

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE SUELOS



“MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO A TRAVÉS DE LA INCORPORACIÓN DE SUSTRATOS ZEOLÍTICOS Y NANOPARTÍCULAS DE FOSFATO CÁLCICO.”

Por:

LUIS FERNANDO MONTIEL SILVA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México

MAYO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE SUELOS

“MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO A TRAVÉS DE
LA INCORPORACIÓN DE SUSTRATOS ZEOLÍTICOS Y NANOPARTÍCULAS DE
FOSFATO CÁLCICO”

Por:

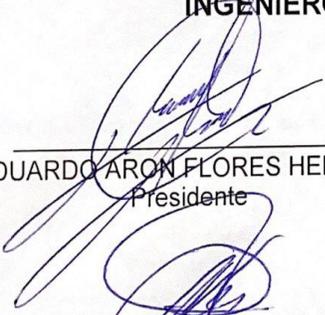
LUIS FERNANDO MONTIEL SILVA

TESIS

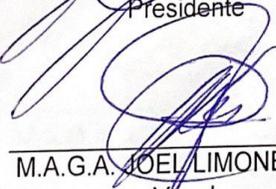
Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por:


DR. EDUARDO ARON FLORES HERNÁNDEZ
Presidente


M.A.C.H. RUBI MUÑOZ SOTO
Vocal


M.A.G.A. JOEL LIMONES AVITIA
Vocal


DR. ALICIA BUENDÍA GARCÍA
ANTONIO NARRO
Vocal Suplente


DR. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas


COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Torreón, Coahuila, México
MAYO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE SUELOS

“MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO A TRAVÉS DE
LA INCORPORACIÓN DE SUSTRATOS ZEOLÍTICOS Y NANOPARTÍCULAS DE
FOSFATO CÁLCICO”

Por:

LUIS FERNANDO MONTIEL SILVA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobada por el Comité de Asesoría:



DR. EDUARDO ARON FLORES HERNÁNDEZ
Asesor Principal



M.A.C.H. RUBI MUÑOZ SOTO
Coasesor



M.A.G.A. JOEL LIMONES AVITIA
Coasesor



DR. ALAIN BUENDÍA GARCÍA
Asesor



DR. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE CARRERAS AGRONÓMICAS

Torreón, Coahuila, México

MAYO 2022

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme aceptado ser parte de ella y haberme abierto sus puertas en cada momento que lo necesite, además de brindarme la dicha de poder estudiar mi carrera de ingeniería en procesos ambientales, así como también a mis docentes que me brindaron sus conocimientos y experiencias para seguir adelante.

Agradezco también a mi Asesor de Tesis el Dr. Eduardo Aron Flores Hernández por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo este proyecto y recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también guiarme para llevar a cabo el desarrollo de mi tesis.

Mi agradecimiento también va para los laboratoristas del departamento de suelos por haberme facilitado el uso del laboratorio y sus materiales, además de brindarme sus conocimientos científicos y aportaciones importantes en este proyecto.

Agradezco a mis compañeros de clase que también gracias a ellos me ayudaron a saber seleccionar el tema de esta Tesis.

DEDICATORIA

Dedico el esfuerzo de este trabajo con todo mi corazón a mis padres por haberme forjado como la persona que soy ahora, la mayoría de mis logros y metas son gracias a ellos, también dedico esta tesis a mis mejores amigos Bere, Iliana y Rene por haber sido parte importante en esta etapa de mi vida, al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

RESUMEN.

Problemas asociados al uso de fertilizantes tradicionales es la contaminación ambiental y la pérdida de nutrientes. La nanotecnología tiene el potencial de solventar esta problemática. Nuestra hipótesis indica que la combinación de nanopartículas de hidroxiapatita (nHAp) en combinación con zeolita formara un nanocompuesto híbrido (zeolita-nHAp) con la capacidad de mejorar la retención de macronutrientes. El objetivo es contribuir a tener suelos más eficientes con mayor concentración de macronutrientes y generar una agricultura sustentable. El diseño experimental fue completamente al azar utilizando porómetros. La zeolita se acondicionó con 4, 8 y 16 ml de nHAp en solución, se utilizó 3 L de zeolita para cada tratamiento con 3 reparticiones. Para la determinación de nitrógeno se empleó el método kheldahl, en la determinación de fósforo el método Olsen y con potasio se determinó en base a la absorbancia en el espectrofotómetro.

Los resultados mostraron mejor eficiencia donde se combinan los factores sustrato y nanopartículas (A y B), respecto al N, numéricamente el T1 retuvo la mayor cantidad de este elemento con $2566.67 \text{ mg L}^{-1}$ atrapados en el nanocompuesto, lo que representa el 51.33 %. Para el P, el T3 fue el que más capacidad de retención mostró, con 1266.7 mg L^{-1} absorbidos, equivalente a 25.33 %. Para el K, el T7 mostro la mejor tasa de retención, absorbiendo $4664.01 \text{ mg L}^{-1}$ equivalente al 93.28 %. Por lo anteriormente expuesto, aceptamos la hipótesis, que indica que un nanocompuesto híbrido tiene la capacidad de retención de macronutrientes.

Palabras clave: Nanotecnología, Nanohíbridos, Hidroxiapatita, Capacidad de retención, Macronutrientes

ABSTRACT

Problems associated with the use of traditional fertilizers is pollution and loss of environmental nutrients. Nanotechnology has the potential to solve this problem. Our hypothesis indicates that the combination of hydroxyapatite nanoparticles (nHAp) in combination with zeolite will form a hybrid nanocomposite (zeolite-nHAp) with the ability to improve macronutrient retention. The objective is to contribute to having more efficient soils with a higher concentration of macronutrients and to generate sustainable agriculture. The experimental design was completely randomized using porometers. The zeolite was conditioned with 4, 8 and 16 ml of nHAp in solution, 3 L of zeolite were obtained for each treatment with 3 distributions. For the determination of nitrogen, the kheldahl method was used, in the determination of phosphorus the Olsen method and with potassium it was concluded based on the absorbance in the spectrophotometer.

The results showed better efficiency where the substrates and nanoparticles (A and B) are combined, with respect to N, numerically T1 retained the largest amount of this element with 2566.67 mg L⁻¹ trapped in the nanocomposite, which represents 51.33%. For P, T3 was the one that showed the highest retention capacity, with 1266.7 mg L⁻¹ absorbed, equivalent to 25.33%. For K, T7 showed the best retention rate, absorbing 4664.01 mg L⁻¹ equivalent to 93.28%. Based on the above, we accept the hypothesis, which indicates that a hybrid nanocomposite has the capacity to retain macronutrients.

Keywords: Nanotechnology, Nanohybrids, Hydroxyapatite, Retention capacity, Macronutrients

Índice General

Resumen.....	II
Abstract.....	III
1. Introducción	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipótesis	3
2. Revisión de literatura.....	4
2.1 Antecedentes de la nanotecnología	4
2.2 Nanotecnología y nanomateriales	4
2.3 Aplicaciones de la nanotecnología	6
2.3.1 Nanotecnología en tratamiento de aguas	7
2.3.2 Nanotecnología en industria alimentaria.....	8
2.3.3 Nanotecnología en la medicina.....	8
2.3.4 Nanotecnología en la industria nuclear.....	10
2.3.5 Nanotecnología en la agricultura	10
2.4 Impacto ambiental de los fertilizantes.....	11
2.4.1 Ineficiencia de los fertilizantes químicos tradicionales.....	12
2.5 Agricultura sustentable	13
2.5.1 Nanotecnología verde.....	13
2.6 Hidroxiapatita en la agricultura	16
2.7 Zeolita y aplicaciones	17
2.7.1 Zeolita en la agricultura.....	18
3. Materiales y métodos.....	19
3.1 Descripción del sitio	19
3.2 Características climáticas.....	19
3.3 Acondicionamiento de la zeolita con nHAp.....	20
3.3.2 Diseño experimental	21
3.3.3 Determinación de Nitrógeno total (Método Kjeldahl).....	24
3.3.4 Determinación de Fosforo (Método Olsen)	27
3.3.5 Determinación de Potasio.....	30
4. Resultados y discusión	33
4.1 Retención de Macronutrientes.....	33
5. Conclusiones	40
6. Referencias.....	41

Índice de tablas

Tabla 1. Categorías de los nanomateriales	5
Tabla 2. Categorías de nanomateriales híbridos	15
Tabla 3. Acondicionamiento de zeolita con nHAp.....	20
Tabla 4. Matriz de datos y tratamientos	21
Tabla 5. Combinación de factores A*B	36
Tabla 6. Porcentajes de retención de nutrientes por combinación de factores (A*B)	36

Índice de figuras

Figura 1. Propiedades de los nanomateriales.....	6
Figura 2. Nanotecnología en tratamiento de agua	7
Figura 3. Localización del experimento.....	19
Figura 4. Preparación de nHAp.....	20
Figura 5. Preparación de Zeolita y Perlita.....	20
Figura 6. Concentraciones de Zeolita con nHAp.....	20
Figura 7. Fabricación de mesa.....	22
Figura 8. Fabricación de porómetros	22
Figura 9. Etiquetado y rotulado de porómetros.	23
Figura 10. Fertilizante FertiDrip utilizado	23
Figura 11. Preparación de tratamientos.....	23
Figura 12. Colación de lixiviado resultante	24
Figura 13. Muestras extraídas en frascos rotulados	24
Figura 14. Digestor y destilador Kjeldahl Modelo: KGU-COMB	25
Figura 15. Agitador de acción recíproca Eberbach Modelo: E6010	28
Figura 16. Espectrofotómetro de absorción atómica, Perkin Elmer 2380	31
Figura 17. Retención de nutrientes en base al factor (A): sustrato	33
Figura 18. Retención de nutrientes en base al factor (B): concentración de nanopartículas	34
Figura 19. Retención de nutrientes por combinación de Factores (A*B)	35
Figura 20. Concentración de nitrato en lixiviados de muestras de suelo que contienen gránulos de urea y formulaciones de SRF (Mehri Salimi et al, 2020)....	37
Figura 21. % de eliminación de NH_4^+ y PO_4^{3-} (Qianyu Xu et al,2020).....	38

1. Introducción

La nanotecnología es una de las tecnologías más esenciales aplicables en todas las áreas de la ciencia, la síntesis de nanomateriales (NM) es indispensable ya que es la tecnología del futuro (Kiriyanthan *et al.*, 2021). A partir de la nanotecnología se han podido concebir y modificar nuevos materiales que han acelerado el desarrollo y la creación de novedosos tratamientos para enfermedades como el cáncer, la producción de energía a partir de fuentes renovables, la remediación ambiental, la creación de dispositivos electrónicos con mayor capacidad de almacenamiento y velocidad, entre otros (Ortiz-Andrade *et al.*, 2019). La producción de los NM aumentan cada vez más, la liberación de estos podría causar problemas en la salud ecológica, sin embargo, aún se desconoce el efecto a largo plazo de estos NM, por lo tanto, la evaluación de la exposición a los NM de ingeniería es crucial porque sus efectos ambientales son muy poco conocidos (Uddin *et al.*, 2020) .

