control systems. In the present study, the authors followed the PRISMA protocol to carry out a systematic review of literature, published between 2016 and 2021, about adsorption of nitrate and phosphate from agricultural wastewater. Among the main findings, authors can highlight that: 1) The most used materials have matrices based on carbonaceous, polymeric or metal oxide/hydroxide structures; 2) in some cases, their sources can be inexpensive and have relatively simple synthesis methods; 3) they possess high surface areas and can be impregnated or grafted by metallic and organic active phases to improve their adsorption capacity; 4) the main operating variables are temperature, pH of the medium, initial concentration of adsorbate, competing ions and adsorbent dosage and 5) the most common adsorption mechanisms are the

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

13

electrostatic interaction of protonated groups on the material surface and anions, and adsorbent-adsorbate chemical interactions based on ligand exchange and chemical bonds. Finally, this work allowed the authors to identify trends, key aspects and future challenges related to the currently used materials for nitrates/phosphates adsorption from agricultural wastewater.

*Bachelor thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte, doctora en Ingeniería Química. Codirector: Fernando Viejo Abrante, doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Introducción

El agua es un recurso natural de suma importancia y sin ésta no podrían sobrevivir la humanidad ni la sociedad moderna. Este preciado líquido es necesario para diversas actividades, como la producción de alimentos y energía y, en general, para mantener en funcionamiento todos los sectores de la economía [1]. Gran parte de los usos que se le dan al agua generan algún grado de contaminación que debe ser retirada por medio de diferentes procesos en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que permitan la eliminación de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, sólidos suspendidos y disueltos, y microorganismos, antes de regresar el agua a los cuerpos hídricos. Sin embargo, se estima que más del 80% del agua residual del mundo es liberada al ambiente sin un tratamiento adecuado, contribuyendo así al deterioro de este recurso.- Esta problemática no se limita a países subdesarrollados, en países como Estados Unidos, Alemania o Suiza, caracterizados por su desarrollo tecnológico significativo, también se presentan cifras similares, donde solo se trata un promedio de 70% de las aguas residuales generadas -(Koncagül et al., 2017).

Particularmente, en Colombia, la cobertura de las PTAR es muy incierta y baja, pues existen apenas 712 de estos sistemas, de los cuales solo 278 presentan información exacta de la cantidad de agua que es tratada (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. & Avendaño, 2020). La falta de información sobre el tratamiento del agua residual en Colombia y en otras partes del mundo es un problema significativo debido a que no se conocen verdaderamente las cantidades totales que están siendo tratadas y vertidas directamente al ambiente sin ser procesadas, por lo que el impacto que ocasionan dichos vertimientos a los cuerpos hídricos es incierto. El problema de la contaminación hídrica no sólo se limita a la

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

15

falta de información, sino que también afecta la inadecuada disposición de sustancias contaminantes por parte de los diferentes sectores productivos, esto se observa en la insuficiente cantidad de tratamientos secundarios y terciarios que se le realizan al agua antes de ser vertidas de regreso a las fuentes hídricas (Camacho, 2020).

Por otro lado, el sector agropecuario a nivel global hace uso de aproximadamente 44% del agua total demandada, lo que en términos de caudal se traduce en un total cercano a 1716 km³/año [1]. Particularmente en Colombia, el sector agrícola, además de tener más de la mitad de la demanda hídrica del país (702,7 m³/s), hace uso de fertilizantes (1,5 MTon/año), insecticidas y pesticidas, que contienen sustancias ricas en diferentes iones de fósforo y nitrógeno, tales como el fosfato diamónico (DAP) y el fosfato monoamónico (MAP) (Torres, 2019) que, al ser utilizadas de manera excesiva, se drenan hacia lagos y fuentes hídricas por medio de la escorrentía difusa. De estos iones, el fósforo se puede presentar como especies orgánicas e inorgánicas, mientras que entre las especies nitrogenadas, el amoníaco tiene la particularidad de oxidarse para convertirse en nitrito, y este último a su vez se oxida y se convierte en nitrato. (Qiu et al., 2018)

El exceso de nutrientes en cuerpos hídricos acelera el crecimiento de microorganismos y fitoplancton, lo que se traduce en el fenómeno de la eutrofización, que se define como la disminución de la concentración del oxígeno disuelto y la obstrucción del proceso de fotosíntesis, lo que genera un desequilibrio de la cadena trófica (Forero, 2021; Luna & Issn, 2010; Qiao et al., 2019; Torres, 2019). Además, las elevadas concentraciones de estos nutrientes son un problema de salud pública. Por ejemplo, la ingesta de los iones nitrato y fosfato de las fuentes de agua potable pueden ocasionar diferentes problemas de

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

16

salud como metahemoglobinemia, teratogénesis en infantes y malformaciones, daños renales y osteoporosis (Gizaw et al., 2021; World Health Organization, 2009),(Shaman & Kowalski, 2016).

Con el fin de mitigar la eutrofización, múltiples soluciones tecnológicas se han reportado en la literatura: mecanismos biológicos, floculación, precipitación, adsorción, membranas, entre otros (Johir et al., 2016; Kumar et al., 2007; Langer et al., 2017; LIU et al., 2007; Wilsenach et al., 2007). Entre ellas se destaca la adsorción debido a su bajo costo, alta efectividad de remoción, amplio rango operativo, facilidad de operación y bajo impacto ambiental. Por medio de materiales adsorbentes se obtiene una remoción eficiente, rápida, fácil y eco-amigable de los nutrientes que ocasionan la eutrofización. (Qiao et al., 2019; Zhao et al., 2013).

Dado lo anterior, con este trabajo se busca hacer una revisión sistemática de los diferentes materiales adsorbentes para la remoción de los iones de fosfato y nitrato en aguas residuales del sector agrícola o soluciones acuosas que emulen sus características, con el fin de identificar los retos y brechas que tiene esta tecnología como una alternativa para la mitigación del fenómeno de eutrofización que actualmente está experimentando este tipo aguas residuales.

1 Metodología

La metodología efectuada para el desarrollo de este trabajo de revisión bibliográfica se resume en el paso a paso que se presenta en la Figura 1. Para llevarla a cabo, se utilizó el método de “*Elementos preferidos para revisiones sistemáticas y metaanálisis*”, más conocido como PRISMA por sus siglas en inglés. Este protocolo consiste en 27 ítems recomendados que permiten el desarrollo de revisiones sistemáticas transparentes, a las que se les puede evaluar su confianza y aplicabilidad por medio del establecimiento de criterios de selección, clasificación y análisis crítico de la información (Page et al., 2021).

Figura 1.

Resumen de la metodología implementada.

<p>1. Búsqueda de información</p> <ul style="list-style-type: none">-Definición de la pregunta de investigación.-Determinación de los criterios de elección.-Decisión de la ventana de tiempo a estudiar.	<p>2. Selección de la información</p> <ul style="list-style-type: none">-Generación de ecuaciones de búsqueda de información.-Eliminación de información duplicada.-Evaluación inicial de la información.
<p>3. Análisis de la información</p> <ul style="list-style-type: none">-Estudio bibliométrico.-Análisis de los tipos de materiales adsorbentes.-Revisión de las variables operativas de la adsorción.	<p>4. Discusión, redacción y socialización de resultados</p> <ul style="list-style-type: none">- Discusión de resultados con directores de trabajo.- Redacción del libro final y sustentación de resultados.

1.1 Búsqueda de la información

La pregunta de investigación se planteó teniendo en cuenta lo discutido en la sección 1 (Introducción) sobre la calidad del agua y los retos de los materiales adsorbentes, y se

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

18

formuló de la siguiente manera: ¿Cuáles son las tendencias en materiales adsorbentes para la remoción de fosfatos y nitrato en aguas residuales del sector agrícola y cómo las variables operativas afectan el proceso de adsorción de estos compuestos?

Teniendo en cuenta la pregunta de investigación, se plantearon las respectivas ecuaciones de búsqueda y posteriormente, se ajustaron los criterios de elección y rechazo de los artículos que, posteriormente, estarían en el informe final, así como la ventana de tiempo de publicación de los artículos. Inicialmente, se tomó como ventana de tiempo desde 2011 a 2021 y los criterios que se consideraron más acertados para la elección de la información se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Criterios de elección de información empleados para la revisión sistemática.

Criterio de elección	Criterios de rechazo
Artículos de investigación en los que el objetivo sea estudiar cómo un material (reciclado, modificado o sintetizado) realiza el proceso de adsorción de fosfato y nitrato en aguas residuales del sector agrícola.	Artículos de investigación en los que no remuevan los aniones fosfato o nitrato de medios acuosos por medio de materiales adsorbentes.
	Artículos en los que el objetivo sea el desarrollo de un modelo matemático y no se presente información experimental de la adsorción de fosfato o especies nitrogenadas en medios acuosos.
	Información no presentada en idioma inglés.
	Manuscritos de congresos y conferencias.
	Capítulos de libros.

1.2 Selección de la información

Para llevar a cabo esta investigación, se usaron las bases de datos de *Science Direct*, *Springer*, *Taylor & Francis*, *Scopus*, *Web of Science*, *ACS publications* y *Nature*, todas ellas

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

19

disponibles para los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander. Estos artículos deben contener en el título y en alguna parte del texto palabras claves como “adsorption”, “wastewater treatment”, “eutrophication”, “nitrate”, “phosphate” y “agriculture”, además de estar en inglés y cumplir con los criterios de elección establecidos en la Tabla 1. Una vez se tuvieron las ecuaciones de búsqueda establecidas, de cada plataforma se descargaron archivos formato “.RIS” que contenían el título, autores, resumen, palabras clave y referencias de los artículos. Estos archivos fueron cargados al software libre *Mendeley* para descartar los artículos duplicados (primer filtro). A continuación, el archivo con todas las referencias se exportó al software Rayyan, una página que facilita el desarrollo de revisiones sistemáticas de bibliografía gracias a que permite la lectura de títulos y resúmenes de los artículos, además del uso de etiquetas y categorías que optimizan el proceso de inclusión y exclusión de documentos por parte de los revisores. En esta página, ambos autores realizaron la evaluación inicial de la información, siguiendo los criterios de elección y rechazo presentes en la Tabla 1, y en los artículos en los que no existió consenso, los directores del trabajo actuaron como tercera parte de la discusión para una decisión final (segundo filtro).

1.3 Análisis de la información

Una vez seleccionados los artículos a estudiar, estos fueron leídos y la información recolectada se tabuló en Excel y registró en VOS Viewer para poder realizar un análisis bibliométrico teniendo en cuenta los años, autores, países y revistas en las que se publicaron. Asimismo, se organizó la información concerniente al tipo y características de los materiales adsorbentes reportados, al igual que sus retos y brechas tecnológicas, además del efecto que

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

20

tienen las variables operativas en la remoción del nitrato o fosfato de aguas residuales del sector agrícola.

2 Resultados y discusión

2.1 Selección de la información: resultados del protocolo PRISMA

El protocolo PRISMA permitió encontrar un total de 334 artículos en las bases de datos mencionadas en la Sección 2.2. En la Tabla 2 se encuentran las ecuaciones de búsqueda y los resultados obtenidos por cada una. Dicha cantidad inicial fue cargada al software *Mendeley*, donde se removieron 34 archivos duplicados y, posteriormente, se subieron a la web *Rayyan*, en la cual se leyeron todos los títulos y resúmenes para descartar 85 artículos más de acuerdo con los criterios de selección y descarte, plasmados en la Tabla 1.

Tabla 2.

Ecuaciones de búsqueda planteadas para cada base de datos y resultados obtenidos

Base de datos	Ecuación de búsqueda	# de resultados
Science direct	Título: adsorption, artículos con estos términos: adsorption AND waste AND water AND treatment AND agriculture AND eutrophication AND (nitrate OR phosphate)	138
Springer	Título: adsorption, al menos una palabra: nitrate OR phosphate, con TODAS las palabras: adsorption waste water treatment agriculture eutrophication	42
Taylor & Francis	Título: Adsorption, En cualquier parte: nitrate OR phosphate, En cualquier parte: adsorption waste water treatment agriculture eutrophication	63
Scopus	Título del artículo: Adsorption, En todos los campos: nitrate OR phosphate, En todos los campos: adsorption AND waste AND water AND treatment AND agriculture AND eutrophication	65
Web of science	Título del artículo: Adsorption, En todos los campos: nitrate OR phosphate, En todos los campos: adsorption AND waste AND water AND treatment AND agriculture AND eutrophication	4
ACS	Título: Adsorption, En cualquier parte: nitrate OR phosphate, En cualquier parte: adsorption waste water treatment agriculture eutrophication	15
Nature	Título: Adsorption, artículos que contienen estos términos: adsorption AND waste AND water AND treatment AND agriculture AND eutrophication AND (nitrate OR phosphate)	7

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

22

Total:	334
--------	-----

En vista de que el número de artículos restantes era considerablemente grande, se decidió acotar el tiempo de estudio al periodo correspondiente del 1 de enero 2016 al 27 de octubre de 2021 debido a que en estos años se encontraban el 74% de las investigaciones aprobadas previamente, como se ilustra en la Tabla 3. Seguido de ello, se accedió a los 160 artículos restantes y se leyeron para finalmente incluir 153 dentro de los análisis cualitativo y cuantitativo de la información presentada. La Figura 2 resume el proceso de búsqueda y selección de información de acuerdo con el protocolo PRISMA.