Uno de los principales problemas en la agroindustria es el impacto ambiental de los fertilizantes. Las aplicaciones de una gran cantidad de fertilizantes a base de compuestos de sales de amonio, urea, nitrato o fosfato son perjudiciales para el crecimiento de las plantas y para la salud del suelo, la nanotecnología y los materiales a nano escala tienen el potencial para las soluciones de muchos desafíos importantes que enfrenta nuestra sociedad (Mondal, 2020), La lixiviación de nitratos es una vía primaria de pérdida de nitrógeno de los sistemas agrícolas, y se ve afectado tanto por labranza como por especies cultivadas. Sin embargo, hay poca información sobre los sistemas de conservación sin fertilización con nitrógeno (Rosolem *et al.*, 2018), es por eso que en esta investigación nos apoyamos de las cualidades que tienen estas nanopartículas de Hidroxiapatita (nHAp). El agua, el suelo y el aire son los medios ambientales más investigados en lo que respecta a la contaminación derivada de pesticidas y fertilizantes (Zhang *et al.*, 2018). La aplicación práctica de la nanotecnología y la comercialización de productos basados

en NM sigue siendo incierta, teniendo en cuenta la escasa capacidad para controlar las propiedades y la interacción de los materiales a nanoescala, así como el efecto ambiental poco claro y la base de datos de toxicidad casi vacía (He *et al.*, 2019). Es un problema la lixiviación de los fertilizantes, las plantas no llevan a cabo su debido proceso de nutrición por efecto al desaprovechamiento del producto.

La solución de esto reduciría el impacto ambiental que genera y además beneficiaría en el ahorro del uso de fertilizantes, como consecuencia se reducirían los gastos de estos insumos. La nanotecnología es una rama emergente de la ciencia con un gran potencial y resultados obtenidos, se puede utilizar como una herramienta poderosa para el manejo del estrés abiótico y biótico, la seguridad alimentaria y nutricional y para aumentar el rendimiento de las plantas de cultivo (Srivastava *et al.*, 2016). Las innovaciones en nanotecnología son muy prometedoras para combatir este desafío al ofrecer un sistema de agricultura más sostenible, eficiente y resiliente, al tiempo que se promueve la seguridad alimentaria (Xin *et al.*, 2020).

1.1 Objetivos

Determinar los posibles cambios en las propiedades físicas del suelo debido a la incorporación de sustrato zeolíticos y nanopartículas de fosfato cálcico.

Descubrir si la combinación de estos compuestos logra capturar el Nitrógeno, Fosforo y Potasio en su estructura.

1.2 Hipótesis

Las nanopartículas de fosfato de calcio en conjunto con sustratos zeolíticos presentan capacidad de retención de macronutrientes (N, P y K)

2. Revisión de literatura.

2.1 Antecedentes de la nanotecnología

Los orígenes de la NT se remontan a los resultados de investigación generados por el físico estadounidense Richard Phillips Feynman, ganador del premio Nobel de Física, quien en 1959 ante la Sociedad Americana de Física impartió la conferencia “Hay mucho sitio en el fondo”, en aquella conferencia, Feynman propuso manipular y fabricar artefactos con la precisión de unos pocos átomos, a pesar de dicho razonamiento, esas ideas permanecieron estancadas y sin prosperar por mucho tiempo (Lira Saldivar *et al.*, 2018). En la década de 1960, el físico cuántico Feynman, predijo que, si tuviéramos algún control sobre la disposición de los objetos a pequeña escala, podríamos hacer objetos con muchas características exóticas, y veríamos el rendimiento del material produce una rica variedad de cambios, el nanomaterial actual es ese material, tiempo después, Herbert Gleiter propuso por primera vez el concepto de nanomateriales en 1981, se refiere a un material que tiene una estructura de partículas cristalinas o amorfas en una escala nanométrica (Zhang, 2020). Los pioneros de la nanotecnología creían que esta tecnología goza de la capacidad necesaria para reducir los problemas ecológicos, en particular los ambientales, mediante la identificación y el control óptimo de los contaminantes que surgen de una amplia gama de fuentes de contaminación (Sabzali Parikhani *et al.*, 2018).

2.2 Nanotecnología y nanomateriales

La nanotecnología es una rama de la ciencia que se encarga de la comprensión y el control de la materia en dimensiones de 1-100 nanómetros aproximadamente, y sus implicaciones para el bienestar del ser humano y el medio ambiente (Tripathi *et al.*, 2018). La nanotecnología implica investigación, la creación y el uso de nuevas partículas con un tamaño extremadamente pequeño (Chen *et al.*), estos nuevos materiales creados por el ser humano se denominan

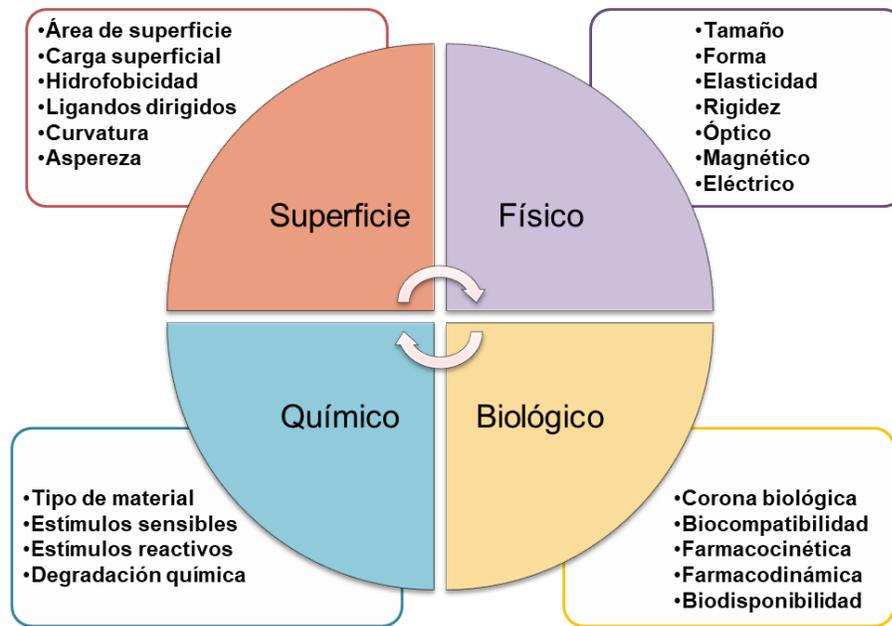
nanomateriales manufacturados (Chen *et al.*), estos nanomateriales ofrecen novedosas propiedades físico-químicas, tales como alta durabilidad, resistencia mecánica, alta conductividad, elevada área específica y reactividad química, estas propiedades hacen atractivo el uso de los NM para diferentes áreas de aplicación en la industria, la biomedicina, la electrónica y las ciencias ambientales, la agricultura, entre otras (Claudio Inostroza B, 2018).

Dependiendo de las propiedades, la naturaleza del material y uso de los nanomateriales, se pueden clasificar en 4 categorías, Tabla 1 (Pandey y Jain, 2020)

<i>No</i>	<i>Material base</i>	<i>Ejemplo</i>
<i>i.</i>	Bio-orgánico	Dendrímeros, micelas, liposomas
<i>ii.</i>	Carbón	Nanotubos de carbono, fullerenos, nano fibras de carbono, negro de humo
<i>iii.</i>	A base de metal y óxido de metal	Nanomateriales de Ag, Au, Ti, Fe, Pt, Pd, Sn, Cu
<i>IV.</i>	basado en compuestos	Polímero, combinaciones compuestas de nanomaterial a base de carbono, a base de metal o de base orgánica con cualquier forma de materiales a granel de metal, cerámica o polímero.

Tabla 1. Categorías de los nanomateriales

Los NM ofrecen un conjunto diverso de propiedades ajustables. Estos se pueden dividir en propiedades físicas, químicas, superficiales y biológicas, dichas características hacen que las nanopartículas sean compatibles con la biología y la medicina (Sindhwani y Chan, 2021), tal y como se grafica en la figura 1



Traducida al español de (Sindhvani y Chan, 2021) *Figura 1. Propiedades de los nanomateriales.*

Gracias a las propiedades físicas, químicas y mecánicas ajustables de los NM, se tiene mejor rendimiento a comparación con el uso de materiales convencionales, brindando oportunidades de innovación en muchas aplicaciones de la nanotecnología, siendo cada vez más importante su uso en el mundo de la ciencia (Saleh, 2020)

2.3 Aplicaciones de la nanotecnología

La Nanotecnología es un área muy prometedora que se encuentra avanzando a pasos agigantados, y ofrece aplicaciones en diversos ámbitos (Acosta Turo *et al.*) Unos de ellos son la medicina, la industria alimentaria, la agricultura, etc. Sin embargo, muchas de sus aplicaciones se encuentran actualmente en una etapa inicial y la mayoría de ellas requieren una alta calidad de investigación y desarrollo para su aplicación segura (Dasgupta *et al.*, 2017).

La nanotecnología ha demostrado que tiene el potencial para emplearse en diferentes ámbitos, brindando soluciones innovadoras y ecológicas, no obstante, la única limitante de la aplicación de la nanotecnología es que por ahora, la mayoría de las investigaciones relacionadas con este tema se limitan a pruebas piloto y a escalas de laboratorio (Khan *et al.*, 2019)

En el presente trabajo, la aplicación de la NT está enfocada a mejorar las capacidades de retención de nutrientes en sustratos utilizados en la agronomía, con un posible impacto indirecto positivo en el medio ambiente.

2.3.1 Nanotecnología en tratamiento de aguas

En materia de tratamiento de aguas, la nanotecnología tiene buen potencial para mejorar la calidad y disponibilidad del agua a largo plazo, facilitando su reutilización y remediación por contaminación, de lo cual para atender estas necesidades se han empleado nanoadsorbentes, nanomembranas y nanofotocatalizadores, la figura 2 expone como se aplica la nanotecnología en tratamiento de aguas. (Ajith et al., 2021)

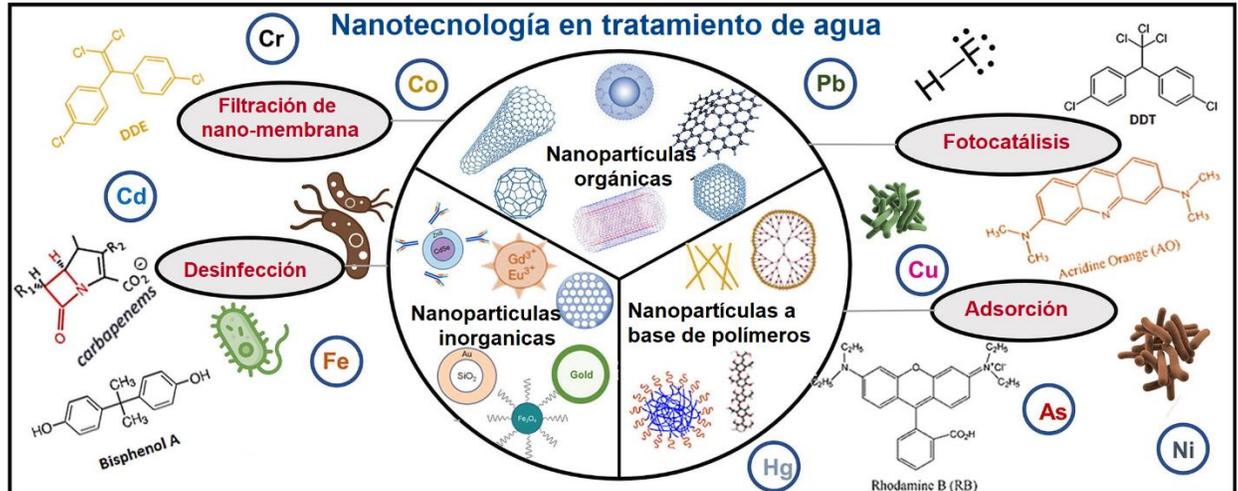


Figura 2. Nanotecnología en tratamiento de agua. Imagen traducida al español (Ajith et al., 2021)

El uso de nanotecnología para tratar agua cada vez llama más la atención de los investigadores, en el trabajo de Fahad Saleem Ahmed Khan y Nabisab Mujawar Mubarak (2020) se discute el uso nanoadsorbentes magnéticos para eliminar metales pesados en el agua, estas nanopartículas magnéticas demuestran excelentes propiedades, como la relación superficie-volumen, mayor área de superficie, baja toxicidad y fácil separación (Khan et al., 2020)

Al igual que la aplicación de la nanotecnología en tratamiento de aguas, la industria alimentaria busca plantear cuestiones de seguridad pública y ambientales,

éticas, normativas y reglamentarias, además de mejorar la calidad del producto a diferencia de usar métodos y materiales convencionales (Yu *et al.*, 2018)

2.3.2 Nanotecnología en industria alimentaria.

Una de las aplicaciones de la nanotecnología en el campo de envases para alimentación es la aplicación de materiales aditivados con nanoarcillas, que mejoren las propiedades mecánicas, térmicas, barrera a los gases, entre otras; de los materiales de envasado, En cuanto al alimento, por medio de esta nueva tecnología pueden hacerse modificaciones en composición del alimento, control de maduración, estimación de vida útil, etc (Jaimes *et al.*, 2017).

La nanotecnología en la industria alimentaria ha empleado NM que podrían proteger los alimentos de la humedad, olores, sabores, lípidos y gases no deseados, es interesante la aplicación en este campo, sin embargo al tratarse de una tecnología nueva, es importante dar prioridad al impacto ambiental que podría generar en el medio ambiente y la población en general, por lo tanto se requiere realizar pruebas obligatorias de los nano alimentos antes de ser comercializados (Singh *et al.*, 2017). Otra de las aplicaciones de la nanotecnología es en la medicina, esta nueva rama científica se denomina nanomedicina, que rápidamente se ha implementado el uso de la nanotecnología para el diagnóstico, tratamiento y control de diferentes enfermedades (Gómez-Garzón *et al.*, 2020).

2.3.3 Nanotecnología en la medicina

Las nanopartículas pueden ser empleadas para mejorar la selectividad y especificidad de las técnicas de diagnóstico por imagen, en este campo destaca el papel desempeñado por las nanopartículas ferromagnéticas, existe también la posibilidad de emplear nanopartículas como agentes duales diagnóstico-terapéuticos, o Tera gnósticos, permitiendo realizar el diagnóstico y el tratamiento en un mismo acto médico (Frutos Millán y Ángeles).

Existe un nanomaterial muy importante que es ampliamente usado en la medicina, principalmente para fines terapéuticos, el fosfato cálcico, es uno de los

materiales más prometedores para aplicaciones de reparación ósea (Levingstone *et al.*, 2019)

2.3.3.1 Nanopartículas de Fosfato Cálculo en la medicina

La nano hidroxapatita (nHAp) o fosfato cálcico es un material biocerámico que tiene una amplia aplicación médica desde el punto de vista de terapia para regeneración de huesos, este compuesto es parte de la estructura ósea humana y debido a su biocompatibilidad, es utilizado como sustituto del injerto óseo (Fang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

Dentro de las aplicaciones de la nHAp en la medicina, también destaca su aplicación en la odontología, el trabajo de Sukriti Yadav y Swati Gangwar (Yadav y Gangwar, 2020) se emplea la adición de nHAp en rellenos dentales, dicha investigación servirá para futuros tratamientos de restauración dental.

En cuanto a los estudios relacionados con la aplicación de la nHAp para la regeneración ósea, un estudio realizado por Mohammad Shakir (Shakir *et al.*, 2018) desarrolla un nano compuesto formulado con resina resol, quitosano e hidroxapatita para emplearlo como implante desnudo en la reparación del defecto de cráneo de tamaño crítico (8 mm) en ratas albinas, dentro de sus resultados demostró una rápida regeneración ósea a comparación con otros materiales de injerto óseo comerciales, asegurando que este compuesto puede ser empleado como biomaterial alternativo potencial para la ingeniería de tejido óseo.

Como se menciona, el uso de la nHAp es muy variado en cuanto a la aplicación como injerto óseo, sin embargo tiene otros usos interesantes, como la combinación de nHAp con hidrogeles, de acuerdo con el estudio presentado por (Nabavinia *et al.*, 2019), la nHAp desempeñó un papel importante en la producción celular y formación de tejido óseo debido a su bioactividad, además mejora la resistencia mecánica de los hidrogeles.

De acuerdo con lo antes mencionado, la nanotecnología y sus modernas aplicaciones están abriendo paso a una nueva era, y la energía nuclear es un punto a tomar en cuenta en esta revisión (Dutta y Das, 2021)

2.3.4 Nanotecnología en la industria nuclear.

La nanotecnología en la industria nuclear se encarga del uso de NM para futuras aplicaciones en la generación de energía nuclear, esto para abrir oportunidades de mejorar el rendimiento y seguridad de la energía nuclear (Khanal *et al.*, 2020)

La nanotecnología aplicada en la industria nuclear, está enfocada en la creación de materiales resistentes para el diseño y fabricación de reactores o para la contención y manejo seguro de los residuos nucleares, un ejemplo es la inclusión de nanopartículas en los sistemas de agua para conducir la energía térmica de una manera más apropiada y evitar el desperdicio de agua, ya que mucha energía térmica se disipa en la atmósfera en forma de vapor, así, con la nanotecnología es posible ayudar a no generar tantos residuos y a tener plantas nucleares más seguras (Cisneros y Ovalle).

Así como se han obtenido beneficios para la industria nuclear, la nanotecnología tiene el potencial para innovar las técnicas y procesos de otras industrias como el caso de la industria agrícola, que mejora el uso de nutrientes, la resistencia de enfermedades y crecimiento en plantas (Pramanik *et al.*, 2020)

2.3.5 Nanotecnología en la agricultura

Una de las principales contribuciones de la nanotecnología en el campo de la agricultura es la formulación de nano pesticidas y fertilizantes para aumentar la producción de cultivos, las técnicas agrícolas precisas pueden promover la producción de cultivos sin dañar el suelo y el agua, reduciendo las pérdidas debidas a la lixiviación de nitrógeno y mejorando la incorporación duradera de nutrientes por los microorganismos presentes en el suelo, los investigadores y fabricantes tienen que demostrar que la aplicación de nanotecnologías no tiene ningún efecto dañino en la atmósfera contra la anomalía basándose solo en pequeñas cantidades de investigación toxicológica y preocupaciones sobre la seguridad de los NM (Ali *et al.*, 2018). La agricultura debe superar varios desafíos para aumentar, o incluso mantener, la producción y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental negativo,

la nanotecnología, fundamentalmente a través del desarrollo de sistemas de suministro inteligentes y nanoportadores, puede contribuir a la ingeniería de agroquímicos más eficientes y menos contaminantes (Pérez-de-Luque, 2020).

A pesar de que el uso y aplicación de los NM brindan beneficios que ayudan a mejorar la vida de las personas y satisfacer necesidades, solo será posible emplear este recurso únicamente si se cuenta con el suficiente conocimiento sobre el impacto que pueden generar en la salud del medio ambiente y los seres vivos, esto permitirá establecer, identificar y estandarizar límites y condiciones seguras para su producción, comercialización y aplicación a nivel industrial (Lizarazo Salcedo *et al.*, 2018)

Como se menciona en la literatura, los NM y los fertilizantes son de gran relevancia para mantener el suelo sano, esto beneficia el aumento en la calidad, el rendimiento y mejora de su uso para la producción. Sin embargo, gran parte de los fertilizantes se lixivian provocando un desperdicio de energía, aumento del costo agrícola, contaminación del medio ambiente y problemas para llevar una sostenibilidad en la agricultura actual (Chen *et al.*, 2018)

2.4 Impacto ambiental de los fertilizantes.

A nivel global la producción intensa agrícola pretende aumentar la producción de cultivos utilizando fertilizantes químicos, plaguicidas y herbicidas, a pesar de que esos químicos cumplen su función para aumentar la productividad los primeros años que se aplica, son muy nocivos para la salud humana y para el medio ambiente (Calderón *et al.*, 2019).

Las marcas y tipos de fertilizantes más habituales ofrecen nutrientes en formas sintéticas que no siempre son asimilables para las plantas, además, debido a sus formas poco solubles en el suelo y los costos de su inversión, causa la baja utilización de la mayoría de los macronutrientes agregados. Estas mermas obligan optar el uso repetido de los fertilizantes (Tiwari *et al.*, 2020).

El nutriente que se considera el más importante para el desarrollo vegetal es el nitrógeno (N), para lo cual es necesario aplicar fertilizantes del mismo que

permitan garantizar el adecuado desarrollo de las plantas, estos se pueden encontrar en síntesis química con amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) O úrea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) (Ferrari, 2018).

Los fertilizantes más utilizados son los abonos nitrogenados sintéticos, su aplicación en el campo a gran escala pueden dejar un impacto importante que puede permanecer muchos años en el suelo, subsuelo y aguas subterráneas, se dice que del 12 % al 15 % de los nitratos lixiviados permanecen en el suelo hasta 28 años después de haberse aplicado (Muñoz Toro y Argote Muñoz, 2018)

Al aplicarse excesivamente los fertilizantes nitrogenados, se obtiene una serie de problemas, se minimiza el nivel de Nitrógeno recuperado por la planta, esto provoca una saturación en el suelo de dicho elemento y finalmente resulta su acidificación, esto promueve su desbalance nutrimental y también genera la volatilización de NH_3 que reduce la capacidad de aprovechamiento en el suelo (Apáez-Barrios *et al.*, 2019).

2.4.1 Ineficiencia de los fertilizantes químicos tradicionales

La eficiencia del uso de nutrientes en la agricultura desafortunadamente es inferior al 50%, lo cual es un problema que eleva los costos financieros en la producción y la contaminación ambiental, obteniendo un manejo insostenible de estos insumos (Marchiol *et al.*, 2019)

Debido a lo mencionado, es necesario hacer el uso de Fertilizantes principalmente de Nitrógeno y Fosforo de manera sostenible, la importación de fertilizantes requeridos en México es del 80 %, por lo cual hay mucho trabajo por hacer, ya que el uso excesivo provoca problemas de contaminación de agua, suelo y atmosfera (Saynes-Santillán *et al.*, 2019). Casi el 50 % de los fertilizantes nitrogenados no es utilizada por los cultivos, por consiguiente, el resto se pierde, se convierte en lixiviado y se volatiliza causando la contaminación de los cuerpos de agua y contaminación de la atmosfera por gases de efecto invernadero, debido a ello se prevé que el nivel de contaminación por Nitrógeno esperado para el 2050 sea un 150 % más alto que en 2010 y en el sector agrícola este aumento representará el 60 % (Martínez-Dalmau *et al.*, 2021) De acuerdo con lo mencionado, la

nanotecnología tiene el potencial de brindar soluciones innovadoras, ecológicas, capaces de atender problemáticas ambientales actuales de manera sostenible (Pathakoti *et al.*, 2018).

2.5 Agricultura sustentable

La nanotecnología enfocada a la industria agrícola es una herramienta eficaz para mejorarla, ya que ayuda a impulsar la economía global. Dado a los problemas medio ambientales globales como el cambio climático y la sobrepoblación global, el uso de NM en la agricultura contribuye a reducir los daños causados por el uso excesivo de fertilizantes químicos para aumentar la producción de los cultivos (Bahrulolum *et al.*, 2021). La aplicación de dichos NM tienen la capacidad de cambiar la producción agrícola, mejorando la eficacia en el uso de nutrientes que tienen los insumos, además de mitigar la contaminación de suelo y agua (Bayat *et al.*, 2019)

Asimismo, ha crecido la necesidad de desarrollar tecnologías amigables con el medio ambiente, una de ellas y la más novedosa es la nanotecnología verde, ya que brinda un enfoque que promueve el uso de productos sustentables (Kanwar *et al.*, 2019)

2.5.1 Nanotecnología verde

La nanotecnología es una novedad en la ciencia y la tecnología, es una tecnología aplicable en cualquier área de la ciencia, para su uso, se emplearon métodos físicos y químicos para estabilizar y sintetizar NM, desafortunadamente se ha demostrado que dichos métodos no son ecológicos y pueden perjudicar el medio ambiente y la salud de las personas, en consecuencia, a ello se ha optado por una nueva nanociencia llamada “nanotecnología verde” (Kiriyanthan *et al.*, 2021). La nanotecnología verde tiene como objetivo crear aplicaciones de NM energéticamente competentes, que respeten el medio ambiente y al mismo tiempo sean económicamente sostenibles, de esta manera poder obtener una economía verde.