Tabla 3.

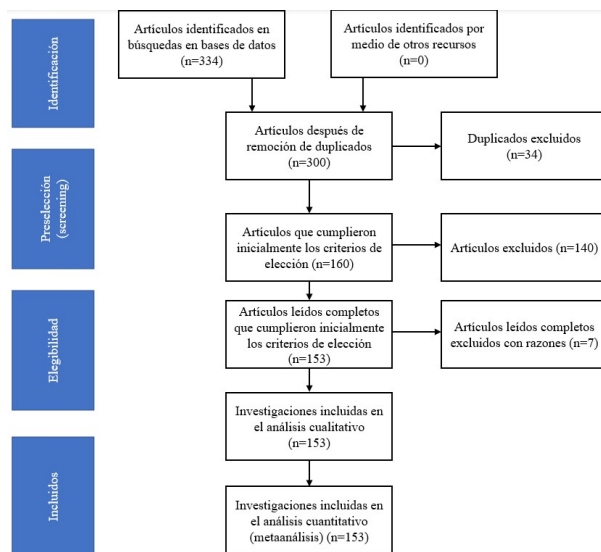
Distribución de artículos seleccionados en los periodos 2011-2015 y 2016-2021 usando el software Rayyan.

Artículos seleccionados totales 2011 -2021	215
Total seleccionados 2011-2015	55
% de seleccionados 2011-2015	26%
Total seleccionados 2016-2021	160
% de seleccionados 2016-2021	74%

Figura 2.

Resumen del proceso de búsqueda y selección de la información de acuerdo con el protocolo PRISMA.

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.



2.2 Análisis bibliométrico

Una vez organizados los artículos se procedió a realizar el análisis bibliométrico y los artículos fueron leídos completamente por los autores, obteniendo de esta manera una perspectiva general sobre la adsorción de nitratos y fosfatos en aguas residuales agrícolas.

En primera instancia, se realizó una discriminación de artículos publicados según el país de origen. Como se observa en la Tabla 4, la influencia de países asiáticos es notoria, ya que 3 de los 4 primeros países son de este continente, siendo China el más destacado con 64 artículos. Esto se debe a que China es un país muy activo académicamente, produciendo más de 426.000 artículos al año (Tollefson, 2018). Asimismo, esta tendencia en tecnologías de adsorción para la mitigación de la eutrofización podría ser provocada por los efectos que tiene este fenómeno y cómo estos se agudizan debido al aumento en la descarga de aguas residuales al medio ambiente, producto del rápido crecimiento poblacional y de la industria manufacturera (W. Liu & Qiu, 2008); así como por el elevado consumo de fertilizantes a

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

24

base de fosfato y nitrato, con más de 91 y 210 kilogramos de estos productos por hectárea de cultivo, respectivamente (Ritchie & Roser, 2013).

Tabla 4.

Países con más artículos publicados sobre la adsorción de nutrientes en cuerpos de agua.

País	Número de artículos
China	64
USA	15
India	11
Corea del Sur	10
Brasil	6
Irán	6
Japón	5
Taiwán	3
Alemania	2
Nigeria	2

Del mismo modo, se analizaron los autores con mayor participación en artículos publicados. Se encontró que *Fengxian Qiu* fue el autor con más contribuciones, con un total de 3, seguido de 43 autores con 2 aportaciones como se muestra en el Apéndice A de este trabajo. Este autor es profesor de la Escuela de Química e Ingeniería Química de la Universidad de Jiangsu de China, cuyo principal campo de investigación ha sido el desarrollo de materiales enfocados en la sostenibilidad.

Asimismo, se puede observar en la Tabla 5 que el artículo más citado fue el publicado por Li *et al* titulado “*Enhancing phosphate adsorption by Mg/Al-LDHS functionalized biochar with different Mg/Al ratios*” con 324 citaciones. Le siguen los artículos “*Phosphate adsorption using modified iron oxide-based sorbents in lake water*” por Lalley *et al* y

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

25

“*Phosphate adsorption on lanthanum loaded biochar*” por Wang et al, con 286 y 213 citas respectivamente.

Tabla 5.

Artículos más citados sobre adsorción de nutrientes en cuerpos de agua.

Autores	Número de citas
Li et al	324
Lalley et al	286
Wang et al	213
Lai et al	177
Zhu et al	168
Bombuwala et al	143
Mitrogiannis et al	135
Fu et al	123
Riahi et al	110
Jiang et al	108

Por último, se obtuvo el ranking de las revistas con mayor número de citas relacionadas con la adsorción de nitrato y fosfato de aguas residuales del sector agrícola para la mitigación de la eutrofización. En la Tabla 6 se observa que las primeras posiciones fueron para las revistas “*Chemical Engineering Journal*” y “*Science of the Total Environment*” con 625 y 585 citas respectivamente, el ranking que incluye todas las revistas que publicaron los artículos incluidos en esta revisión se encuentra en el Apéndice B.

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

Tabla 6.

Revistas más citadas sobre adsorción de nitrato y fosfato para la mitigación de la eutrofización en cuerpos de agua.

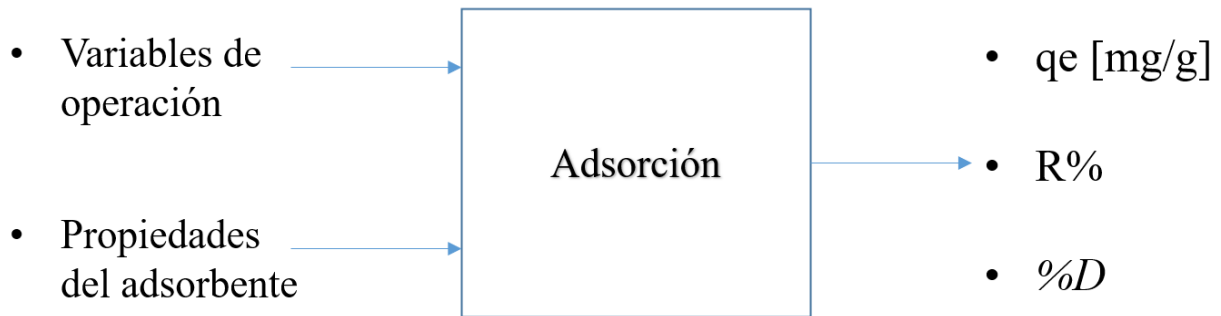
Revista	Artículos publicados	Citaciones
Chemical Engineering Journal	6	625
Science of the Total Environment	6	585
Bioresource Technology	6	473
Chemosphere	4	423
Journal of Colloid and Interface Science	4	338
Journal of Environmental Management	6	217
Waste Management	3	173
Journal of Cleaner Production	6	140
Applied Surface Science	2	122
Journal of Water Process Engineering	2	122

2.3 Análisis de los materiales adsorbentes e iones adsorbidos

La naturaleza de los adsorbentes determina sus propiedades y afinidad hacia ciertas sustancias, por lo que es necesario estudiar las propiedades de dichos materiales antes de ser utilizados en un proceso real de adsorción. Con el fin de determinar qué tan bueno es un adsorbente para remover un soluto deseado, se debe analizar una serie de parámetros, entre los que se encuentran la capacidad de adsorción del material en el equilibrio (q_e , $[\frac{mg_{soluto}}{g_{adsorbente}}]$), el porcentaje de remoción ($R_{\%}$) y el porcentaje de desorción ($D_{\%}$) del soluto. Estos parámetros son algunas de las variables respuesta del sistema y dependen principalmente de las propiedades del material y variables operativas del proceso, tal como se ilustra en la Figura 3.

Figura 3.

Esquema general las variables de salida y entrada de un proceso de adsorción.



A partir de la revisión de los 152 artículos incluidos en esta revisión bibliográfica, se discrimina la información por la clasificación de los materiales utilizados y los iones analizados. Los materiales adsorbentes reportados en los artículos se pueden clasificar en cuatro categorías según la composición de su matriz: materiales carbonosos, óxidos e hidróxidos de metales, polímeros y resinas de intercambio iónico, y redes metal-orgánicas (MOF). Para realizar esta clasificación, se tuvo en cuenta que en los artículos mencionaran explícitamente que se estaba utilizando un adsorbente de cierto tipo o que concluyeran por medio de pruebas de caracterización que los materiales utilizados tenían fases o composiciones químicas muy cercanas a cada tipo.

En total, se encontraron 154 materiales que pueden ser clasificados dentro de las categorías propuestas, siendo el número total de materiales mayor que el número de artículos (152) debido a que en dos artículos se usaron dos tipos de materiales catalogados en dos categorías distintas. En cuanto a los iones estudiados, en 112 artículos realizan únicamente adsorción de fosfato, en 13 de nitrato y en 7 de amoníaco, dando un total de 132. En los 20 artículos restantes realizan estudios de adsorción de los dos iones, ya sea de forma simultánea

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

28

o analizando de forma independiente cada uno con el mismo material. Además, cada material genera un valor distinto de capacidad máxima de adsorción hacia cada ion. A continuación, en el texto se presenta información sobre la clasificación de los materiales y su eficiencia de remoción hacia los iones objetivo. La distribución de materiales para la adsorción de nitrato y fosfato reportados en los artículos por año de publicación se encuentra en la Figura 5. En esta se puede observar que los óxidos e hidróxidos de metales han sido utilizados a lo largo de los años, mientras que en los últimos 3 años los materiales carbonosos tuvieron un incremento significativo, llegando a superar en cantidad a los previamente mencionados. También se observa que el uso de polímeros y resinas de intercambio iónico no presentó un crecimiento considerable, y las MOF nunca fueron tendencia de estudio en este campo.

En total se reportaron 132 capacidades máximas de adsorción de fosfato y 37 de iones nitrogenados. La distribución de capacidades máximas de adsorción por tipo de material, así como el valor de capacidad de adsorción por cada tipo de ion, ya sea nitrato o fosfato se muestran en las Figuras 6 y 7, respectivamente. Se puede observar en la Figura 5 que los óxidos e hidróxidos de metales son los materiales más utilizados para remover fosfato; sin embargo, los materiales carbonosos presentan la mayor capacidad de adsorción de fosfato entre todos los tipos de adsorbentes, siendo esta de 351,4 mg P/g. De igual forma, es claro que los polímeros y resinas de intercambio iónico y redes organometálicas no fueron tendencia de uso en el área en los últimos 6 años.

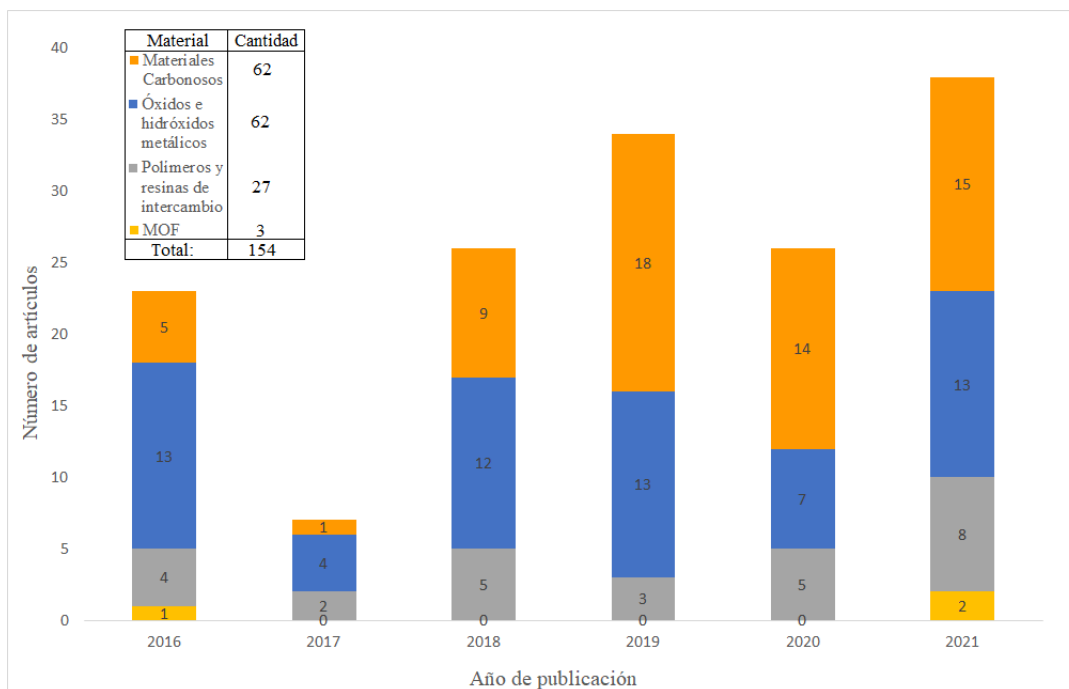
De manera similar, en la Figura 6 se observa que los materiales carbonosos son los que presentan el valor más alto de capacidad máxima de adsorción de nitrato, siendo ésta de 277,78 mg/g. Igualmente, se ve que las MOF son los materiales menos utilizados y, contrario

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

a la adsorción de fosfatos, el segundo tipo de adsorbente con más tendencia de uso son los polímeros y resinas de intercambio iónico, por encima de los óxidos e hidróxidos de metales. Información específica sobre las características, propiedades y efectividad de remoción que posee cada tipo de material se presenta a continuación en el texto.

Figura 4.

Distribución anual de artículos por tipo de material.



2.3.1 Óxidos e hidróxidos de metales

Una de las tendencias observadas en la literatura, es el uso de óxidos e hidróxidos de metales para la remoción de nitrato y fosfato. Estos materiales son una alternativa para combatir la eutrofización ya que las especies metálicas de su superficie permiten la interacción química y electrostática con los iones del medio acuoso (Sellner, Hua, Ahiablame, et al., 2019),(D. Wang et al., 2016). Dichos adsorbentes pueden ser de origen natural (minerales) o sintéticos, y dependiendo de la composición que tengan, pueden tener

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

mayores o menores capacidades de adsorción. En total, se encontraron 62 materiales que caben dentro de esta categoría.

Figura 5.

Distribución de las capacidades máximas de adsorción de fosfato por tipo de material reportadas en los artículos leídos.

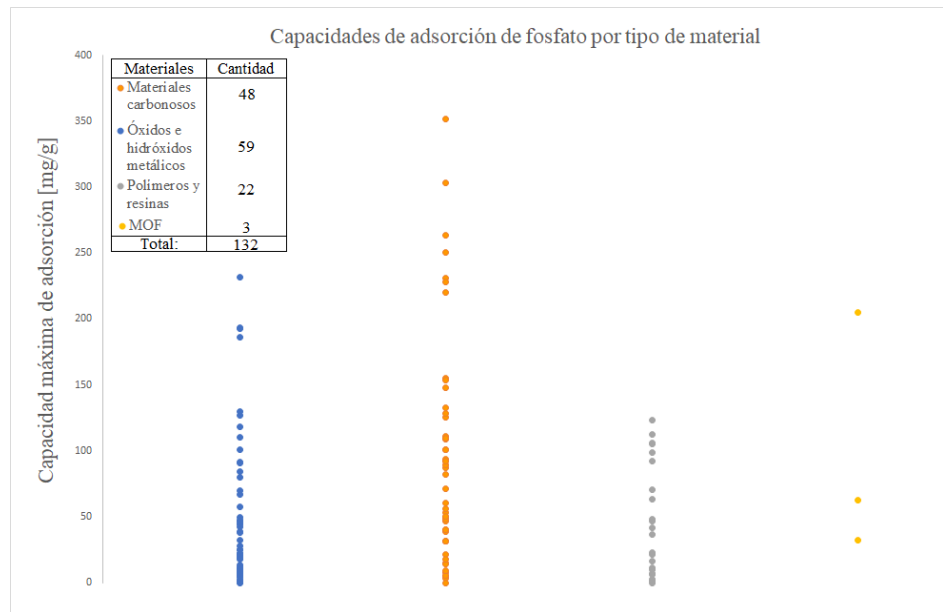


Figura 6.

Distribución de las capacidades máximas de adsorción de nitrato por tipo de material reportadas en los artículos leídos.

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.



2.3.1.1 Minerales

Los minerales son sustancias inorgánicas presentes en la naturaleza que tienen características cristalinas y fisicoquímicas específicas, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su cristalinidad y contenido de silicatos (Karathanasis, 2006). Estos materiales han sido utilizados para adsorber nitrato y fosfato de aguas residuales agrícolas por su elevada disponibilidad lo que permite obtenerlos de manera económica (Chmielewská et al., 2016),(Fu et al., 2018) y debido a que pueden alcanzar capacidades de adsorción considerablemente altas dependiendo de su composición de hierro, aluminio y calcio, entre otros cationes metálicos que permiten las interacciones físicas y químicas con los aniones del medio (Coulibaly et al., 2016),(F. Li et al., 2016). El óxido de silicio es un componente abundante en este tipo de materiales y permite que el adsorbente sea estable en un amplio rango de pH (L. Lai et al., 2016), pero que impide que los nutrientes del agua interactúen

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

32

adecuadamente con otros componentes activos de la superficie, como el aluminio, hierro y magnesio. Materiales naturales como la arenisca, laterita, zeolitas-clinoptilolitas y paligorskita tienen capacidades de adsorción de fosfato y nitrato bajas (0,055-0,833 mg P/g y 2 mg N/g, respectivamente) porque tienen altos contenidos de óxido de silicio (Coulibaly et al., 2016),(F. Li et al., 2016),(Uygur et al., 2017). Asimismo, adsorbentes con abundantes óxidos y especies de calcio, como el mármol en polvo, pueden llegar a tener capacidades de adsorción mayores a 40 mg/g, gracias a que precipitan fosfato en su superficie (Bouamra et al., 2018a).

Por otra parte, los minerales pueden ser modificados con diferentes tratamientos con el fin de mejorar sus propiedades adsorbentes. Por ejemplo, existen tratamientos térmicos, impregnaciones de grupos funcionales y baños ácidos que aumentan la capacidad del adsorbente para remover iones disueltos. De esta manera, la calcinación de bauxita rica en titanio (TRB) a 450°C incrementó su capacidad de adsorción en un 45% debido a que disminuyó la cantidad de agua estructural que tenía y aumentó el número de sitios activos y proporción de aluminio, hierro y titanio (Behera & Das, 2016). De forma análoga, impregnar lantano sobre una muestra de magnetita permitió incrementar su capacidad de adsorción de fosfato en 28 veces su valor original debido a que los hidróxidos y óxidos de lantano formados en la superficie tienen una gran afinidad hacia el fosfato al ser considerados aceptores de electrones (Fu et al., 2018). Asimismo, bañar paligorskita en una mezcla de ácidos sulfúrico y clorhídrico permitió incrementar sus capacidades de adsorción de fosfato en 188 veces su capacidad inicial, gracias a los cambios en el área superficial y tamaño del poro que experimenta la superficie (F. Li et al., 2016).

2.3.1.2 Óxidos e hidróxidos de metales sintéticos

En contraste con los minerales, los óxidos e hidróxidos de metales sintéticos pueden ser diseñados para poseer propiedades específicas. Estos adsorbentes se presentan en los artículos como productos comerciales de alta pureza o como materiales sintetizados por los autores a través de un método o ruta de síntesis especificados (Q. Wang et al., 2016),(Hsu et al., 2019). El diseño de un adsorbente se hace con el fin de obtener un material capaz de adsorber un soluto deseado de forma eficiente y que sea estable en un amplio rango de condiciones operativas. Por ejemplo, en el estudio de Drenkova-Tuhtan et al. (Drenkova-Tuhtan et al., 2016), se concluye que de los adsorbentes evaluados, solo los hidróxidos de metales con gran cantidad de hierro, aluminio, zinc y calcio tienen porcentajes de remoción y capacidades máximas de adsorción de fosfato mayores a 90% y 45 mg P/g, respectivamente, además de ser estables químicamente en soluciones con pH mayor a 11 (Drenkova-Tuhtan et al., 2016).

Los adsorbentes sintéticos tienen propiedades especiales respecto a sus contrapartes naturales. Entre éstas se encuentran poseer una mayor capacidad de adsorción, ser capaces de remover simultáneamente más de un ion o tener menor afectación en presencia de iones competencia. Es así como la magnetita preparada por el método de coprecipitación llega a tener una capacidad de adsorción de 11,2 mg P/g, siete veces mayor que la magnetita mineral (Fu et al., 2018),(L. Lai et al., 2016). Análogamente, un bióxido metálico de aluminio y manganeso impregnado con grupo funcionales orgánicos, OABO (organic-modified aluminium-manganese bimetal oxide), tiene la capacidad de adsorber al tiempo un máximo de 19,45 mg de nitrato y 33,16 mg de fosfato por gramo de adsorbente gracias a la interacción

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

34

de dichos iones con los grupos funcionales hidroxilo y amino de la superficie sólida, respectivamente (K. Wu et al., 2019a). Del mismo modo, se han utilizado bentonita y goetita sintéticas que pueden ser usadas como adsorbentes de fosfato, destacando que sus capacidades de adsorción no se ven afectadas significativamente por la presencia de iones competencia como el sulfato (Lalley et al., 2016), (Mdlalose et al., 2019).

Por otra parte, hay óxidos e hidróxidos de metales que se obtienen a partir de subproductos de procesos industriales. Dichas sustancias pueden ser recicladas a través de un proceso leve o complejo de pretratamiento para ser aprovechadas como adsorbentes. Entre los pretratamientos leves reportados, se encuentran limpiezas con agua desionizada para remover partículas finas de la superficie, secar el material al aire libre y mezclar éste con un agente aglomerante y/o arcilla para producir pellets. En las investigaciones de Sellner et al (Sellner, Hua, Ahiablame, et al., 2019), (Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019) se utilizaron los dos primeros pretratamientos mencionados para limpiar las superficies de la escoria de acero, la viruta y limadura de hierro antes de ser usadas como adsorbentes. Esto permitió que no hubiera presencia de partículas finas y se creara una capa de óxido en la superficie que permitió la generación de interacciones con el fosfato, alcanzando así capacidades de adsorción en el rango de 4,95 y 8,43 mg P/g (Sellner, Hua, Ahiablame, et al., 2019), (Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019) . De modo similar, Zhou H. et al 2019 (Zhou et al., 2019) realizó un proceso de peletización a las cenizas volantes (FA) y de fondo (BA), producidas como subproducto de la quema de carbón en plantas termoeléctricas, antes de usarlas como adsorbentes de fósforo, logrando remover hasta 2,56 mg P/ g (Zhou et al., 2019).

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

35

En contraste, los pretratamientos complejos descritos en la literatura incluyen usar sales, ácidos o bases, agitación y calentamiento para modificar el material reciclado, o de éste aislar los componentes deseados a usar como adsorbentes. Es así como en el trabajo de Lai Y. et al 2016 (Y. Lai et al., 2016), el humo de sílice de litio (LSF) es sometido a tratamientos químicos con carbonato de sodio (Na_2CO_3) y cloruro férrico hidratado ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) con posterior secado a 105 °C para modificar su superficie con óxidos de hierro ($LSF/FeCl_3$). La presencia de estos óxidos en la superficie del material reciclado incrementó en cuatro veces su área superficial y casi tres veces la capacidad máxima de adsorción de fosfato (13,39 mg/g) -(Y. Lai et al., 2016). De forma similar, Li F et al 2016 (F. Li et al., 2016) reportó la modificación de la ceniza voladora (FA) con ácidos sulfúrico y clorhídrico, lo cual diluyó la mayor parte de las estructuras amorfas de sílice de la superficie del material. Esta disminución en la sílice generó nuevos grupos OH^- que interactuaron con el fosfato del medio, permitiendo así incrementar la capacidad de adsorción máxima a 10,5 mg P/g, 17 veces la capacidad inicial (F. Li et al., 2016). De la misma manera, el lavado de bauxsol con ácido clorhídrico permitió aumentar el área superficial y tamaño de poro del material, debido a la transformación y disolución parcial de algunas estructuras de óxidos de hierro, como la hematita y goetita, hacia cloruro de hierro. Además, el incremento del porcentaje másico de especies de hidróxidos de aluminio como la gibbsita ($Al(OH)_3$) generó que el adsorbente modificado alcanzara una capacidad de adsorción de fosfato de 192,94 mg/g (Ye et al., 2016), casi ocho veces el valor inicial de capacidad previo a la modificación del material. Finalmente, en el artículo de Yoon H. et al 2017 (Yoon et al., 2018) describen el uso de peróxido de hidrógeno y aireación para tratar una solución de sulfato férrico, subproducto de

la lixiviación de neodimio usando ácido sulfúrico, para obtener hidróxido de hierro y usarlo como adsorbente para remover fosfato, con una capacidad de adsorción máxima de 130 mg/g (Yoon et al., 2018).

2.3.2 Materiales carbonosos

Los materiales carbonosos han sido históricamente usados, entre otras razones, para producir calor y para la rectificación de suelos, ya que estos permiten mejorar su estructura aumentando la retención de líquido, fertilidad y el crecimiento de cultivos (J. Zhang et al., 2021a),(Kang et al., 2021),(Ohji, 2013). Por otra parte, han sido utilizados también como adsorbentes para la remoción de contaminantes en aguas residuales, debido a su simplicidad de producción, elevada área superficial y densidad de carga (Kang et al., 2021).

2.3.2.1 Biocarbones

Existen métodos alternativos a la adsorción para la eliminación de nutrientes en exceso de las aguas residuales; sin embargo, estos requieren grandes cantidades de reactivos que pueden generar contaminación secundaria y difícilmente se pueden aprovechar subproductos de dichos procesos (J. Zhang et al., 2021a). Por esta razón, los materiales carbonosos representan una alternativa factible para la mitigación de este problema. Un ejemplo de este tipo de materiales es el bio-carbón, una sustancia negra, ligera, porosa y rica en carbono, que posee una estructura aromática con una resistencia térmica y biológica notoria. Esta se obtiene por pirólisis a altas temperatura de biomasa en condiciones limitadas de oxígeno(T. Wang et al., 2021). Múltiples tipos de biomasa pueden ser utilizadas para la

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

37

fabricación del bio-carbón, tales como cáscara de café, paja de canola, hojas de sésamo, mazorcas, residuos de hongos, etcétera (J. Zhang et al., 2021a),(Yiyi Deng et al., 2020).