La nanotecnología verde ofrece NM bastante prometedores para la mejora de eficacia de los procesos de producción en campo, como es el caso de los nanofertilizantes, nanopesticidas y nano tubos de carbono que brindan mejor protección contra plagas de alto espectro y aumenta la liberación y entrega directa de nutrientes (Chhipa, 2017) El enfoque principal de esta investigación es determinar la capacidad de retención de nutrientes que tienen las nanopartículas, específicamente los macronutrientes, que son de vital importancia en cuanto a producción agronómica, salud alimentaria y protección ambiental a comparación con otros nutrientes (Liu y Lal, 2015)

En ese sentido, los fertilizantes de lenta liberación controlada son la clave para mitigar el desperdicio nutriente aplicados y reducir las pérdidas de costos económicos, además de no seguir agravando al medio ambiente (Noppakundilokrat *et al.*, 2015)

2.5.1.1 Fertilizantes y compuestos de lenta liberación.

Existe una tecnología basada en la liberación lenta de sustancias activas específicas en un sistema, se llaman tecnologías de liberación sostenida y es una nueva tecnología que busca mantener una cierta concentración dentro de un medio por un tiempo más prolongado, esto puede ser empleado para remediación de suelo, atmósfera y diferentes tipos de agua (potable, residual, subterránea y pluvial) (Wang y Liu, 2019). Un ejemplo bien aplicado de esta tecnología para mitigar la problemática que conlleva el uso tradicional de fertilizantes son los fertilizantes de lenta liberación (El-Aziz *et al.*, 2021)

La función de los fertilizantes de lenta liberación es liberar de manera gradual los nutrientes ya sea en forma orgánica o inorgánica, en relación a la demanda de la planta, se pueden encontrar comúnmente como gránulos de fertilizante recubiertos por un material sintético o por otro recurso dependiendo del proceso de elaboración (Beig *et al.*, 2020) Existen diversos estudios enfocados a la aplicación de fertilizantes de lenta liberación, como el caso de la hibridación de compuestos, que en conjunto trabajan para mejorar la capacidad de liberación gradual de

nutrientes, uno de esos compuestos es la hidroxiapatita (nHAp), que es capaz de liberar nitrógeno lentamente a comparación con la ausencia de nHAp (Wibisono *et al.*, 2020) de ahí y debido a eso, surge la importancia de este compuesto en la realización de esta revisión. 2.5.1.2 Nanocompuestos híbridos. Dentro de la rama de la nanociencia, los nanocompuestos híbridos son una combinación de las propiedades de dos materiales en un solo sistema híbrido que puede tener ventajas a favor en comparación con plataformas no híbridadas (Vidal-Limón *et al.*, 2017). Dichas ventajas de la hibridación de compuestos mejoran la eficacia en los procesos dependiendo de su tipo de aplicación en distintos campos, como la medicina, el sector agrícola, la industria alimentaria y el tratamiento de aguas (Bernardo *et al.*, 2019)

Las fusiones de los distintos nanocompuestos híbridos se pueden dividir en seis amplias categorías (Abd-Elsalam, 2020). Tabla 2

<i>No</i>	<i>Nanomateriales híbridos (NMHs)</i>	<i>Aplicaciones</i>
<i>I</i>	NMHs orgánicos	Antimicrobiano, detección y degradación de pesticidas, veterinaria, tratamiento de agua, seguridad alimentaria
<i>II</i>	NMHs inorgánicos	Antimicrobianos, promoción y protección de las plantas, veterinaria, tratamiento de aguas, seguridad alimentaria
<i>III</i>	Nanopartículas bimetálicas	Aplicaciones catalíticas, imagen de resonancia magnética, biosensores, antimicrobianas y biorremediación
<i>IV.</i>	Nanopartículas multimetálicas	Antibacterial y detección química/biológica
<i>V</i>	NMHs metálicos-poliméricos	Antimicrobianos, promoción y protección de las plantas, veterinaria, tratamiento de aguas, seguridad alimentaria
<i>VI</i>	NMHs lípidos-poliméricos	Entrega de materiales de ADN o ARN y uso como agente de diagnóstico por imágenes

Tabla 2. Categorías de nanomateriales híbridos

Entre otras aplicaciones, en la literatura ya existen trabajos enfocados a la agronomía, debido a las excelentes características de los nanomateriales, dentro de la industria agrícola funcionan como encapsuladores para múltiples sustancias peligrosas derivadas de pesticidas, fertilizantes, potenciadores y hormonas, lo cual mejora la estabilidad y reactividad al tiempo que potencia sus mecanismos (Manna y Bandyopadhyay, 2019)

Según la investigación de Zhang Boyang (Zhang *et al.*, 2019), respecto a la aplicación de compuestos híbridos, preparó un compuesto de zeolita-diatomita térmicamente modificadas con el fin de analizar y evaluar la capacidad que tiene dicho compuesto de eliminar y adsorber nitrógeno y fosforo provenientes de aguas residuales agrícolas, el cual según los resultados se confirma tener un gran potencial de captura de N y P, esto nos abre un gran número de futuras, ecológicas y practicas aplicaciones.

2.6 Hidroxiapatita en la agricultura

La hidroxiapatita nHAp es un mineral con formula $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ o $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$, se encuentra de manera natural en los huesos, la dentina y esmalte dental, la nHAp se ha utilizado e investigado en diferentes campos, especialmente en la ingeniería biomédica, en la cual se encuentran distintas aplicaciones como la elaboración de fármacos, transferencia de genes y análisis biológicos (Pham *et al.*, 2020). Sin embargo, debido a las propiedades de la nHAp se ha empleado en la industria agropecuaria, según la literatura se podría emplear la nHAp para aumentar eficiencia del uso de fertilizantes realizando una lenta liberación de nutrientes (De la Vega García *et al.*, 2020). Las nHAp pueden emplear su potencial de diferentes maneras, como fertilizantes de liberación controlada y también como nanoportador para la entrega de macro y micronutrientes, estas nanopartículas penetran el interior de los tejidos vegetales realizando su acción ya sea conservando su estructura o disolviéndose para liberar los nutrientes (Yoon *et al.*, 2020)

La nHAp posee propiedades que destacan por su eficiencia, en otros estudios se ha utilizado para la remediación de aire suelo y agua por la capacidad

de adsorción que tiene, facultad que servirá en esta investigación para determinar la retención de macronutrientes (Ibrahim *et al.*, 2020)

Otro material ideal para emplear funciones de retención de nutrientes y humedad es la Zeolita, gracias a sus propiedades físico-químicas, este acondicionador de suelo tiene la capacidad de controlar la movilidad del agua, amonio y otros cationes presentes en el suelo, es por eso que desempeña un papel importante como compuesto mejorador de las propiedades del suelo (Malferrari *et al.*, 2021)

2.7 Zeolita y aplicaciones

La zeolita es un mineral con características interesantes, cuentan con espacios porosos y canales internos que permiten una elevada capacidad de intercambio catiónico (Torri *et al.*, 2021), además, la selectividad de sorción es una de sus propiedades físico-químicas únicas que la caracterizan, esto le da la oportunidad de ser aplicable en diversas tecnologías y áreas de investigación (Yoleva *et al.*, 2021). La zeolita se ha aplicado para rehabilitación de suelos contaminados por metales pesados tóxicos (Głąb *et al.*, 2021), se puede utilizar en la construcción junto con el cemento y hormigón para adsorber el CO₂ y de esta manera mitigar los gases de efecto invernadero (Waghmare *et al.*, 2021) y también se puede usar como filtro para depurar aguas residuales y reducir su contaminación (Alcívar *et al.*, 2018)

Las propiedades de las zeolitas como la capacidad de adsorbente, intercambiabilidad iónica, efecto inmunomodulador, antioxidante, la biocompatibilidad, la estabilidad química y biológica a largo plazo brindan aplicaciones en la biomedicina muy interesantes, entre ellas destacan la medicina regenerativa, sistemas de administración de fármacos, ingeniería de tejidos, eliminación de iones nocivos del cuerpo, absorbedor de gases, la hemodiálisis, y relleno de raíces dentales, incluyendo que las zeolitas son sustancias antibacterianas y no tóxicas (Serati-Nouri *et al.*, 2020)

2.7.1 Zeolita en la agricultura

Las zeolitas como material dentro de la agricultura es una excelente herramienta para ayudar al agrónomo atender problemáticas como la contaminación del suelo y agua por metales pesados, lixiviados y pérdida de eficiencia en el uso del agua (Cataldo *et al.*, 2021). Este mineral es considerado un mejorador de las propiedades físicas y químicas del suelo, alivia su toxicidad y además las zeolitas tienen por selectividad los principales nutrientes esenciales como el amonio, fosfato, nitrato, potasio y sulfato (Mondal *et al.*, 2021)

Para el caso de esta revisión, la zeolita tiene un papel muy importante, es capaz de aumentar la eficiencia de los agro insumos que estos ayudan y protegen el suelo, además, resulta ser beneficioso para el suelo y para la economía ya que es rentable y los beneficios del suelo se reflejan en varios años (Méndez-Argüello y Lira-Saldivar, 2019)

Podríamos destacar que los estudios de Ambreen Lateef (Lateef *et al.*, 2016) relacionados con la capacidad de adsorción y retención de agua de la zeolita demuestran una buena capacidad de retención, mejorando la capacidad del suelo sin obtener impactos negativos en su composición, incluyendo que la liberación controlada y gradual de nutrientes a las plantas durante un largo periodo de tiempo beneficia a la mitigación de los problemas por lixiviación causante del uso tradicional de fertilizantes.

3. Materiales y métodos

3.1 Descripción del sitio

El presente estudio se realizó durante, los meses de octubre del 2021 a enero del año 2022 en el laboratorio de suelos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, ubicada en Torreón, Coahuila, México. Con las coordenadas geográficas 25°33'19"N 103°22'14"W y con una altura de 1120 msnm.



Figura 3. Localización del experimento

3.2 Características climáticas

El clima en Torreón actualmente es de subtipos secos semicálidos, a mediados de los meses de octubre y noviembre se ha presentado cierto aumento de la humedad. La temperatura media anual es de 20 a 22°C. En Torreón, los veranos son largos y cálidos, los inviernos son cortos, frescos y secos y está parcialmente nublado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 8 °C a 36 °C y rara vez baja a menos de 3 °C o sube a más de 39 °C. En cuanto a precipitación, la temporada más mojada dura 3.7 meses, de 13 de junio a 3 de octubre, con una probabilidad de más del 16 %. El mes con más días mojados en Torreón es julio, con un promedio de 8.8 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación. La temporada más seca dura 8.3 meses, del 3 de octubre al 13 de junio. El mes con menos días mojados en Torreón es

marzo, con un promedio de 0.8 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación.
 Procedimiento experimental

3.3 Acondicionamiento de la zeolita con nHAp

Para la preparación de la zeolita en conjunto con la nHAp se tomó en cuenta las siguientes concentraciones.