Aunque tiene unas excelentes propiedades fisicoquímicas, el bio-carbón presenta poca afinidad hacia contaminantes aniónicos (fosfato, nitrato, arseniato, entre otros), debido a la presencia de grupos funcionales de oxígeno y carga superficial negativa (Yu Deng et al., 2021), -por lo cual el material debe ser modificado (Kang et al., 2021). Dichas modificaciones pueden ser químicas, agregando iones a la superficie del material para cambiar la carga superficial y/o introduciendo grupos funcionales; o físicas a través de carbonización y activación con vapor de agua y dióxido de carbono, para modificar la estructura de los poros y su distribución [47],[50].

Estas modificaciones resultan necesarias para alcanzar niveles aceptables de adsorción, por ejemplo, la modificación de un bio-carbón con metales como el magnesio (Mg) o aluminio (Al) pueden aumentar drásticamente su capacidad de adsorción hacia el fosfato. Un caso particular es el del bio-carbón sintetizado a partir del raquis de maíz, en el cual se evidencia un aumento en el área superficial (aumentando de 6 a 7 veces según la cantidad de Mg y Al adicionado) y en la carga superficial, así como un aumento en el número de grupos funcionales en la superficie. Todos estos cambios en la estructura del material se traducen en un aumento en la capacidad de adsorción de 29 y 26 veces para el magnesio y el aluminio respectivamente (Yu Deng et al., 2021). Del mismo modo, se puede optar por otros metales y otras fuentes de materia orgánica, como la modificación de bio-carbón obtenido de paja de colza con carbonato de calcio, pasando de una capacidad de adsorción de 2,36 mg/g en su estado prístino a 103,3 mg/g luego del tratamiento con calcio, lo que significa un

incremento de 43 veces su valor original (Cao et al., 2020). Un uso importante para este tipo de materiales es como fertilizantes, como es el caso del bio-carbón sintetizado a partir de digestato, un subproducto de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, que con la inclusión de nitrógeno, fósforo y potasio, durante el proceso de adsorción, permite capitalizar este material, ya que mejora las propiedades del suelo además de aportar los nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas (Alberto et al., 2021).

2.3.2.2 Otros materiales carbonosos

La mayoría de los materiales carbonosos reportados en la literatura son biocarbonos sintetizados a través de pirólisis de distintos tipos de biomasa. Sin embargo, también se reportaron algunos subproductos industriales que tienen considerable contenido de carbono, biomasa sin pirolizar y nanomateriales carbonosos como potenciales adsorbentes de nitrato y fosfato. En el trabajo de Rout et al 2016 (Rout et al., 2016) utilizaron dolochar, un residuo de la producción industrial de hierro de reducción directa (sponge iron), como adsorbente de nitrato y fosfato presentes en medios acuosos. Este material alcanzó la mayor capacidad máxima de adsorción de fosfato, 351,4 mg/g, gracias a que su elevada área superficial 63,43 m^2/g y composición mineralógica le permitió remover fosfato de la solución a través de atracción electrostática e intercambio de ligandos (Rout et al., 2016). Por otra parte, Mathurasa et al 2018 (Mathurasa & Damrongsiri, 2018) y Djantio et al 2019 (Djantio et al., 2019) reportaron el uso de cáscara de arroz modificada con el surfactante bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB-RH) y residuo de mijo derivado de la producción de una bebida hindú para la adsorción de nitrato y fosfato, respectivamente. En estas investigaciones obtuvieron capacidades de adsorción de 277,78 mg/g de nitrato y 48 mg/g de fosfato, siendo

la mayor capacidad de adsorción de nitrato encontrada en los artículos revisados (Djantio et al., 2019),(Mathurasa & Damrongsiri, 2018). Por último, se reportan también nanomateriales como el óxido de grafeno y los nanotubos de carbono, los cuales se caracterizan por ser materiales altamente activos por su intrincada estructura de capas, resistencia mecánica, gran área superficial, y sobresalientes propiedades fisicoquímicas, llegando a obtener porcentajes de remoción de nitrato y fosfato de 71,19 y 94,81 mg/g, respectivamente (Moradi & Zare, 2013),(Y. Wang et al., 2019),(Perveen et al., 2021). Sin embargo, estos materiales presentan problemas de agregación debido a su pequeño tamaño y presentan afectación cuando en la adsorción hay presencia de iones de cloruro, bicarbonato y sulfato(Y. Wang et al., 2019),(Perveen et al., 2021).

2.3.3 Materiales poliméricos y resinas de intercambio iónico

Los polímeros se definen como macromoléculas orgánicas formadas por cadenas de monómeros que se repiten de forma intrincada. Dichas cadenas pueden unirse con otras redes para dar resultado a materiales con características únicas (Kamrin, 2014). Estos materiales se pueden presentar como polímeros, biopolímeros o resinas de intercambio iónico, diferenciándose principalmente por su origen sintético o natural. Este tipo de materiales han sido utilizados como adsorbentes en estudios de remoción de nutrientes de aguas residuales, y llaman la atención porque permiten alcanzar porcentajes de remoción y capacidades de adsorción altas (Yan Wu et al., 2016),(Suzaimi et al., 2020). A continuación se detallan brevemente las subcategorías de estos adsorbentes y sus usos en la remoción de nitrato y fosfato en aguas residuales agrícolas.

2.3.3.1 Biopolímeros

Los biopolímeros son materiales atractivos debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad, naturaleza inofensiva y bajo costo (Karthikeyan & Meenakshi, 2021), (Zarabi & Jalali, 2018b). Subproductos agropecuarios ricos en celulosa, como el residuo de canola y los compostajes municipales, se han utilizado como adsorbentes de iones de amonio, alcanzando remociones hasta de 10,5 mg/g y estabilidad en grandes rangos de pH (Zarabi & Jalali, 2018a). En contraste con estos, en la literatura también se han reportado biopolímeros modificados con el fin de alcanzar mejores propiedades mecánicas y químicas y capacidades de adsorción elevadas (Rajeswari et al., 2016). El chitosán encapsulado en esferas de caolín magnético alcanza capacidades máximas de adsorción de 92,05 y 74,11 mg/g para fosfato y nitrato, respectivamente, valores considerablemente superiores a los casi 5 mg/g que alcanza el chitosán natural para ambos iones (Karthikeyan & Meenakshi, 2021). También se conoce que la lignina funcionalizada con polietilenimina y magnetita logra 46,40 mg/g de adsorción de fosfato, 20 veces más que la lignina natural (Luo et al., 2017).

2.3.3.2 Resinas de intercambio iónico

Por otra parte, entre la clasificación de adsorbentes poliméricos, también se encuentran las resinas de intercambio iónico. Son pocos los trabajos que reportan este tipo de materiales: de los 27 artículos que reportan adsorbentes poliméricos, solo en cuatro hacen uso de las resinas, de las cuales dos se usan para adsorber nitrato y el resto para fosfato. De las resinas encontradas en los artículos leídos, tres son compradas de compañías especializadas y una es sintetizada por los autores. Con estos materiales existe el reto de conseguir procesos que tengan una buena relación calidad-precio (Kalaruban et al., 2016),

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

41

porque no se pueden obtener reciclando -subproductos de procesos industriales, por lo que requieren de complejos y costosos métodos de síntesis (Song & Li, 2019), (Hauda et al., 2020),(Samco tech co., 2017).

Las resinas de intercambio iónico consisten en redes poliméricas, comúnmente basadas en poliestireno a las cuales se les pueden realizar modificaciones para mejorar sus propiedades adsorbentes. En el estudio de Wu et al (Yan Wu et al., 2016), -se agregaron grupos funcionales de amonio cuaternario y aminas a una red de poliestireno reticulada con cloro-metilo, permitiéndole así a la resina operar en un amplio rango de pH y alcanzar una capacidad máxima de adsorción de nitrato de 211,81 mg/g-. De forma análoga, en el artículo de Kalaruban et al_(Kalaruban et al., 2016), se impregnaron iones de hierro a una resina comercial rica en grupos cuaternarios de metil-amina (Dowex 21K XLT), lo cual generó que el material alcanzara una capacidad adsorbente de 75,3 mg N/g, más de dos veces el valor de la resina prístina (Kalaruban et al., 2016). Por su parte, Juntarasakul O. et al 2020 (Juntarasakul et al., 2020) también reportó que la adición de iones de hierro a la superficie de la resina de intercambio catiónico comercial, llamada UBK 10, permitió que el material removiera más del 50% del fosfato presente en el medio (Juntarasakul et al., 2020). Finalmente, Song M. et al 2019 (Song & Li, 2019) reportaron el uso de una resina magnética de intercambio aniónico (MAEX) comercial que logró adsorber cerca de 2,4 mg P/g (Song & Li, 2019).

2.4 Análisis de las variables operativas del proceso de adsorción de nitrato y fosfato

Las variables operativas de que afectan la adsorción de nitrato y fosfato son la concentración inicial del soluto (C_0), cantidad de adsorbente usada (m), concentración de iones competencia presentes, temperatura (T) y pH del medio acuoso. Algunas de estas variables tienen una profunda relación entre sí, por lo que conocer los rangos y valores adecuados de éstas, a la vez que se usa un adsorbente apropiado, permite que la eliminación de un contaminante del medio, como los iones de nitrato y fosfato en aguas residuales, alcance los niveles necesarios para mitigar el impacto ambiental y la eutrofización.

2.4.1 Concentración inicial del soluto

La concentración inicial de nitrato o fosfato en el medio acuoso es un parámetro operacional de suma importancia que debe ser analizado, ya que afecta diferentes variables a lo largo del proceso, como la concentración en el equilibrio, capacidad de adsorción, porcentaje de remoción y el tiempo de operación en procesos continuos (H. Yang et al., 2016). A bajas concentraciones el porcentaje de remoción es alto debido a la disponibilidad suficiente de sitios activos para cada uno de los iones en solución. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración del adsorbato, la demanda por sitios activos es gradualmente mayor, al mismo tiempo que la oferta de sitios activos es limitada, lo que se traduce en una disminución del porcentaje de remoción. Desde otro ángulo, a diferencia del porcentaje de remoción, la capacidad de adsorción aumenta a medida que se aumenta la concentración de adsorbato en el medio hasta llegar a la concentración máxima que genera saturación de los sitios activos. Este incremento es debido a la diferencia de concentración, que acelera el

proceso de difusión de adsorbato hacia la superficie del adsorbente a la vez que aumenta el número de colisiones de los iones de adsorbato con la superficie del material, resultando en capacidades de adsorción elevadas. (Pala et al., 2021),(Perveen et al., 2021). Este incremento sigue hasta que se llega a la capacidad de saturación del material y, a partir de ahí, la cantidad de soluto removido llega a un valor constante (Aswin Kumar & Viswanathan, 2019),(Kondalkar et al., 2019).

2.4.2 Cantidad de material adsorbente

En teoría, la eficiencia en la remoción de contaminantes es proporcional a la cantidad de adsorbente utilizado. Sin embargo, si el material es usado en exceso los costos aumentan significativamente, haciendo inviables sus aplicaciones prácticas. Por el contrario, si la cantidad de adsorbente es insuficiente, no se tendría un efecto significativo, por lo tanto, se debe escoger la cantidad de adsorbente adecuada para retirar la mayor cantidad de iones disueltos en el medio (J. Zhang et al., 2021b).

El porcentaje de remoción (%R) aumenta a medida que aumenta la dosis de adsorbente. El aumento de la cantidad de adsorbente implica más sitios activos que están en contacto con el adsorbato, lo que facilita su interacción con el adsorbente (Karthikeyan & Meenakshi, 2021),(Son et al., 2021),(Xi et al., 2021). Por lo general, se llega a un punto en el que el porcentaje de remoción no crece más debido a que el material se satura y la mayoría de los iones en la solución son adsorbidos (Yuan et al., 2021). Del mismo modo, la capacidad de adsorción (q_e) disminuye, ya que al aumentar la cantidad de adsorbente en el medio, la competencia por adsorber un ion del adsorbato, entre los grupos funcionales disponibles en

la superficie del material, aumenta de manera considerable, lo que ocasiona una disminución en la actividad del material (Abdolmaleki et al., 2021).

2.4.3 Temperatura y análisis termodinámico

La temperatura resulta ser una variable muy importante durante el proceso de adsorción ya que controla la cinética y la interacción del material con los iones que lo rodean. Con el incremento de la temperatura los iones de adsorbato se mueven más rápidamente en el medio, además de que los poros del material pueden dilatarse, permitiendo un mayor movimiento hacia la matriz y una interacción más cercana con los sitios activos, lo que se traduce en un aumento en la capacidad de adsorción (Pala et al., 2021).

Si bien el aumento de la temperatura facilita la movilidad de los iones de fosfato al disminuir la viscosidad de la solución e incrementar la difusividad, en casos particulares se puede apreciar una reducción en la capacidad de adsorción cuando ésta aumenta. En el estudio de Yang et al 2021 (Y. Yang et al., 2021) se pudo apreciar una disminución del 12,5% en la capacidad de adsorción máxima de la zeolita comercial ZMS-5, al incrementar la temperatura de 30°C a 50°C, demostrando así que el fenómeno de adsorción es sensible a factores tanto cinéticos como termodinámicos (Y. Yang et al., 2021). Al mismo tiempo, el incremento de la temperatura también podría ocasionar cambios en la estructura cristalina del material y, de esta manera, afectar su rendimiento. Tal es el caso del MIL-101, un tipo de material de red organometálica que presenta una disminución en la capacidad de adsorción al aumentar la temperatura en todas las combinaciones de modificaciones estudiadas (cobre, hierro y óxido de grafeno) (You Wu et al., 2021).

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

Durante esta revisión se encontró que en muchas investigaciones se estimaban las variables termodinámicas del proceso de adsorción. Cada una de las variables calculadas permitió adentrarse en el fenómeno y entender mejor su comportamiento en líneas generales. En la Tabla 7 se explica cada una de estas variables y lo que representan durante el proceso.

Tabla 7.

Resumen de las principales variables termodinámicas analizadas en la adsorción de nitratos y fosfatos.

Variable	Valor < 0	Valor > 0
Gibbs. ΔG°	Proceso espontáneo	Proceso no espontáneo.
Entropía. ΔS°	El desorden al nivel de la interfase sólido-líquido disminuye durante el proceso de adsorción	El desorden al nivel de la interfase sólido-líquido aumenta durante el proceso de adsorción. Alta afinidad del ion con el material.
Entalpía. ΔH°	Proceso exotérmico	Proceso endotérmico

Para calcular estas variables se siguen las ecuaciones que se presentan a continuación (Nhiem et al., 2021). El coeficiente de distribución (K_d) que es calculado así:

$$K_d = \frac{C_i - C_e}{C_e} \quad (Ec. 1)$$

donde C_i y C_e son las concentraciones del adsorbato al inicio de la adsorción y una vez se llega al equilibrio. Luego se utilizan las dos definiciones del delta de energía libre de Gibbs para llegar a un modelo linealizado.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T * \Delta S^0 \quad (Ec. 2)$$

$$\Delta G^0 = -R * T * \ln (K_d) \quad (Ec. 3)$$

donde ΔG^0 es el diferencial de energía libre de Gibbs, ΔH^0 el diferencial de entalpia y ΔS^0 el diferencial de entropía. Las ecuaciones se ajustan y linealizan para llegar al siguiente modelo:

$$\ln(K_d) = -\frac{\Delta H^0}{R * T} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (Ec. 4)$$

Finalmente, con el gráfico de $\ln(K_d)$ contra $\frac{1}{T}$ se encuentran los valores de ΔH^0 y ΔS^0 .

2.4.4 pH del medio acuoso

El pH del medio en el que sucede la adsorción puede generar que el material no sea estable y no alcance una capacidad de adsorción deseada. El pH de la solución puede ocasionar un incremento o disminución de la remoción del adsorbato al fortalecer o inhibir las interacciones físicas y químicas que éste tiene con la superficie del material (Rajeswari et al., 2016), (D. Wang et al., 2016). Adicionalmente, la presencia de iones H^+ y OH^- también se ven afectadas por los cambios de pH (Yan Wu et al., 2016),(Behera & Das, 2016).

La estabilidad de los adsorbentes depende enormemente del pH de la solución, pues parte de los grupos funcionales de estos, naturalmente presentes en su matriz o por modificaciones superficiales, pueden llegar a disolverse en el medio. A condiciones de pH ácido, adsorbentes ricos en iones metálicos se vuelven inestables y lixivian dichos metales al medio, como fue reportado en los estudios de Shams M. 2016 (Shams et al., 2016), Lai Y. 2016 (Y. Lai et al., 2016), Lai L. 2016 (L. Lai et al., 2016) y Yang B. 2018 (B. Yang et al., 2019), donde los iones de zinc, hierro y lantano se diluyen de la superficie a valores de pH

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

47

menores que 2,7, 3 y 5, respectivamente (L. Lai et al., 2016),(Shams et al., 2016),(B. Yang et al., 2019). De la misma forma, materiales poliméricos como las esferas de alginato y la lignina se vuelven inestables en medios alcalinos ($pH > 7$) porque se disuelven parcialmente en estos (H. Yang et al., 2016), (Luo et al., 2017). Asimismo, pellets de ceniza volante presentaron disolución parcial y lixiviación de metales pesados como cromo y plomo en condiciones alcalinas (Zhou et al., 2019). Por otra parte, materiales como la arcilla Hangjin y un biocarbón impregnado con aluminio y magnesio se mantuvieron estables en el rango operativo $3 < pH < 12$, con lixiviación muy baja o indetectable de iones metálicos presentes en su estructura (D. Wang et al., 2016), (R. Li et al., 2016).

Uno de los mecanismos de adsorción que más se ve afectado por las alteraciones en el pH es la atracción electrostática que ocurre entre el soluto y el adsorbente (Rajeswari et al., 2016). En general, bajo condiciones de medio ácido, la presencia de iones H^+ puede generar protonación de grupos funcionales de la superficie del adsorbente, lo cual favorece la adsorción de aniones como el fosfato y el nitrato (D. Wang et al., 2016),(F. Li et al., 2016). Por otro lado, en condiciones alcalinas predominan los iones OH^- en la solución, impidiendo así que la superficie se protone, además de generar competencia entre los grupos hidroxilos y el soluto presentes en la solución por los sitios activos del material (Ajmal et al., 2018).

Sin embargo, cada material tiene una naturaleza electrostática diferente, y para saber si está positiva o negativamente cargado en un valor de pH, se debe conocer el punto de carga cero de este. Dicho punto es el valor de pH (pH_{pzc}) en el que la cantidad total de cargas eléctricas positivas y negativas de un material son iguales, por lo que se genera una carga neta neutra (Kosmulski, n.d.). Se considera que una superficie está positivamente cargada

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

48

cuando $pH_{solución} < pH_{pzc}$, lo cual permite la interacción electrostática con especies aniónicas de la solución (H. Yang et al., 2016), (Y. Lai et al., 2016) (Lalley et al., 2016), (Coulibaly et al., 2016). De esta manera, incluso si el pH de la solución es un valor que esté en el rango alcalino, la superficie podría estar positivamente cargada con tal de que sea menor que el punto de carga cero del material. Es así como en los estudios de Li et al 2016 (R. Li et al., 2016) y Kim et al 2017 (Zhu et al., 2016) existe una atracción electrostática entre el fosfato disuelto y los diferentes adsorbentes en medios alcalinos debido a que los valores de pH_{pzc} de los materiales fueron 9,3 y 11, respectivamente (R. Li et al., 2016). (Zhu et al., 2016). De la misma manera, Bombuwala et al 2018 (Bombuwala Dewage et al., 2018) reportó que un biocarbón con magnetita dispersa en su superficie presenta un pH_{pzc} de 11, por lo que el porcentaje de remoción de nitrato se mantiene por encima del 50% aún en condiciones alcalinas (Bombuwala Dewage et al., 2018).

Adicionalmente, aunque la atracción electrostática sea un fenómeno importante, no es el único mecanismo de adsorción que se puede ver afectado por cambios en el pH . De hecho, cuando los resultados de capacidad de adsorción del material o porcentaje de remoción del soluto parecen ir en contravía a lo explicado anteriormente sobre el $pH_{solución}$ y pH_{pzc} , se puede intuir que la interacción electrostática entre las partículas no es el mayor mecanismo de adsorción (X. Zhang et al., 2018), (X. Liu et al., 2019). El intercambio iónico, las reacciones superficiales y la precipitación que experimentan los adsorbentes y los iones también se ven fuertemente influenciadas por las condiciones de la solución. Medios alcalinos conllevan a elevadas concentraciones de grupos OH^- en la solución que pueden dificultar la formación de complejos químicos adsorbente-adsorbato y el intercambio iónico

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

49

que se da entre la superficie y el medio, lo cual disminuye la eficiencia de remoción del contaminante. De esta manera en las investigaciones de Fu et al 2018 (Fu et al., 2018), Wu et al 2019 (K. Wu et al., 2019b) y Liu et al 2016 (T. Liu et al., 2016) se redujo la capacidad de adsorción de tres óxidos metálicos modificados (magnetita recubierta de ferrihidrita e impregnada con lantano, un bióxido metálico de aluminio y manganeso impregnado con grupo funcionales orgánicos y una zeolita con recubrimiento de aluminio y manganeso) al encontrarse en medios alcalinos (T. Liu et al., 2016),(Fu et al., 2018),(K. Wu et al., 2019b). Por el contrario, adsorbentes ricos en calcio como el polvo de mármol, la arcilla Hangjin y los biocarbones de cáscara de huevo, pueden presentar mejora en la remoción del fosfato de aguas residuales agrícolas en medios básicos porque se promueve la formación de especies Ca-P en la superficie del material y precipitaciones en el medio, como se reporta en los estudios de Wang D 2016, Bouamra F. 2018 y Liu X. 2019, respectivamente (D. Wang et al., 2016), (X. Liu et al., 2019), (Bouamra et al., 2018b).

2.4.5 Presencia de iones competencia en la solución

Se conoce como iones competencia a las sustancias presentes en el agua residual que generan disminución en la capacidad de adsorción que un material posee hacia un soluto específico. Entre los iones competencia más estudiados se encuentran el sulfato, cloruro, carbonato, bicarbonato, y, en ocasiones, el nitrato y amonio cuando se realiza adsorción de fosfato (X. Zhang et al., 2018), (Mitrogiannis et al., 2017). En ocasiones se reporta también la presencia de materia orgánica, cationes metálicos (como aluminio, cobre y zinc) y ácido húmico (F. Li et al., 2016), (Wei et al., 2016), (Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019). En la literatura se reportan diferentes posibles explicaciones por las cuales se ve afectada la

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

50

remoción de nitrato y fosfato de las aguas residuales agrícolas en presencia de iones competencia. Dichos iones afectan el proceso de adsorción dependiendo de su concentración y afinidad con el material. Esto les permite interactuar con el adsorbente, ocupando así algunos sitios activos que podría utilizar el adsorbato de interés (Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019).

Una de las principales razones por las cuales los iones competencia afectan la adsorción es por su concentración. Lalley et al 2016 (Lalley et al., 2016) y Wang et al 2016 (Q. Wang et al., 2016) analizaron el efecto que el sulfato, cloruro y nitrato tienen en la adsorción de fosfato en dos oxihidróxidos de hierro, goetita y lepidocrocita, y concluyeron que a concentraciones equimolares y menores que las del fosfato, la afectación es despreciable (Q. Wang et al., 2016),(Lalley et al., 2016). De igual manera, Wu et al 2016 (Yan Wu et al., 2016) reportó que el efecto de los grupos hidroxilos del medio acuoso no afectó la adsorción de nitrato sobre una resina de intercambio iónico (NDQ) porque su concentración era muy baja, mientras que el sulfato en una concentración cuatro veces mayor que la de nitrato disminuyó el porcentaje de remoción de 90% a poco menos de 50% (Yan Wu et al., 2016). Por otro lado, la adición de grandes cantidades de una especie química al medio acuoso con el fin de cambiar el pH de la solución, como el carbonato de sodio y el ácido sulfúrico, también se ve afectada la adsorción (Drenkova-Tuhtan et al., 2016),(Y. Lai et al., 2016). Lai et al 2016_(Y. Lai et al., 2016) y Kang et al 2021 (A. Li et al., 2021) vieron reducida la adsorción de fosfato en el humo de sílice de litio y en un biocarbón impregnado con hierro producido a partir de desperdicios de comida, porque con la adición de iones de

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

51

carbonato se aumentó el pH final de la solución hasta que fue mayor que el pH_{pzc} , volviendo la superficie negativamente cargada (Y. Lai et al., 2016),(A. Li et al., 2021).

Por otra parte, la afinidad que tienen un material y un ion puede depender de distintos factores como la carga eléctrica, electronegatividad y radio iónico. En los estudios de Kalaruban M. et al 2016 (Kalaruban et al., 2016), Behera R. et al 2016 (Behera & Das, 2016) y Kumar I. et al 2019 (Aswin Kumar & Viswanathan, 2019) se reporta que el SO_4^{2-} reduce en mayor medida el porcentaje de remoción y capacidad de adsorción de fosfato y nitrato que el Cl^- y HCO_3^- porque posee una mayor carga negativa que le permite interactuar más con una superficie positivamente cargada y con los grupos funcionales presentes en esta comparado con los otros iones mencionados (Aswin Kumar & Viswanathan, 2019),(Behera & Das, 2016),(Kalaruban et al., 2016). Contrario al efecto que tienen dichas especies aniónicas, Liu T et al 2014 (T. Liu et al., 2016) y Li F et al 2016 (F. Li et al., 2016) confirmaron que iones metálicos disueltos en el medio como el Ca^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Al^{3+} generaron un incremento en la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción de fósforo. Esto se debe a que dichos iones reaccionaron parcialmente con el fosfato, formando así especies químicas con menor solubilidad, y luego se adhirieron a la superficie del material, cambiando ligeramente su punto de carga cero y propiedades eléctricas (F. Li et al., 2016), (T. Liu et al., 2016).