En 1 L de agua destilada:

<i>Soluto</i>	<i>Solvente</i>	<i>Concentración (ppm)</i>
<i>MI de nHAp</i>	L de zeolita	
4	3	1000
8	3	2000
16	3	4000

Tabla 3. Acondicionamiento de zeolita con nHAp

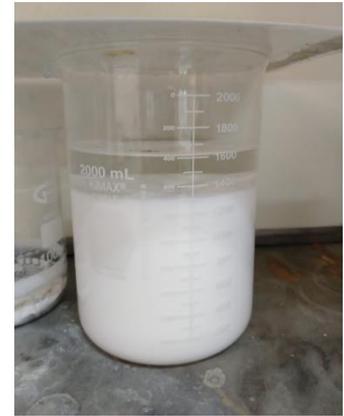


Figura 4. Preparación de nHAp



Figura 5. Preparación de Zeolita y Perlita



Figura 6. Concentraciones de Zeolita con nHAp

3.3.2 Diseño experimental

En este trabajo, se utilizó un diseño factorial de dos factores donde el Factor A corresponde al tipo de sustrato utilizado y el Factor B a la concentración utilizada de la nano hidroxapatita, se establecieron 9 tratamientos con 3 repeticiones por tratamiento. Se consideró como unidad experimental un porómetro conteniendo la combinación de perlita sustrato zeolítico y nanopartículas nHAp, la matriz de datos y los tratamientos quedaron de la siguiente manera:

FACTOR A	FACTOR B	TRATAMIENTOS	REPETICIONES
Perlita - Zeolita	nHAp (mg L ⁻¹)		
1A (70% - 30%)	1B=1000	T1 = 1A*1B	3
	2B=2000	T2 = 1A*2B	3
	3B=4000	T3 = 1A*3B	3
2A (50% - 50%)	1B=1000	T4 = 2A*1B	3
	2B=2000	T5 = 2A*2B	3
	3B=4000	T6 = 2A*3B	3
3A (30% - 70%)	1B=1000	T7 = 3A*1B	3
	2B=2000	T8 = 3A*2B	3
	3B=4000	T9 = 3A*3B	3

Tabla 4. Matriz de datos y tratamientos

Para la realización del experimento, se fabricó una mesa de madera reciclada para colocar los porómetros.



Figura 7. Fabricación de mesa

Una vez realizada la mesa, se comenzó con la elaboración de los porómetros, los cuales para su fabricación se utilizaron tubos de PVC de 2 pulgadas, cada porómetro tiene una altura aproximada de 35 cm, están sellados con un tapón ciego y se les hizo un orificio en la parte inferior para poder drenar el lixiviado contenido.



Figura 8. Fabricación de porómetros



Figura 9. Etiquetado y rotulado de porómetros.

Posterior a ello se disolvió el fertilizante de la marca FertiDrip que contiene 20 % de cada macroelemento (NPK) en un balde de 20 L, del cual se tomaron 200 ml para introducir en cada uno de los tratamientos en conjunto con la zeolita y perlita.



Figura 10. Fertilizante FertiDrip utilizado



Figura 11. Preparación de tratamientos

Se dejaron los tratamientos en reposo durante 24 horas y se recolectó el lixiviado resultante de cada una de ellas.



Figura 12. Colación de lixiviado resultante



Figura 13. Muestras extraídas en frascos rotulados

3.3.3 Determinación de Nitrógeno total (Método Kjeldahl)

3.3.3.1 Material y equipo.

- Matraces Kjeldahl Pyrex de 800 ml
- Probetas de 100 ml
- Vaso de precipitado de 100 ml
- Matraz Erlenmeyer de 500 ml
- Pipeta 5 ml
- Bureta de 25 ml
- Perlas de ebullición
- Digestor y destilador Kjeldahl



Figura 14. Digestor y destilador Kjeldahl Modelo: KGU-COMB

3.3.3.2 Reactivos

- Ácido sulfúrico concentrado
- Ácido salicílico
- Tiosulfato de sodio anhidro o pentahidratado
- Hidróxido de sodio al 45 % en agua destilada
- Ácido clorhídrico 0.1 N
- Hidróxido de sodio 0.1 N
- Mezcla de indicadores. Se disuelven 0.099 G de verde bromocresol y 0.066 G de rojo de metilo en 100 ml de alcohol etílico a 95 %

3.3.3.3 Procedimiento

Se disolvió 1 g de ácido salicílico en 35 ml de ácido sulfúrico concentrado, posterior a ello se tomó 5 ml de la muestra y añadió al matraz procurando que no resbale por las paredes y se dejó reposar 30 minutos

Pasados los 30 minutos se agregó 15.69 g de tiosulfato de sodio pentahidratado y 7.82 g de sulfato de cobre pentahidratado.

Se puso a digerir hasta obtener un color verde claro, se dejó enfriar y se le adicionaron 300 ml de agua destilada

3.3.3.4 Destilación.

Se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml, 10 ml de ácido clorhídrico 0.1 N, Posteriormente se agregaron 50 ml de agua destilada, se aplicaron 4 gotas de rojo de metilo y después se colocó el matraz en el tubo de destilación.

Al matraz Kjeldahl se le agregaron 100 ml de hidróxido de sodio al 45 % y se colocó en el destilador lo más rápido que fue posible.

En el matraz de 500 ml se recogieron 200 ml del filtrado

3.3.3.5 Titulación

Se tituló con hidróxido de sodio 0.1 N hasta que el color rojizo desaparezca y quede un color verde claro.

3.3.3.5 Cálculos

Una vez realizada la titulación de las muestras se hicieron los siguientes cálculos:

$$\% N Total = \frac{[(ML NaOH TESTIGO) - (ML NaOH MUESTRA)] \times N \times 0.014 \times 100}{ML DE MUESTRA}$$

Donde:

- N = Normalidad del hidróxido de sodio, utilizado para titular tanto el testigo como la muestra
- 0.014 = Peso equivalente de nitrógeno

- El % de Nitrógeno total fue requerido en mg L^{-1} , por lo tanto, para cada resultado se tomó en cuenta lo siguiente:

$$1 \% = 10,000 \text{ mg L}^{-1}$$

$$x \% = \text{mg L}^{-1}$$

- $X = \% \text{ N total obtenido}$

3.3.4 Determinación de Fosforo (Método Olsen)

3.3.4.1 Material y equipo.

- Matraz Erlenmeyer de 125 ml
- Cuadros de Parafilm
- Papel filtro
- Pipetas volumétricas de 5 y 10 ml
- Matraz aforado de 25 ml
- Bureta de 50 ml
- Frascos de vidrio
- Probeta de 50 ml
- Agitador de acción recíproca
- Espectrofotómetro

3.3.4.1 Reactivos

- solución extractora, bicarbonato de sodio 0.5 M. Se pesaron 42 g de NaHCO_3 , se disolvieron en 900 ml de agua, posteriormente se ajustó el Ph a 8.5 con NaOH 10 N y se aforó a 1 L
- Ácido sulfúrico 14 N. Se diluyeron 196 ml de H_2SO_4 concentrado (si $\rho=1.84 \text{ g/cm}$ y pureza de 95 %) en agua y se afora 500 ml
- Tartrato de antimonio y potasio al 0.5 %. Se pesan 0.5 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ y se disuelven en 100 ml de agua.

- Molibdato de amonio. Se disuelven 20 g de $[(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 300 ml de agua, se agregan lentamente, bajo constante agitación y con cuidado, 450 ml de H_2SO_4 14 N. Se agregan 100 ml de tartrato de amonio y potasio al 0.5 %. Se diluyen las mezclas a 1 L con agua, se guarda esta solución en frasco oscuro para protegerlo de la luz. (Reactivo A)
- Solución reductora, Acido ascórbico. Se disuelven 0.50 g de $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ con solución de molibdato de amonio y se afora con la misma solución a 100 ml. Esta solución se prepara minutos antes y cada vez que se vaya a realizar la colorimetría. (Reactivo B)
- Estándar de Fosforo de 200 mg L^{-1} . Se disuelven 0.8786 g de fosfato dihidrógeno de potasio (KH_2PO_4), secado a 105°C durante 2 horas en agua y se diluye a 1 L. Se guarda en frasco de plástico o de vidrio
- Estándar de fosforo de 5 mg L^{-1} . Se diluyen 5 ml de solución de 200 mg L^{-1} de P a 200 ml con agua, se prepara en el momento de desarrollar la colorimetría.

3.3.4.2 Procedimiento

Se extrajeron 2.5 ml de cada una de las muestras a analizar y se colocaron en matraces Erlenmeyer de 125 ml, posterior a ello se cubrieron con cuadro Parafilm y se le agregaron 50 ml de solución extractora.



Figura 15. Agitador de acción reciproca Eberbach Modelo: E6010

Se agitaron de manera vertical por 30 minutos a 180 oscilaciones por minuto e inmediatamente después de terminar el tiempo se filtraron con papel filtro.

Para la determinación de P se tomó una alícuota de 5 ml del filtrado y se colocó en un tubo de aforado de 25 ml.

Se le adicionó 4 ml de reactivo B y se aforó con agua destilada cubriéndolo con Parafilm y se agitó.

Posteriormente, después de 30 minutos se leyó la absorbancia a 882 nm y se preparó una curva de calibración de P. Los patrones de calibración fueron de 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 mg L⁻¹ a matraces aforados de 50 ml.

Para la toma de lectura:

1. Se pipetearon 0, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 ml de una solución de 5 mg L⁻¹ de P a matraces aforados de 50 ml.
2. Se adicionó un volumen de solución extractante de NaHCO₃ igual a la alícuota empleada para medir en las muestras desconocidas.
3. Se llenó a aproximadamente 40 ml con agua y se adicionaron 5 ml de solución reductora con ácido ascórbico y se aforó.
4. Se agitó nuevamente y la lectura se leyó después de 30 minutos, pero antes de una hora a 882 nm

3.3.4.3 Cálculos

$$P \text{ en mg/kg} = CC \times VI/P \times VF/A$$

Donde:

- CC= Mg L⁻¹ de P en la solución, se obtiene graficando la curva de calibración (absorbancia contra mg L⁻¹) e interpolando en la misma los valores de absorbancia de las muestras analizadas o se obtiene también por medio de una regresión simple.
- VI= Volumen de la solución extractora adicionada.

- P= Peso de la muestra.
- VF= Volumen final de la solución colorimétrica a leer.
- A= Alícuota de la muestra empleada para la cuantificación

3.3.5 Determinación de Potasio.

3.3.5.1 Preparación de reactivos

Acetato de amonio

Se diluyeron 57 ml de ácido acético glacial (CH_3COOH) en 800 ml de agua y se le añadió 69 ml de hidróxido de amonio, posterior a ello se ajustó el pH a 7 con las sustancias ya mencionadas según como corresponda y finalmente se aforó a 1 L con agua destilada.

Se preparó un estándar de K de 2 mg L^{-1} a partir de uno de cloruro de lantano de 1000 mg L^{-1}

3.3.5.2 Materiales y equipo

- Matraces Erlenmeyer de 125 ml
- Vasos de precipitado
- Pipeta de 1 y 5 ml
- Cuadros de Parafilm
- Probetas de 50 ml
- Matraces aforados de 100 ml
- Matraces aforados de 25 ml
- Papel filtro

- Agitador de acción recíproca
- Espectrofotómetro de absorción atómica



Figura 16. Espectrofotómetro de absorción atómica, Perkin Elmer 2380

3.3.5.3 Procedimiento

Se extrajeron 5 ml de cada muestra y se colocaron en matraces Erelmeyer de 125 ml

Se adicionó 35 ml de CH_3COOH 1 N, después se taparon los matraces con cuadros Parafilm y se agitaron de manera vertical por 10 minutos a 180 OPM, en el agitador de acción recíproca.

Una vez ya agitados, se filtraron con el papel filtro a vasos de precipitado de 50 ml.

Después se tomó 1 ml con pipeta volumétrica de cada vaso y se pasaron a matraces aforados de 100 ml.

Finalmente se aforó con agua destilada hasta los 100 ml indicados en el matraz y se agitó varias veces.

Para la obtención de resultados fue necesario hacer diluciones de 1 ml en 25 ml de agua destilada utilizando matraces aforados de 25 ml

3.3.5.4 Cálculos

$$K \text{ meq}/100g = \frac{[PPM \text{ CC} * DM * DV * 100]}{39.1 * 1000 * 5}$$

Donde:

- MG L⁻¹ CC = Partes por millón en la curva de calibración
- DM = Dilución de masa (volumen de extractante / g de muestra)
- DV = Dilución de volumen (aforo/alícuota)
- 39.1 = Factor para convertir a miliequivalentes para K
- 100/100 = Factor para expresar resultados en función de 100 g de muestra
- 5 = Peso de la muestra
- El resultado k (meq/100g) fue requerido en mg L⁻¹, por lo cual para su conversión se tomó en cuenta lo siguiente:

$$k = \frac{\text{Peso Molecular}}{\text{Valencia}} (x)$$

- X = Valor k meq/100g obtenido

4. Resultados y discusión

4.1 Retención de Macronutrientes

Tomando en cuenta que la concentración inicial del fertilizante en cada elemento, según su fabricante es de 5000 mg L⁻¹, la retención de los macronutrientes en los tratamientos de zeolita en conjunto con la nHAp demostró que hubo una reducción de la concentración final para cada elemento como se muestra en las figuras 17, 18 y 19.

Los resultados en la figura 17 muestran que existe una efectiva retención de nutrientes desde la perspectiva del sustrato utilizado. Se puede observar que todos los elementos analizados presentan retención, aunque estadísticamente para el nitrógeno y fósforo no se observa diferencia estadística significativa, por otro lado, numéricamente hablando si existen diferencias, donde el Nitrógeno presenta la mayor retención con el tratamiento 1A, con una retención de 2377.8 mg L⁻¹ mientras que, para el Potasio, el tratamiento 3A (P30 – Z70) resultó ser el mejor en capacidad de retener este elemento.

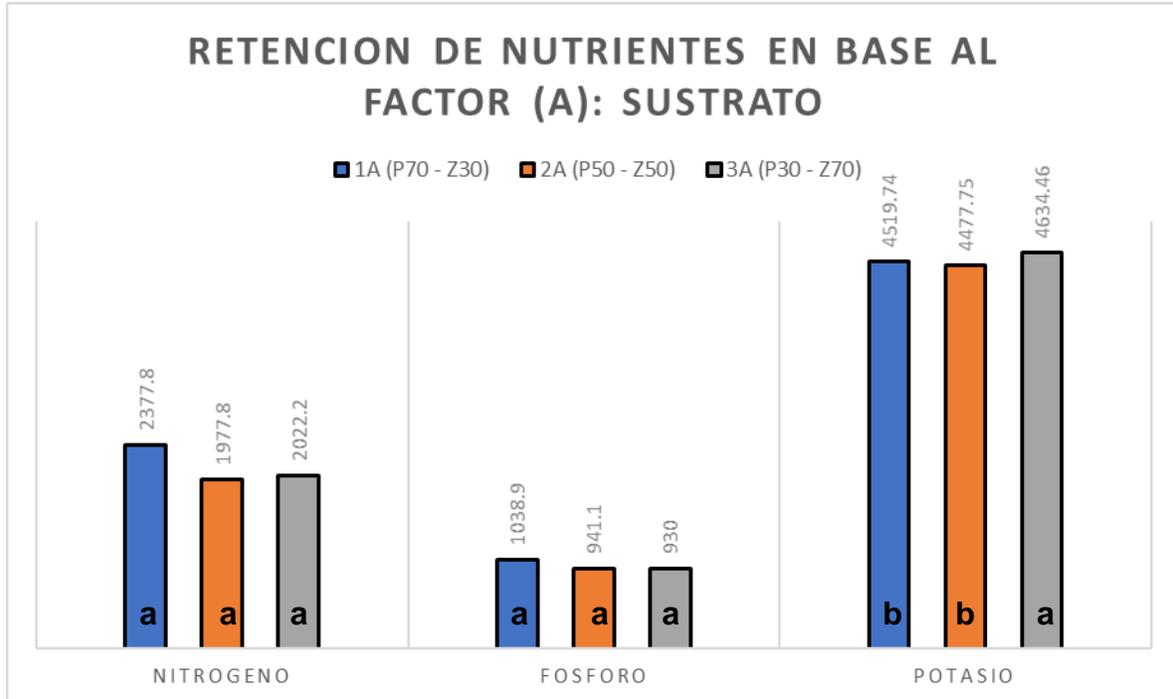


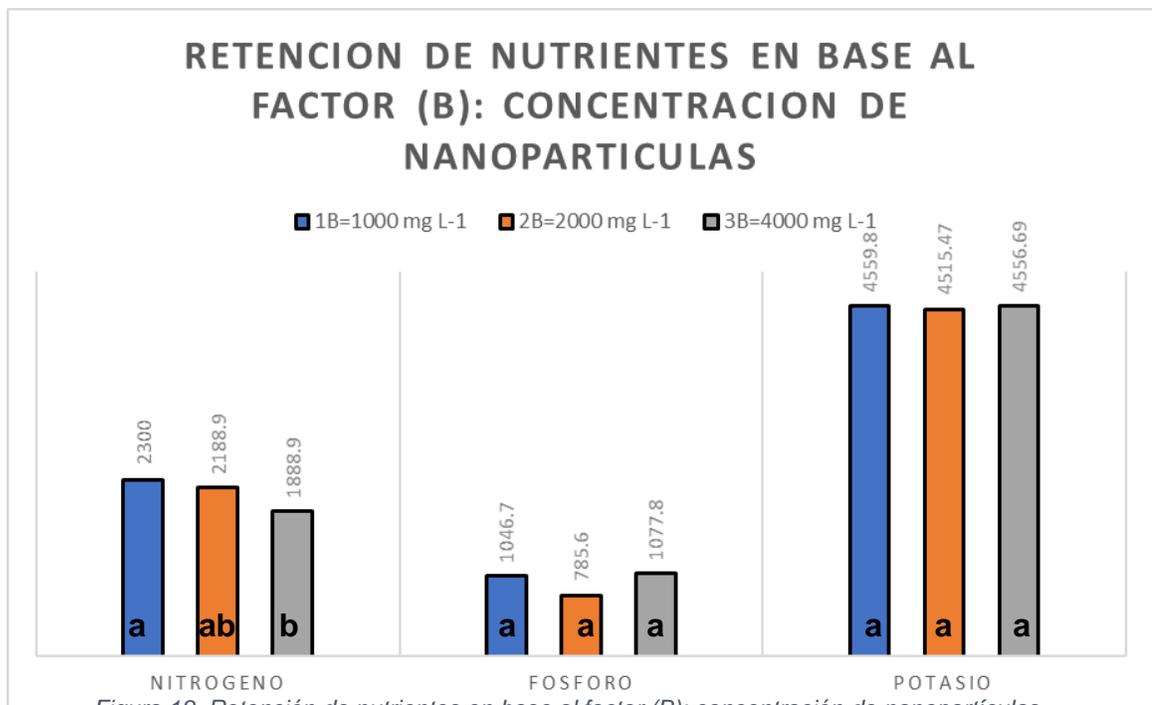
Figura 17. Retención de nutrientes en base al factor (A): sustrato

Para el tratamiento 1A la capacidad de retención para los macronutrientes en el mejor de los casos fue de: Nitrógeno 47.55 %. Fosforo 20.79 % y Potasio con 90.39 %.

En el tratamiento 2A se obtuvieron porcentajes de retención en orden de: Nitrógeno 39.55 %, Fosforo 18.82 % y Potasio con 89.55 %.

Para el tratamiento 3A, los porcentajes de retención fueron de: Nitrógeno 40.44 %, Fosforo 18.60 % y Potasio con 92.68 %.

La siguiente gráfica (figura 18), muestra que existe una efectiva retención de nutrientes desde la perspectiva de la nanopartícula de Hidroxiapatita. Para el fosforo y potasio no se observa diferencia estadística significativa, mientras que, para el Nitrógeno, el tratamiento 1B (1000 mg L^{-1}) resulto ser el mejor en capacidad de retener este elemento. Por otra parte, Numéricamente hablando las diferencias de los valores indican que el tratamiento 1B fue el más eficiente en cuanto a retención, para el fosforo el mejor de los casos fue el tratamiento 3B y para el Potasio resultó ser el tratamiento 1B respectivamente



Para el tratamiento 1B (1000 mg L⁻¹) el porcentaje de la retención de nutrientes obtenida fue de: Nitrógeno 46 %, Fosforo 20.93 % y para Potasio 91.19 %.

En el tratamiento 2B (1000 mg L⁻¹) los porcentajes obtenidos fueron de: Nitrógeno 43.77 %, Fosforo 15.71 % y Potasio con 90.31 %

El tratamiento 3B (4000 mg L⁻¹) y sus respectivos porcentajes de retención fueron de: Nitrógeno 37.77 %, Fosforo 21.55 % y Potasio con 91.13 % de retención.

Los resultados que se expresan a continuación en la gráfica de la figura 19, muestran que existe una efectiva retención de nutrientes en la combinación de factores sustrato – nano hidroxapatita. Para el nitrógeno y fosforo no se observa diferencia estadística significativa, sin embargo, como se muestra en las tablas 5 y 6, para el Nitrógeno los valores indican que el tratamiento 1A * 1B fue el más eficiente en retención con un 51.33 %, para el fosforo el tratamiento 1A * 3B obtuvo una mejor retención con un 25.33 %, mientras que, para el Potasio, el tratamiento 3A * 1B resulto ser el mejor en capacidad de retención de este elemento con un 93.18 %.

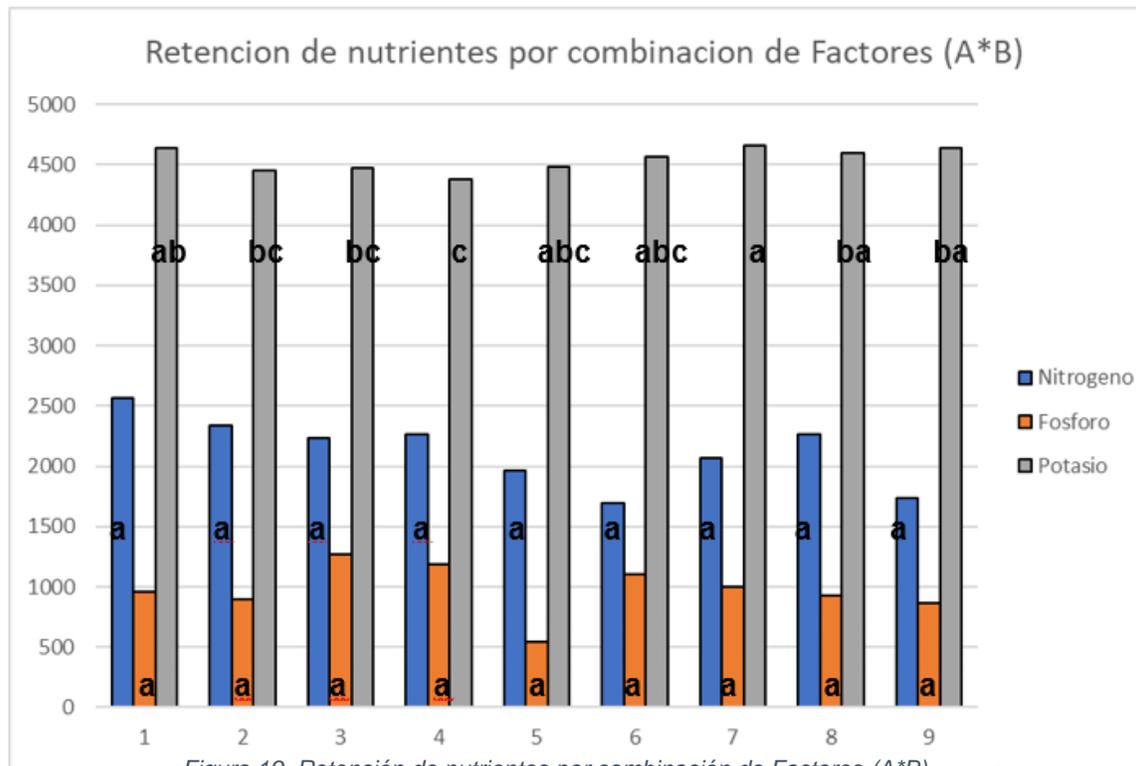


Figura 19. Retención de nutrientes por combinación de Factores (A*B)