De modo similar, la electronegatividad y radio iónico de los iones son factores importantes que generan competencia con el soluto de estudio. En las investigaciones de Li F. et al 2014 (F. Li et al., 2016) y Li R. et al 2016 (R. Li et al., 2016) se observó que el fluoruro reduce más las propiedades adsorbentes de los materiales que el cloruro, sulfato,

carbonato y nitrito debido a que es un ion altamente electronegativo que interactúa más fácilmente con la superficie que los demás mencionados (F. Li et al., 2016), (R. Li et al., 2016). Igualmente, Li et al 2016 (R. Li et al., 2016) _ también concluyó que el sulfato es el segundo ion que más afecta la adsorción debido a que tiene un radio iónico (0.2 nm) similar al del fosfato (0.238 nm) (R. Li et al., 2016).

2.4.6 Métodos de recuperación del adsorbente

Dado que gran parte de los materiales reportados en la literatura se utilizan en forma de polvo y pasan por un proceso de síntesis o modificación complejo, es importante que existan métodos que permitan la recuperación y uso prolongado de los adsorbentes. Durante el proceso de adsorción, el material experimenta interacciones físicas y químicas con el adsorbato que conducen a que eventualmente se sature este y detenga la adsorción, por lo cual se buscan procedimientos para liberar los sitios activos con el fin de reusar el material (Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019), (Karthikeyan & Meenakshi, 2019). Para dicho fin, en la literatura reportan el uso de soluciones con diferente naturaleza química para regenerar los adsorbentes (Sellner, Hua, Ahiablame, et al., 2019),(Novais et al., 2018). Existen alternativas de modificación de un material que permiten su recuperación desde el medio acuoso después de finalizada la adsorción (D. Wang et al., 2016),(Fu et al., 2018), (L. Lai et al., 2016),(Zhou et al., 2019),(Bombuwala Dewage et al., 2018).

A partir de los artículos revisados se encontró el uso de soluciones salinas, ácidas y alcalinas para desorber el fosfato y nitrato presente en los materiales después de la adsorción para así poder usarlos en varios ciclos de adsorción-desorción (Rajeswari et al., 2016),(Ajmal et al., 2018),(Kondalkar et al., 2018). El uso de una solución depende de la afinidad que tiene

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

53

el material con los iones presentes en esta. En los estudios de Rajeswari A. et al 2016 (Rajeswari et al., 2016), Wu Y. et al 2016 (Yan Wu et al., 2016), Kalaruban M. et al 2016 (Kalaruban et al., 2016) y Ye J. et al 2016 (Novais et al., 2018) se usaron soluciones de *HCl*, *NaCl* o *KCl* para desorber nitrato o fosfato de los adsorbentes saturados utilizados. Las dos sales de cloruro se emplearon en dos resinas de intercambio iónico (Dowex-Fe y NDQ) y un biopolímero modificado (Chitosan) y se logró utilizar todos los adsorbentes en al menos 5 ciclos de adsorción-desorción con un porcentaje de desorción ($D_{\%}$) mayor al 60%, debido a que el ion cloruro permitió el intercambio iónico de parte de los aniones de nitrato adsorbidos en la superficie hacia el medio (Yan Wu et al., 2016),(Rajeswari et al., 2016),(Kalaruban et al., 2016). Asimismo, el ácido clorhídrico fue utilizado para la recuperación de bauxsol saturado con fosfato, material con elevada composición mineralógica, llegando a alcanzar porcentajes de remoción mayores a 80% después de 5 ciclos de regeneración (Ye et al., 2016). En contraste con ello, en las investigaciones de Behera R. et al 2016 (Behera & Das, 2016), He X. et al 2016 (Kondalkar et al., 2018), Yan H. et al 2018 (Ye et al., 2016) y Sellner B. et al 2019 (Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019) se reportó el uso de medios alcalinos con *NaOH* para regenerar los adsorbentes, gracias a que el fosfato de la superficie se intercambia ~~ba~~ con los iones OH^- de la solución (Behera & Das, 2016),(Sellner, Hua, & Ahiablame, 2019),(Kondalkar et al., 2018), (Ye et al., 2016). Sin embargo, aunque existan materiales que tienen una buena reutilización (Kondalkar et al., 2019),(Shang et al., 2018),(Saifuddin et al., 2019), usualmente la regeneración puede hacerse para que el material cumpla 4-10 ciclos de adsorción (Ajmal et al., 2018),(Y. Lai et al., 2016),(X. Zhang et al., 2018),(Lee et al., 2019),(Song & Li, 2019), ya que el continuo uso del adsorbente hace que

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

54

cada vez haya más sitios activos ocupados por una unión química fuerte con el soluto, al punto de llegar a la saturación total irreversible (Karthikeyan & Meenakshi, 2019).

Por otro lado, la recuperación física de los adsorbentes desde el medio acuoso es también tema de interés. Después de la adsorción, es usual separar el adsorbente de la fase líquida por medio de centrifugación (Ajmal et al., 2018),(Drenkova-Tuhtan et al., 2016),(Ye et al., 2016), sin embargo, se pueden realizar modificaciones del material para facilitar su separación. Una de las alternativas observadas en la literatura es el uso de materiales magnéticos modificados que permiten una fácil separación del material desde la solución una vez finalice la adsorción de fosfato. En los reportes de Lai et al 2016 (L. Lai et al., 2016), Fu et al 2018 (Fu et al., 2018) y Bombuwala et al 2018 (Bombuwala Dewage et al., 2018) utilizaron materiales que contenían magnetita para facilitar la separación del material después de realizada la adsorción de fosfato y nitrato— (L. Lai et al., 2016),(Fu et al., 2018),(Bombuwala Dewage et al., 2018). Otra de las alternativas es la utilización de adsorbentes en forma de pellets que permiten el filtrado rápido de estos gracias a que cuentan con un tamaño de partícula más grande (D. Wang et al., 2016),(Zhou et al., 2019).

3 Conclusiones

De esta revisión sistemática de la literatura se puede determinar que la investigación sobre remoción de nitratos y fosfatos mediante adsorbentes es un tema importante de investigación, sobre el cual hay un promedio de 25 investigaciones por año durante el periodo analizado. Dentro de ese contexto, países asiáticos como China, India y Corea del Sur destacan por representar cerca del 55% de las investigaciones analizadas.

En cuanto a los materiales, se concluye que los dos tipos de adsorbentes más llamativos para realizar remoción de nitratos y fosfatos de medios acuosos son los óxidos e hidróxidos de metales y los materiales carbonosos. Los primeros son materiales atractivos porque pueden obtenerse de diferentes fuentes; de manera natural, subproductos industriales o materiales comerciales, lo que puede facilitar su obtención. Adicionalmente, esta clase de adsorbentes pueden modificarse mediante tratamientos térmicos, ácidos y químicos (impregnaciones) que potencian su capacidad de adsorción. Los segundos destacan porque pueden obtenerse a partir de residuos inorgánicos y de biomasa de diversos procesos y, dependiendo de su composición, se puede hacer disposición final de ellos sin generar contaminación secundaria, lo cual generara un efecto doblemente positivo en la sostenibilidad ambiental. Además, porque pueden modificarse superficialmente con diferentes iones metálicos o surfactantes que aumentan considerablemente sus capacidades adsorbentes, a tal punto que alcanzan las máximas capacidades de adsorción reportadas en los artículos, 277 y 351 mg/g para nitrato y fosfato, respectivamente.

Finalmente, aunque existan métodos de recuperación de los adsorbentes para su uso prolongado, son pocos los materiales que alcanzan una gran cantidad de ciclos de adsorción-

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

56

desorción sin perder considerablemente la habilidad de remoción de soluto debido a reacciones químicas irreversibles en la superficie. Además, algunas de las soluciones utilizadas para la regeneración de los materiales, como la soda cáustica o el ácido clorhídrico, son sustancias que difícilmente pueden separarse del nitrato o del fosfato desorbidos para posteriormente reutilizar estos como fertilizantes.

Referencias bibliográficas

- Abdolmaleki, F., Khorshidi, N., Azadmehr, A., & Maghsoudi, A. (2021). Enhanced adsorptive removal of phosphate from aqueous solution by activated sand/metal layered double hydroxides. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–29. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1972099>
- Ajmal, Z., Muhmood, A., Usman, M., Kizito, S., Lu, J., Dong, R., & Wu, S. (2018). Phosphate removal from aqueous solution using iron oxides: Adsorption, desorption and regeneration characteristics. *Journal of Colloid and Interface Science*, 528, 145–155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.084>
- Alberto, D. R., Tyler, A. C., & Trabold, T. A. (2021). Phosphate adsorption using biochar derived from solid digestate. *Bioresource Technology Reports*, 100864. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100864>
- Aswin Kumar, I., & Viswanathan, N. (2019). Hydrothermal Fabrication of Amine-Grafted Magnetic Gelatin Hybrid Composite for Effective Adsorption of Nitrate and Phosphate. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(47), 21521–21530. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b04815>
- Behera, R. K., & Das, R. (2016). Adsorptive removal of phosphorus(V) and chromium(VI) oxyanions using thermally treated titanium-rich bauxite. *Desalination and Water Treatment*, 57(32), 15115–15124. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1070287>
- Bombuwala Dewage, N., Liyanage, A. S., Pittman, C. U., Mohan, D., & Mlsna, T. (2018). Fast nitrate and fluoride adsorption and magnetic separation from water on α -Fe₂O₃

and Fe₃O₄ dispersed on Douglas fir biochar. *Bioresource Technology*, 263, 258–265.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.001>

Bouamra, F., Drouiche, N., Abdi, N., Grib, H., Mameri, N., & Lounici, H. (2018a).

Removal of Phosphate from Wastewater by Adsorption on Marble Waste: Effect of Process Parameters and Kinetic Modeling. *International Journal of Environmental Research*, 12(1), 13–27. <https://doi.org/10.1007/S41742-018-0065-3/FULLTEXT.HTML>

Bouamra, F., Drouiche, N., Abdi, N., Grib, H., Mameri, N., & Lounici, H. (2018b).

Removal of Phosphate from Wastewater by Adsorption on Marble Waste: Effect of Process Parameters and Kinetic Modeling. *International Journal of Environmental Research*, 12(1), 13–27. <https://doi.org/10.1007/S41742-018-0065-3>

Camacho, L. (2020). La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural colombiano. *Revista de Ingeniería UniAndes*, 38–51.

<https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.16924/revinge.49.6>

Cao, H., Wu, X., Syed-Hassan, S. S. A., Zhang, S., Mood, S. H., Milan, Y. J., & Garcia-Perez, M. (2020). Characteristics and mechanisms of phosphorous adsorption by rape straw-derived biochar functionalized with calcium from eggshell. *Bioresource Technology*, 318, 124063.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124063>

Chmielewská, E., Hodossyová, R., Koval'aková, M., & Urík, M. (2016). Comparable phosphate adsorption onto some natural aluminosilicates vs. Fe(III)oxihydroxide.

Desalination and Water Treatment, 57(16), 7387–7395.

<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017008>

Coulibaly, L. S., Akpo, S. K., Yvon, J., & Coulibaly, L. (2016). Fourier transform infra-red (FTIR) spectroscopy investigation, dose effect, kinetics and adsorption capacity of phosphate from aqueous solution onto laterite and sandstone. *Journal of Environmental Management*, 183, 1032–1040.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.061>

Deng, Yiyi, Huang, S., Dong, C., Meng, Z., & Wang, X. (2020). Competitive adsorption behaviour and mechanisms of cadmium, nickel and ammonium from aqueous solution by fresh and ageing rice straw biochars. *Bioresource Technology*, 303, 122853.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122853>

Deng, Yu, Li, M., Zhang, Z., Liu, Q., Jiang, K., Tian, J., Zhang, Y., & Ni, F. (2021). Comparative study on characteristics and mechanism of phosphate adsorption on Mg/Al modified biochar. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105079>

Djantio, P. D., Tsamo, C., Topet, M. R. S., Matsinkou, F. T., & Loura, B. B. (2019). Utilisation of waste from the production of millet derived local drink as adsorbent for phosphate removal from aqueous solution. *Indian Chemical Engineer*, 61(3), 309–325. <https://doi.org/10.1080/00194506.2019.1569562>

Drenkova-Tuhtan, A., Schneider, M., Mandel, K., Meyer, C., Gellermann, C., Sextl, G., & Steinmetz, H. (2016). Influence of cation building blocks of metal hydroxide

- precipitates on their adsorption and desorption capacity for phosphate in wastewater—
A screening study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering
Aspects*, 488, 145–153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.10.017>
- Forero, J. (2021). *Estudio de la incidencia de actividades agropecuarias en cuerpos
lénticos de alta montaña de la cordillera andina Colombiana*. 6.
<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/39046>
- Fu, H., Yang, Y., Zhu, R., Liu, J., Usman, M., Chen, Q., & He, H. (2018). Superior
adsorption of phosphate by ferrihydrite-coated and lanthanum-decorated magnetite.
Journal of Colloid and Interface Science, 530, 704–713.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.025>
- Gizaw, A., Zewge, F., Kumar, A., Mekonnen, A., & Tesfaye, M. (2021). A comprehensive
review on nitrate and phosphate removal and recovery from aqueous solutions by
adsorption. *Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(7), 921–947.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2021.146>
- Hauda, J. K., Safferman, S. I., & Ghane, E. (2020). Adsorption media for the removal of
soluble phosphorus from subsurface drainage water. *International Journal of
Environmental Research and Public Health*, 17(20), 1–18.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17207693>
- Hsu, L.-C., Tzou, Y.-M., Chiang, P.-N., Fu, W.-M., Wang, M.-K., Teah, H. Y., & Liu, Y.-
T. (2019). Adsorption mechanisms of chromate and phosphate on hydrotalcite: A
combination of macroscopic and spectroscopic studies. *Environmental Pollution*, 247,

180–187. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.012>

Johir, M. A. H., Pradhan, M., Loganathan, P., Kandasamy, J., & Vigneswaran, S. (2016).