Combinación de factores según la gráfica anterior:

TRATAMIENTOS	FACTOR A	FACTOR B
	Perlita - Zeolita	nHAp (mg L ⁻¹)
1 = 1A*1B		1B=1000
2 = 1A*2B	1A (70% - 30%)	2B=2000
3 = 1A*3B		3B=4000
4 = 2A*1B		1B=1000
5 = 2A*2B	2A (50% - 50%)	2B=2000
6 = 2A*3B		3B=4000
7 = 3A*1B		1B=1000
8 = 3A*2B	3A (30% - 70%)	2B=2000
9 = 3A*3B		3B=4000

Tabla 5. Combinación de factores A*B

Los datos de la tabla 6 muestran los porcentajes retención de macronutrientes por la combinación de factores A y B respecto a la figura 19.

TRATAMIENTO	NITRÓGENO	FOSFORO	POTASIO
1	51.33 %	19.17 %	92.72 %
2	46.67 %	17.83 %	89.08 %
3	44.67 %	25.33 %	89.38 %
4	45.33 %	23.67 %	87.59 %
5	39.33 %	10.80 %	89.78 %
6	34.00 %	22 %	91.30 %
7	41.33 %	19.97 %	93.28 %
8	45.33 %	18.50 %	92.07 %
9	34.67 %	17.33 %	92.72 %

Tabla 6. Porcentajes de retención de nutrientes por combinación de factores (A*B)

Como ya se ha mencionado, la pérdida de nutrientes y agua en la agricultura es un desafío global por atender, se han desarrollado estrategias para sobre llevar este problema, el trabajo de (Salimi *et al.*, 2020) desarrolló un fertilizante de liberación lenta de base biológica utilizando ácido acrílico-co-acrilamida con nanopartículas de carbón natural. Dicho trabajo demostró que la combinación de los compuestos ya mencionados mitigó notablemente la lixiviación de nitrato y además mejoró la capacidad de retención de agua en el suelo.

se concluyó que, a mayor pH, la concentración de nitrato en lixiviados de muestras de suelo que contienen gránulos de urea curiosamente aumentó de 331.7 mg L⁻¹ 591.8 mg L⁻¹, mientras que en 2 formulaciones de fertilizantes de liberación lenta (SRF) redujo de 230,9 y 140.8 mg L⁻¹ a 57,8 y 49.5 mg L⁻¹. Figura 17

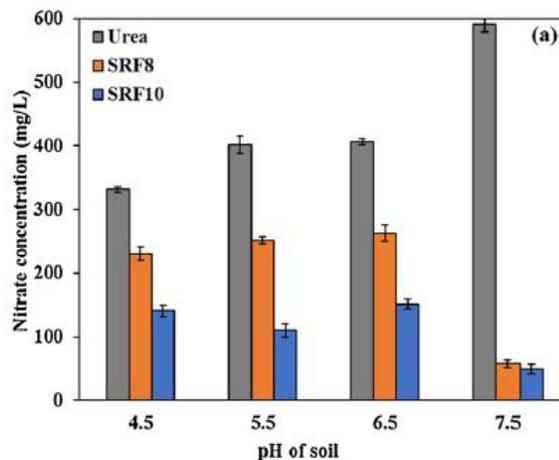


Figura 20. Concentración de nitrato en lixiviados de muestras de suelo que contienen gránulos de urea y formulaciones de SRF (Mehri Salimi *et al.*, 2020)

Según los resultados, las características del nanocompuesto mejoraron la eficiencia del fertilizante de liberación lenta producidos en suelos con diferentes niveles de pH, así como en la disminución de la concentración de lixiviación de nitrato en el suelo.

En otro trabajo en busca de estrategias para el saneamiento de aguas deterioradas a causa de la eutrofización (Xu *et al.*, 2020) llevó a cabo una investigación para determinar la viabilidad del uso de nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas y dispersadas en zeolitas por extractos de hoja de eucalipto para

eliminar fosfato y amoníaco en soluciones acuosas. La eliminación de fosfato y amoníaco fue extremadamente rápida, la eficiencia de eliminación de ambos compuestos aumentó a 32.2 % y 95.1% respectivamente, después aumentó gradualmente con el tiempo a 40.2 % y 98.8 % como se muestra en la figura 18.

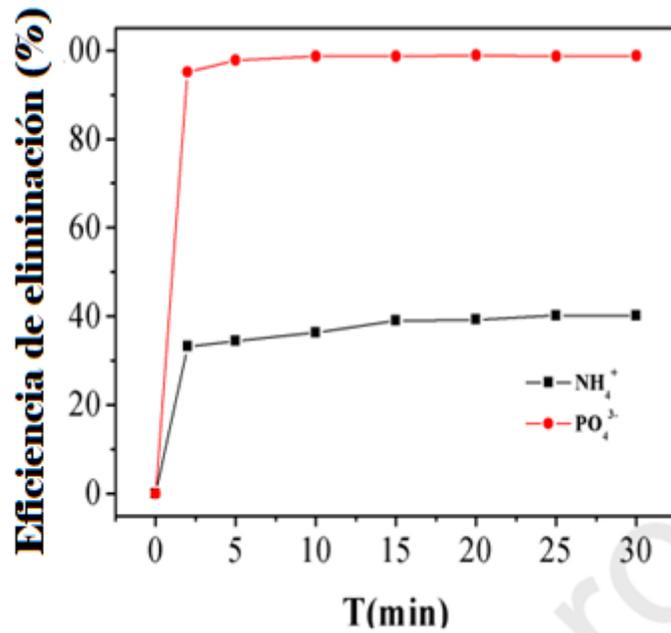


Figura 21. % de eliminación de NH₄⁺ y PO₄³⁻ (Qianyu Xu et al,2020)

Estos resultados indican que el potencial para retener fosfato y amoníaco de las nanopartículas de óxido de hierro dispersadas en zeolitas por extractos de hoja de eucalipto es eficiente como estrategia en la nanorremediación.

Podemos confirmar de los trabajos anteriormente mencionados evidencian la eficiencia y beneficios del uso de nanotecnología, ya que tiene el potencial de mejorar el rendimiento agrícola aprovechando las propiedades preponderantes de los materiales nanoestructurados (Madzokere *et al.*, 2021).

sin embargo, a pesar de los avances en investigaciones en campo y laboratorio, además de los efectos positivos de emplear nanopartículas, también existen posibles efectos adversos en plantas y suelo, como mermas en desarrollo de plantas y raíces, pigmentos, productividad, cambios en las propiedades

fisicoquímicas y biológicas de los suelos y reducción organismos presentes en el (Pérez-Hernández *et al.*, 2020)

Por consiguiente, es necesaria la evaluación de riesgos para cada investigación relacionada con la utilización de nanotecnología en materia de la industria agrícola, ya que actualmente no existen muchos estudios que fundamenten los riesgos a tomar en cuenta.

En cuanto a la nHAp no se han encontrado riesgos o alteraciones al medio ambiente debido a su uso, de hecho según (Yang *et al.*, 2016) la nHAp puede remediar a gran medida el suelo contaminado con Pb y simultáneamente acelera la recuperación de la fertilidad del suelo

5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos interpretar que nuestra hipótesis de que, dentro de un sistema, las nanopartículas de hidroxiapatita en conjunto con sustratos zeolíticos tienen la capacidad de retención de macronutrientes es verdadera, sin embargo, se recomienda llevar a cabo investigaciones enfocadas a la retención de micronutrientes (Zn, S, Mg, Ca, entre otros) ya que son parte del contenido de los fertilizantes tradicionales. Por lo anteriormente expuesto, aceptamos la hipótesis, que indica que un nano compuesto híbrido tiene la capacidad de retención de macronutrientes.

Tras el análisis realizado en nuestra revisión, podemos deducir que la aplicación de nanopartículas en el suelo ayuda como mejorador del mismo brindando beneficios ambientales, en producción agrícola para ahorro de insumos y recursos hídricos, lo cual nos ofrece una gran oportunidad de plantear más estrategias que sean sostenibles sin comprometer a las futuras generaciones, es por esa motivación que también se sugiere efectuar más investigaciones empleando nanotecnología, así como evaluaciones de impacto ambiental antes de su aplicación.

6. Referencias

- Abd-Elsalam, K. A. (2020). Chapter 1 - Multifunctional hybrid nanomaterials for sustainable agri-food and ecosystems: A note from the editor. Multifunctional Hybrid Nanomaterials for Sustainable Agri-Food and Ecosystems. K. A. Abd-Elsalam, Elsevier: 1-19.
- Acosta Turo, R., M. Cervantes, I. Gallardo, N. Hernández, J. Khalil Silva y M. Prieto Ríos "Implementación de nanotecnología en fármacos."
- Ajith, M. P., M. Aswathi, E. Priyadarshini y P. Rajamani 2021. "Recent innovations of nanotechnology in water treatment: A comprehensive review." *Bioresource Technology* 342: 126000.
- Alcívar, M. S. G., A. V. Pérez y M. R. Gámez 2018. "La zeolita en la descontaminación de aguas residuales." *Universidad Ciencia y Tecnología*: 9-9.
- Ali, S., O. Shafique, T. Mahmood, M. A. Hanif, I. Ahmed y B. A. Khan 2018. "A review about perspectives of nanotechnology in agriculture." *Pakistan Journal of Agricultural Research* 30: 116-121.
- Apáez-Barrios, P., M. B. N. Lara-Chávez, M. Apáez-Barrios y Y. A. Raya-Montaño 2019. "Producción y rentabilidad de calabacita con aplicación de zeolita y fertilizante químico " *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 10: 211-221.
- Bahrulolum, H., S. Nooraei, N. Javanshir, H. Tarrahimofrad, V. S. Mirbagheri, A. J. Easton y G. Ahmadian 2021. "Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector." *Journal of Nanobiotechnology* 19: 86.
- Bayat, M., E. Пакина, T. Astarkhanova, A. Sediqi, M. Zargar y V. Vvedenskiy 2019. "Review on agro-nanotechnology for ameliorating strawberry cultivation." 731-736.
- Beig, B., M. B. K. Niazi, Z. Jahan, A. Hussain, M. H. Zia y M. T. Mehran 2020. "Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review." *Journal of Plant Nutrition* 43: 1510-1533.
- Bernardo, M. P., F. K. V. Moreira, L. H. C. Mattoso y S. Raja (2019). Innovations in Antimicrobial Engineered Nanomaterials. Advanced Nanostructured Materials for Environmental Remediation. M. Naushad, S. Rajendran and F. Gracia. Cham, Springer International Publishing: 253-277.
- Calderón, F. E. J., J. W. C. Guerra y D. A. O. Lucio 2019. "Impacto ambiental provocado por el inadecuado uso de fertilizantes químicos en cultivos de maíz." *Revista Científica Multidisciplinaria*. 3: 61-72.
- Cataldo, E., L. Salvi, F. Paoli, M. Fucile, G. Masciandaro, D. Manzi, C. M. Masini y G. B. Mattii 2021. "Application of zeolites in agriculture and other potential uses: A review." 11: 1547.
- Chen, J., S. Lü, Z. Zhang, X. Zhao, X. Li, P. Ning y M. Liu 2018. "Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment." *Science of The Total Environment* 613-614: 829-839.
- Chhipa, H. 2017. "Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture." *Environmental Chemistry Letters* 15: 15-22.
- Cisneros, J. J. y V. J. S. M. Ovalle "Energía nuclear y las aplicaciones de la nanotecnología."