Phosphate adsorption from wastewater using zirconium (IV) hydroxide: Kinetics, thermodynamics and membrane filtration adsorption hybrid system studies. *Journal of Environmental Management*, *167*(3), 167–174.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.048>

Juntarasakul, O., Yonezu, K., Kawamoto, D., Ohashi, H., Kobayashi, Y., Sugiyama, T.,

Watanabe, K., & Yokoyama, T. (2020). Chemical state of Fe³⁺ in a Fe³⁺-type cation exchange resin for the removal and recovery of phosphate ions and the adsorption mechanism of phosphate ion to the resin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *605*, 125314.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125314>

Kalaruban, M., Loganathan, P., Shim, W. G., Kandasamy, J., Naidu, G., Nguyen, T. V., &

Vigneswaran, S. (2016). Removing nitrate from water using iron-modified Dowex 21K XLT ion exchange resin: Batch and fluidised-bed adsorption studies. *Separation and Purification Technology*, *158*, 62–70.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.022>

Kamrin, M. A. (2014). Encyclopedia of TOXICOLOGY of GASOLINE. *Vascular*,

January 2010, 639.

Kang, J.-K., Seo, E.-J., Lee, C.-G., & Park, S.-J. (2021). Fe-loaded biochar obtained from

food waste for enhanced phosphate adsorption and its adsorption mechanism study via

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

62

spectroscopic and experimental approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105751. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105751>

Karathanasis, A. D. (2006). *Soil Mineralogy - Clay Mineralogy: Vol. VI. LAND USE, LAND COVER AND SOIL SCIENCES.*

<https://www.elementaryengineeringlibrary.com/civil-engineering/soil-mechanics/soil-mineralogy-clay-mineralogy>

Karthikeyan, P., & Meenakshi, S. (2019). Synthesis and characterization of Zn–Al LDHs/activated carbon composite and its adsorption properties for phosphate and nitrate ions in aqueous medium. *Journal of Molecular Liquids*, 296, 111766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111766>

Karthikeyan, P., & Meenakshi, S. (2021). Fabrication of hybrid chitosan encapsulated magnetic-kaolin beads for adsorption of phosphate and nitrate ions from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 750–759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.132>

Koncagül, E., Tran, M., Connor, R., Uhlenbrook, S., Renata, A., & Ortigara, C. (2017). *WASTEWATER: GENERATION AND IMPACT ON ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH.*

Kondalkar, M., Fegade, U., Attarde, S., & Ingle, S. (2018). Experimental investigation on phosphate adsorption, mechanism and desorption properties of Mn-Zn-Ti oxide trimetal alloy nanocomposite. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(11), 1635–1643. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1459678>

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

63

Kondalkar, M., Fegade, U., Attarde, S., & Ingle, S. (2019). Phosphate removal, mechanism, and adsorption properties of Fe-Mn-Zn oxide trimetal alloy nanocomposite fabricated via co-precipitation method. *Separation Science and Technology*, 54(16), 2682–2694.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1550513>

Kosmulski, M. (n.d.). *Surface charging and points of zero charge*.

Kumar, M., Badruzzaman, M., Adham, S., & Oppenheimer, J. (2007). Beneficial phosphate recovery from reverse osmosis (RO) concentrate of an integrated membrane system using polymeric ligand exchanger (PLE). *Water Research*, 41(10), 2211–2219.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.042>

Lai, L., Xie, Q., Chi, L., Gu, W., & Wu, D. (2016). Adsorption of phosphate from water by easily separable Fe₃O₄@SiO₂ core/shell magnetic nanoparticles functionalized with hydrous lanthanum oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 465, 76–82.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.11.043>

Lai, Y., Jiang, W., Yang, Z., Hao, X., & Xie, R. (2016). Equilibrium and kinetics studies of adsorption phosphate on raw and novel lithium silica fume based adsorbent. *Desalination and Water Treatment*, 57(59), 28794–28805.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1193767>

Lalley, J., Han, C., Li, X., Dionysiou, D. D., & Nadagouda, M. N. (2016). Phosphate adsorption using modified iron oxide-based sorbents in lake water: Kinetics, equilibrium, and column tests. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1386–1396.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.114>

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

64

Langer, M., Väänänen, J., Boulestreau, M., Miehe, U., Bourdon, C., & Lesjean, B. (2017).

Advanced phosphorus removal via coagulation, flocculation and microsieve filtration in tertiary treatment. *Water Science and Technology*, 75(12), 2875–2882.

<https://doi.org/10.2166/wst.2017.166>

Lee, S. Y., Choi, J.-W., Song, K. G., Choi, K., Lee, Y. J., & Jung, K.-W. (2019).

Adsorption and mechanistic study for phosphate removal by rice husk-derived biochar functionalized with Mg/Al-calcined layered double hydroxides via co-pyrolysis.

Composites Part B: Engineering, 176, 107209.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107209>

Li, A., Deng, H., Wu, Y., Ye, C., & Jiang, Y. (2021). Strong Adsorption of Phosphorus by

ZnAl-LDO-Activated Banana Biochar: An Analysis of Adsorption Efficiency, Thermodynamics, and Internal Mechanisms. *ACS Omega*, 6(11), 7402–7412.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05674>

Li, F., Wu, W., Li, R., & Fu, X. (2016). Adsorption of phosphate by acid-modified fly ash

and palygorskite in aqueous solution: Experimental and modeling. *Applied Clay*

Science, 132–133, 343–352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.06.028>

Li, R., Wang, J. J., Zhou, B., Awasthi, M. K., Ali, A., Zhang, Z., Gaston, L. A., Lahori, A.

H., & Mahar, A. (2016). Enhancing phosphate adsorption by Mg/Al layered double hydroxide functionalized biochar with different Mg/Al ratios. *Science of The Total*

Environment, 559, 121–129.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.151>

- Liu, T., Chang, B., & Wu, K. (2016). The performance of phosphate removal using aluminium-manganese bimetal oxide coated zeolite: batch and dynamic adsorption studies. *Desalination and Water Treatment*, 57(9), 4220–4233.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.991759>
- Liu, W., & Qiu, R. (2008). Water eutrophication in China and the combating strategies. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 83(May), 1163–1169.
<https://doi.org/10.1002/jctb>
- Liu, X., Shen, F., & Qi, X. (2019). Adsorption recovery of phosphate from aqueous solution by CaO-biochar composites prepared from eggshell and rice straw. *Science of the Total Environment*, 666, 694–702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.227>
- LIU, Y. nan, XUE, G., & YU, S. li. (2007). Comparing results of cultured and uncultured biological methods used in biological phosphorus removal. *Journal of Environmental Sciences*, 19(11), 1373–1379. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60224-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60224-1)
- Long, L., Xue, Y., Hu, X., & Zhu, Y. (2019). Study on the influence of surface potential on the nitrate adsorption capacity of metal modified biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 3065–3074. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-3815-Z>
- Luna, R., & Issn, A. (2010). Identificación De Cianobacterias Potencialmente Productoras De Cianotoxinas En La Curva De Salguero Del Río Cesar. *Luna Azul*, 31, 17–25.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2010.31.3>
- Luo, X., Liu, C., Yuan, J., Zhu, X., & Liu, S. (2017). Interfacial Solid-Phase Chemical Modification with Mannich Reaction and Fe(III) Chelation for Designing Lignin-

Based Spherical Nanoparticle Adsorbents for Highly Efficient Removal of Low Concentration Phosphate from Water. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(8), 6539–6547. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00674>

Mathurasa, L., & Damrongsiri, S. (2018). Low cost and easy rice husk modification to efficiently enhance ammonium and nitrate adsorption. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(2), 143–151. <https://doi.org/10.1007/S40093-018-0200-3/FULLTEXT.HTML>

Mdlalose, L., Balogun, M., Setshedi, K., Chimuka, L., & Chetty, A. (2019). Adsorption of phosphates using transition metals-modified bentonite clay. *Separation Science and Technology*, 54(15), 2397–2408. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1547315>

Mitrogiannis, D., Psychoyou, M., Baziotis, I., Inglezakis, V. J., Koukouzas, N., Tsoukalas, N., Palles, D., Kamitsos, E., Oikonomou, G., & Markou, G. (2017). Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH)₂ treated natural clinoptilolite. *Chemical Engineering Journal*, 320, 510–522. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.063>

Moradi, O., & Zare, K. (2013). Adsorption of Ammonium Ion by Multi-walled Carbon Nanotube: Kinetics and Thermodynamic Studies. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 21(6), 449–459. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2011.613538>

Nhiem, D. N., Duc, D. H., Lim, D. T., Bac, N. Q., Chuc, P. N., Dung, D. T., Chi, N. T. H., Pham, N. N., Trung, D. Q., Mai, N. V. N., Mau, T. X., & Khieu, D. Q. (2021). Strong Adsorption of Arsenite and Phosphate from Aqueous Solution Using La₂O₃–CeO₂

Composite. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(4), 1310–1323.

<https://doi.org/10.1007/S10924-020-01967-6>

Novais, S. V., Zenero, M. D. O., Tronto, J., Conz, R. F., & Cerri, C. E. P. (2018). Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with MgCl₂ for phosphorus adsorption. *Journal of Environmental Management*, 214, 36–44.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.088>

Ohji, T. (2013). Chapter 11.2.2 – Porous Ceramic Materials. In *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties* (Second Edi). Elsevier.

<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385469-8.00059-9>

Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>

Pala, S. L., Biftu, W. K., Suneetha, M., & Ravindhranath, K. (2021). Effective adsorbents based on nano mixed (Al-Fe-Zr) oxide synthesised by new green methods: for the simultaneous extraction of phosphate and chromate from contaminated water.

International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1–21.

<https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1927004>

Perveen, S., Nadeem, R., Iqbal, M., Bibi, S., Gill, R., Saeed, R., Noreen, S., Akhtar, K.,

Mehmood Ansari, T., & Alfryyan, N. (2021). Graphene oxide and Fe₃O₄ composite synthesis, characterization and adsorption efficiency evaluation for NO₃⁻ and PO₄³⁻ ions in aqueous medium. *Journal of Molecular Liquids*, 339, 116746.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116746>

Qiao, H., Mei, L., Chen, G., Liu, H., Peng, C., Ke, F., Hou, R., Wan, X., & Cai, H. (2019). Adsorption of nitrate and phosphate from aqueous solution using amine cross-linked tea wastes. *Applied Surface Science*, 483(March), 114–122.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.147>

Qiu, F., Wang, J., Zhao, D., & Fu, K. (2018). Adsorption of myo-inositol hexakisphosphate in water using recycled water treatment residual. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(29), 29593–29604. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2971-5>

Rajeswari, A., Amalraj, A., & Pius, A. (2016). Adsorption studies for the removal of nitrate using chitosan/PEG and chitosan/PVA polymer composites. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 123–134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.12.002>

Ritchie, H., & Roser, M. (2013). *Fertilizers*. <https://ourworldindata.org/fertilizers#total-fertilizer>

Rout, P. R., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2016). Nutrient removal from binary aqueous phase by dolochar: Highlighting optimization, single and binary adsorption isotherms and nutrient release. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 91–107.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.001>

Saifuddin, M., Bae, J., & Kim, K. S. (2019). Role of Fe, Na and Al in Fe-Zeolite-A for

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

69

adsorption and desorption of phosphate from aqueous solution. *Water Research*, 158, 246–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.045>

Samco tech co. (2017). *How Much Does an Ion Exchange System Cost? How Much Does an Ion Exchange System Cost?* <https://samcotech.com/how-much-ion-exchange-system-cost/>

Sellner, B. M., Hua, G., & Ahiablame, L. M. (2019). Fixed bed column evaluation of phosphate adsorption and recovery from aqueous solutions using recycled steel byproducts. *Journal of Environmental Management*, 233, 595–602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.070>

Sellner, B. M., Hua, G., Ahiablame, L. M., Trooien, T. P., Hay, C. H., & Kjaersgaard, J. (2019). Evaluation of industrial by-products and natural minerals for phosphate adsorption from subsurface drainage. *Environmental Technology*, 40(6), 756–767. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1407364>

Shaman, A. M., & Kowalski, S. R. (2016). Hyperphosphatemia Management in Patients with Chronic Kidney Disease. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 24(4), 494–505. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2015.01.009>

Shams, M., Dehghani, M. H., Nabizadeh, R., Mesdaghinia, A., Alimohammadi, M., & Najafpoor, A. A. (2016). Adsorption of phosphorus from aqueous solution by cubic zeolitic imidazolate framework-8: Modeling, mechanical agitation versus sonication. *Journal of Molecular Liquids*, 224, 151–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.09.059>

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

70

- Shang, Y., Guo, K., Jiang, P., Xu, X., & Gao, B. (2018). Adsorption of phosphate by the cellulose-based biomaterial and its sustained release of laden phosphate in aqueous solution and soil. *International Journal of Biological Macromolecules*, *109*, 524–534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.118>
- Son, C., An, W., Lee, G., Jeong, I., Lee, Y.-G., & Chon, K. (2021). Adsorption characteristics of phosphate ions by pristine, CaCl_2 and FeCl_3 -activated biochars originated from tangerine peels. *Separations*, *8*(3). <https://doi.org/10.3390/separations8030032>
- Song, M., & Li, M. (2019). Adsorption and regeneration characteristics of phosphorus from sludge dewatering filtrate by magnetic anion exchange resin. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(33), 34233–34247. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-4049-9>
- Superintendencia de servicios públicos domiciliarios., & Avendaño, N. (2020). *ESTUDIO SECTORIAL DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO EN COLOMBIA*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/estudio_sectorial_de_los_servicios_publicos_domiciliarios_de_acueducto_y_alcantarillado_28_dic_rev_1.pdf
- Suzaimi, N. D., Goh, P. S., Malek, N. A. N. N., Lim, J. W., & Ismail, A. F. (2020). Enhancing the performance of porous rice husk silica through branched polyethyleneimine grafting for phosphate adsorption. *Arabian Journal of Chemistry*,

13(8), 6682–6695. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.06.023>

Tollefson, J. (2018). China declared world's largest producer of scientific articles. *Nature*, 553(7689), 390. <https://doi.org/10.1038/D41586-018-00927-4>

Torres, J. (2019). *Análisis en la implementación de la química verde en el desarrollo agrícola sostenible en Colombia*. 8(5), 55.

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7256/1/116908-2019-I-GA.pdf>

Uygur, V., Celik, C. S., Sukusu, E., & Mujdeci, M. (2017). The effect of particle size on phosphorus adsorption kinetic and desorption by Turkish natural zeolites. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(10), 6253–6260.

Wang, D., Hu, W., Chen, N., Yu, Y., Tian, C., & Feng, C. (2016). Removal of phosphorus from aqueous solutions by granular mesoporous ceramic adsorbent based on Hangjin clay. *Desalination and Water Treatment*, 57(47), 22400–22412.

<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1133327>

Wang, Q., Zhang, B., Wang, M., Wu, J., Li, Y., Gao, Y., Li, W., & Jin, Y. (2016).

Synthetic lepidocrocite for phosphorous removal from reclaimed water: optimization using convex optimization method and successive adsorption in fixed bed column.

Environmental Technology, 37(21), 2750–2759.

<https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1162849>

Wang, T., Zhang, D., Fang, K., Zhu, W., Peng, Q., & Xie, Z. (2021). Enhanced nitrate removal by physical activation and Mg/Al layered double hydroxide modified biochar

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

72

derived from wood waste: Adsorption characteristics and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105184.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105184>

Wang, Y., Yang, Q., & Huang, H. (2019). Effective adsorption of trace phosphate and aluminum in realistic water by carbon nanotubes and reduced graphene oxides. *Science of The Total Environment*, 662, 1003–1011.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.312>

Wei, T., Guizhen, L., Tianli, W., Min, Y., Jinhui, P., Barrow, C. J., Wenrong, Y., & Hongbin, W. (2016). Preparation and adsorption of phosphorus by new heteropolyacid salt–lanthanum oxide composites. *Desalination and Water Treatment*, 57(17), 7874–7880. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1085455>

Wilsenach, J. A., Schuurbiens, C. A. H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2007). Phosphate and potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation. *Water Research*, 41(2), 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.10.014>

World Health Organization. (2009). Nitrate and nitrite in Drinking-water Background document for development of. *Drinking Water*, 2(2), 21.

Wu, K., Li, Y., Liu, T., Huang, Q., Yang, S., Wang, W., & Jin, P. (2019a). The simultaneous adsorption of nitrate and phosphate by an organic-modified aluminum-manganese bimetal oxide: Adsorption properties and mechanisms. *Applied Surface Science*, 478, 539–551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.194>

Wu, K., Li, Y., Liu, T., Huang, Q., Yang, S., Wang, W., & Jin, P. (2019b). The

simultaneous adsorption of nitrate and phosphate by an organic-modified aluminum-manganese bimetal oxide: Adsorption properties and mechanisms. *Applied Surface Science*, 478(13), 539–551. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.194>

Wu, Yan, Wang, Y., Wang, J., Xu, S., Yu, L., Philippe, C., & Wintgens, T. (2016). Nitrate removal from water by new polymeric adsorbent modified with amino and quaternary ammonium groups: Batch and column adsorption study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 66, 191–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.06.019>

Wu, You, Liu, Z., Bakhtari, M. F., & Luo, J. (2021). Preparation of GO/MIL-101(Fe,Cu) composite and its adsorption mechanisms for phosphate in aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51391–51403. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-14206-9/FULLTEXT.HTML>

Xi, H., Li, Q., Yang, Y., Zhang, J., Guo, F., Wang, X., Xu, S., & Ruan, S. (2021). Highly effective removal of phosphate from complex water environment with porous Zr-bentonite alginate hydrogel beads: Facile synthesis and adsorption behavior study. *Applied Clay Science*, 201, 105919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105919>

Yang, B., Feng, Y., Yu, Y., He, S., Liu, H., Xue, L., & Yang, L. (2019). Lanthanum ferrite nanoparticles modification onto biochar: derivation from four different methods and high performance for phosphate adsorption. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04553-z>

- Yang, H., Zhou, Q., Luo, W., Yan, C., & Zhou, C. (2016). The preparation of a cross-linked cerium (III)-loaded alginate bead adsorbent for the removal of phosphate from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 57(39), 18354–18365.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1088805>
- Yang, Y., Wang, Y., Zheng, C., Lin, H., Xu, R., Zhu, H., Bao, L., & Xu, X. (2021). Lanthanum carbonate grafted ZSM-5 for superior phosphate uptake: Investigation of the growth and adsorption mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 133166.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133166>
- Ye, J., Cong, X., Zhang, P., Zeng, G., Hoffmann, E., Liu, Y., Wu, Y., Zhang, H., Fang, W., & Hahn, H. H. (2016). Application of acid-activated Bauxsol for wastewater treatment with high phosphate concentration: Characterization, adsorption optimization, and desorption behaviors. *Journal of Environmental Management*, 167, 1–7.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.023>
- Yoon, H. S., Chung, K. W., Kim, C. J., Kim, J. H., Lee, H. S., Kim, S. J., Lee, S. Il, Yoo, S. J., & Lim, B. C. (2018). Characteristics of phosphate adsorption on ferric hydroxide synthesized from a $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ aqueous solution discharged from a hydrometallurgical process. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 35(2), 470–478.
<https://doi.org/10.1007/S11814-017-0287-7>
- Yuan, J., Zhu, Y., Wang, J., Liu, Z., He, M., Zhang, T., Li, P., & Qiu, F. (2021). Facile Modification of Biochar Derived from Agricultural Straw Waste with Effective Adsorption and Removal of Phosphorus from Domestic Sewage. *Journal of Inorganic*

and Organometallic Polymers and Materials, 31(9), 3867–3879.

<https://doi.org/10.1007/S10904-021-01992-5>

Zarabi, M., & Jalali, M. (2018a). Competitive Removal of Ammonium-Nitrogen from Aqueous Solutions by Mineral and Organic Adsorbents. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(10), 1129–1143.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1448865>

Zarabi, M., & Jalali, M. (2018b). Competitive Removal of Ammonium-Nitrogen from Aqueous Solutions by Mineral and Organic Adsorbents. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(10), 1129–1143.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1448865>

Zhang, J., Zhang, Y., Zhao, W., Li, Z., & Zang, L. (2021a). Facile Fabrication of Calcium-Doped Carbon for Efficient Phosphorus Adsorption. *ACS Omega*, 6(1), 327–339.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04642>

Zhang, J., Zhang, Y., Zhao, W., Li, Z., & Zang, L. (2021b). Facile Fabrication of Calcium-Doped Carbon for Efficient Phosphorus Adsorption. *ACS Omega*, 6(1), 327–339.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04642>

Zhang, X., Lin, X., He, Y., Chen, Y., Zhou, J., & Luo, X. (2018). Adsorption of phosphorus from slaughterhouse wastewater by carboxymethyl konjac glucomannan loaded with lanthanum. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119,

105–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.140>

Zhao, W., Li, Y., Zhao, Q., Ning, Z., Zhou, C., Wang, H., Lu, L., Yang, P., Zhang, K.,

Wang, F., Huang, Z., & Ouyang, Z. (2013). Adsorption and desorption characteristics of ammonium in eight loams irrigated with reclaimed wastewater from intensive hogpen. *Environmental Earth Sciences*, 69(1), 41–49. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1932-4>

Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Li, S., & Fan, Y. (2019). Utilization of coal fly and bottom ash pellet for phosphorus adsorption: Sustainable management and evaluation. *Resources, Conservation and Recycling*, 149(March), 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.017>

Zhu, N., Yan, T., Qiao, J., & Cao, H. (2016). Adsorption of arsenic, phosphorus and chromium by bismuth impregnated biochar: Adsorption mechanism and depleted adsorbent utilization. *Chemosphere*, 164, 32–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.036>

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

77

Apéndices

Apéndice A: Ranking de autores por número de participaciones en los artículos abarcados en la revisión.

Autor	Número de intervenciones	Autor	Número de intervenciones
Fengxian Qiu	3	Carlos Hoffmann	2
Junjie Yuan	2	Zhaoran Zhang	2
Yao Zhu	2	Haiqin Yu	2
Jizhang Wang	2	Yoshimasa Amano	2
Zhigang Liu	2	Motoi Machida	2
Pingping Li	2	Shubiao Wu	2
Perumal Karthikeyan	2	Renjie Dong	2
Sankaran Meenakshi	2	Jim J. Wang	2
Ilango Aswin Kumar	2	Baoyue Zhou	2
Natrayasamy Viswanathan	2	Muhammad Usman	2
Huan Xi	2	Milind Kondalkar	2
Yan Yang	2	Umesh Fegade	2
Jianfeng Zhang	2	Sanjay Attarde	2
Tiantian Li	2	Sopan Ingle	2
Zhaohui Tong	2	Kaimin Shih	2
Yuncong C. Li	2	Jairo Tronto	2
Min Li	2	Bjorn M. Sellner	2
Tao Zhang	2	Guanghai Hua	2
Hua Deng	2	Laurent M. Ahiablame	2
Jae-Woo Choi	2	Lihong Xue	2
Ekaterina Ovsyannikova	2	Yingxue Li	2
Andrea Kruse	2	Alan Howard	2

ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

78

Apéndice B: Ranking de revistas por número de participaciones en los artículos abarcados en la revisión.

Revista	Numero de publicaciones
Bioresource technology	7
Chemical Engineering Journal	7
Desalination and Water Treatment	7
Journal of Environmental Chemical Engineering	7
Environmental Science and Pollution Research	6
Environmental Technology	6
Journal of Cleaner Production	6
Journal of Environmental Management	6
Science of the Total Environment	6
Colloids and Surfaces	5
Chemosphere	4
Journal of Colloid and Interface Science	4
Journal of Molecular Liquids	4
International Journal of Environmental Analytical Chemistry	3
Waste Management	3
ACS Omega	2
Applied Clay Science	2
Applied Surface Science	2
Biological Macromolecules	2
Environmental Pollution	2
Industrial & Engineering Chemistry Research	2
Journal of Water Process Engineering	2
Nature Scientific Reports	2
Process Safety and Environmental Protection	2
Resources, Conservation & Recycling	2
Scientific Reports	2
Separation Science and Technology	2
SN Applied Sciences	2
Water Research	2
Water Science & Technology	2
ACS Sustainable Chemical Engineering	1
Adsorption Science & Technology	1
Applied Materials & Interfaces	1
Applied Nano Materials	1
Arabian Journal of Chemistry	1
Cleaner production	1
Cogent Engineering	1
Composites	1

**ADSORCIÓN DE LOS ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA.**

79

Current Research in Green and Sustainable Chemistry	1
Environmental Research	1
Fresenius Environmental Bulletin	1
Green Processing and Synthesis	1
Indian Chemical Engineer	1
Integrated Environmental Assessment and Management	1
International Journal of Biological Macromolecules	1
International Journal of Environmental Research and Public Health	1
International Journal of Environmental Research	1
International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture	1
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	1
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	1
Journal of Dispersion Science and Technology	1
Journal of Environmental Science and Health	1
Journal of Experimental Nanoscience	1
Journal of Geochemical Exploration	1
Journal of Hazardous Materials	1
Journal of Industrial and Engineering Chemistry	1
Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials	1
Journal of Polymers and the Environment	1
Journal of Saudi Chemical Society	1
Journal of Solid State Chemistry	1
Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers	1
Journal of Wood Chemistry and Technology	1
Korean Institute of Chemical Engineers	1
MDPI	1
RSC Advances	1
Separation and purification technology	1
Separations	1
Soil Science and Plant Analysis	1
Surfaces and Interfaces	1
Sustainable Chemistry and Engineering	1