- Claudio Inostroza B, T. N. R. 2018. "Aplicaciones de la nanotecnología. Nanomateriales manufacturados en la agricultura." *Campo & Tecnología*: 24-26.
- Dasgupta, N., S. Ranjan y C. Ramalingam 2017. "Applications of nanotechnology in agriculture and water quality management." *Environmental Chemistry Letters* 15: 591-605.
- De la Vega García, N. L., C. B. P. Valdivia, M. d. C. A. G. Chávez, D. P. Chacón y R. C. J. A. González 2020. "Síntesis y efecto de nanopartículas de hidroxiapatita en la germinación y crecimiento de frijol." *Agrociencia* 54: 1009-1029.
- Dutta, D. y B. M. Das 2021. "Scope of green nanotechnology towards amalgamation of green chemistry for cleaner environment: A review on synthesis and applications of green nanoparticles." *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 15: 100418.
- El-Aziz, M. E. A., D. M. Salama, S. M. M. Morsi, A. M. Youssef y M. El-Sakhawy 2021. "Development of polymer composites and encapsulation technology for slow-release fertilizers " *Reviews in Chemical Engineering*.
- Fang, C.-H., Y.-W. Lin, F.-H. Lin, J.-S. Sun, Y.-H. Chao, H.-Y. Lin y Z.-C. Chang 2019. "Biomimetic synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite composites: Therapeutic potential and effects on bone regeneration." 20: 6002.
- Ferrari, L. A. 2018. "Lixiviación de fosfatos y nitratos a partir de fertilizantes inorgánicos y orgánicos bajo lluvia simulada."
- Frutos Millán, V. y S. G. M. Ángeles "Nanotecnología aplicada a la medicina."
- Głąb, T., K. Gondek y M. Mierzwa–Hersztek 2021. "Biological effects of biochar and zeolite used for remediation of soil contaminated with toxic heavy metals." *Scientific Reports* 11: 6998.
- Gómez-Garzón, M., M. A. Martínez-Ceballos, A. Gómez-López y A. Rojas-Villarraga 2020. "Aplicaciones de la nanotecnología en el campo de la oftalmología: ¿dónde estamos?" *Revista mexicana de oftalmología* 94: 221-233.
- He, X., H. Deng y H.-m. Hwang 2019. "The current application of nanotechnology in food and agriculture." *Journal of Food and Drug Analysis* 27: 1-21.
- Ibrahim, M., M. Labaki, J.-M. Giraudon y J.-F. Lamonier 2020. "Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review." *Journal of Hazardous Materials* 383: 121139.
- Jaimés, J., I. Rios y C. Severiche (2017). Nanotecnología y sus aplicaciones en la industria de alimentos - Nanotechnology and its applications in the food industry.
- Kanwar, R., J. Rathee, D. B. Salunke y S. K. Mehta 2019. "Green nanotechnology-Driven drug delivery assemblies." *ACS Omega* 4: 8804-8815.
- Khan, F. S. A., N. M. Mubarak, M. Khalid, R. Walvekar, E. C. Abdullah, S. A. Mazari, S. Nizamuddin y R. R. Karri 2020. "Magnetic nanoadsorbents' potential route for heavy metals removal—a review." *Environmental Science and Pollution Research* 27: 24342-24356.
- Khan, N. A., S. U. Khan, S. Ahmed, I. H. Farooqi, A. Dhingra, A. Hussain y F. Changani 2019. "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment: A review." *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* 16: 81-86.

- Khanal, L. R., J. A. Sundararajan y Y. Qiang 2020. "Advanced Nanomaterials for Nuclear Energy and Nanotechnology." *Energy Technology* 8: 1901070.
- Kiriyanthan, R. M., T. Maharajan, A. Radha y P. Pandikumar 2021. "A review on the role of nanotechnology in enhancing environmental sustainability." *Chemistry & Biology Interface* 11.
- Lateef, A., R. Nazir, N. Jamil, S. Alam, R. Shah, M. N. Khan y M. Saleem 2016. "Synthesis and characterization of zeolite based nano-composite: An environment friendly slow release fertilizer." *Microporous and Mesoporous Materials* 232: 174-183.
- Levingstone, T. J., S. Herbaj y N. J. Dunne 2019. "Calcium Phosphate Nanoparticles for Therapeutic Applications in Bone Regeneration." 9: 1570.
- Lira Saldivar, R. H., B. Méndez Argüello, G. D. I. Santos Villarreal y I. J. A. u. Vera Reyes 2018. "Potencial de la nanotecnología en la agricultura." *Acta Universitaria* 28: 9-24.
- Liu, R. y R. Lal 2015. "Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions." *Science of The Total Environment* 514: 131-139.
- Lizarazo Salcedo, C., E. González Jiménez, C. Arias Portela y J. Guarguati Ariza 2018. "Nanomateriales: un acercamiento a lo básico Nanomaterials: Being Closer to Basics." *Medicina y seguridad del trabajo* 64.
- Madzokere, T. C., L. T. Murombo y H. Chiririwa 2021. "Nano-based slow releasing fertilizers for enhanced agricultural productivity." *Materials Today: Proceedings* 45: 3709-3715.
- Malferrari, D., A. Laurora, M. Brigatti, D. Giuseppe, B. Faccini y M. Coltorti 2021. "A time- and cost-saving method to check the point-to-point distribution of soil improvers." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 184.
- Manna, I. y M. Bandyopadhyay 2019. "A review on the biotechnological aspects of utilizing engineered nanoparticles as delivery systems in plants." *Plant Gene* 17: 100167.
- Marchiol, L., A. Filippi, A. Adamiano, L. Degli Esposti, M. Iafisco, A. Mattiello, E. Petrusa y E. Braidot 2019. "Influence of Hydroxyapatite Nanoparticles on Germination and Plant Metabolism of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.): Preliminary Evidence." 9: 161.
- Martínez-Dalmau, J., J. Berbel y R. Ordóñez-Fernández 2021. "Nitrogen Fertilization. A Review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses." 13: 5625.
- Méndez-Argüello, B. y R. H. Lira-Saldivar 2019. "Uso potencial de la zeolita en la agricultura sustentable de la nueva revolución verde " *Ecosistemas y recursos agropecuarios* 6: 191-193.
- Mondal, M., B. Biswas, S. Garai, S. Sarkar, H. Banerjee, K. Brahmachari, P. K. Bandyopadhyay, S. Maitra, M. Brestic, M. Skalicky, P. Ondrisik y A. Hossain 2021. "Zeolites enhance soil health, crop productivity and environmental safety." 11: 448.
- Mondal, S. 2020. "Potential of nanotechnology for rural applications." *Arabian Journal for Science and Engineering* 45: 5011-5042.
- Muñoz Toro, J. J. y L. A. Argote Muñoz 2018. "Determinación de la contaminación a un nacimiento de agua por fertilizantes nitrogenados asociados a la

- caficultura en finca la comunidad, vereda Versalles del municipio de Acevedo, Huila."
- Nabavinia, M., A. B. Khoshfetrat y H. Naderi-Meshkin 2019. "Nano-hydroxyapatite-alginate-gelatin microcapsule as a potential osteogenic building block for modular bone tissue engineering." *Materials Science and Engineering: C* 97: 67-77.
- Noppakundilokrat, S., N. Pheatcharat y S. Kiatkamjornwong 2015. "Multilayer-coated NPK compound fertilizer hydrogel with controlled nutrient release and water absorbency." 132.
- Ortiz-Andrade, B. M., V. Rivera-Rondón y L. M. J. R. E. s. E. y. D. d. I. C. Díaz-Vázquez 2019. "El Nanocirco: un diseño interdisciplinario para la divulgación y enseñanza de la nanociencia y la nanotecnología." *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 16: 2301-2301.
- Pandey, G. y P. Jain 2020. "Assessing the nanotechnology on the grounds of costs, benefits, and risks." *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 9: 63.
- Pathakoti, K., M. Manubolu y H.-M. Hwang (2018). Chapter 48 - Nanotechnology applications for environmental industry. Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications. C. Mustansar Hussain, Elsevier: 894-907.
- Pérez-de-Luque, A. 2020. "Guest edited collection: Nanotechnology in agriculture." *Scientific Reports* 10: 15738.
- Pérez-Hernández, H., F. Fernández-Luqueño, E. Huerta-Lwanga, J. Mendoza-Vega y D. Álvarez-Solís José 2020. "Effect of engineered nanoparticles on soil biota: Do they improve the soil quality and crop production or jeopardize them?" *Land Degradation & Development* 31: 2213-2230.
- Pham, X. N., H. T. Nguyen y N. T. Pham 2020. "Green Synthesis and Antibacterial Activity of HAp@Ag Nanocomposite Using *Centella asiatica* (L.) Urban Extract and Eggshell." *International Journal of Biomaterials* 2020: 8841221.
- Pramanik, P., P. Krishnan, A. Maity, N. Mridha, A. Mukherjee y V. Rai (2020). Application of nanotechnology in agriculture. Environmental Nanotechnology Volume 4, Springer: 317-348.
- Rosolem, C. A., G. Castoldi, L. A. Pivetta y T. E. Ochsner 2018. "Nitrate leaching in soybean rotations without nitrogen fertilizer." *Plant and Soil* 423: 27-40.
- Sabzali Parikhani, R., H. Sadighi y M. Bijani 2018. "Ecological consequences of nanotechnology in agriculture: Researchers' perspective %." *Journal of Agricultural Science and Technology* 20: 205-219.
- Saleh, T. A. 2020. "Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities." *Environmental Technology & Innovation* 20: 101067.
- Salimi, M., E. Motamedi, B. Motesharezedeh, H. M. Hosseini y H. A. Alikhani 2020. "Starch-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8: 103765.
- Saynes-Santillán, V., A. Turrent-Fernández y J. D. Etchevers 2019. "Agricultura Sustentable: el papel de la fertilización inteligente con Nitrógeno y Fósforo en México." *Elementos para Políticas Públicas* 3: 275-290.

- Serati-Nouri, H., A. Jafari, L. Roshangar, M. Dadashpour, Y. Pilehvar-Soltanahmadi y N. Zarghami 2020. "Biomedical applications of zeolite-based materials: A review." *Materials Science and Engineering: C* 116: 111225.
- Shakir, M., R. Jolly, A. A. Khan, S. S. Ahmed, S. Alam, M. A. Rauf, M. Owais y M. A. Farooqi 2018. "Resol based chitosan/nano-hydroxyapatite nanoensemble for effective bone tissue engineering." *Carbohydrate Polymers* 179: 317-327.
- Sindhwani, S. y W. C. W. Chan 2021. "Nanotechnology for modern medicine: next step towards clinical translation." 290: 486-498.
- Singh, T., S. Shukla, P. Kumar, V. Wahla, V. K. Bajpai y I. A. Rather 2017. "Application of nanotechnology in food science: perception and overview." 8.
- Srivastava, M., S. Pandey, M. Shahid, A. Singh, V. Kumar, S. Trivedi, M. K. Maurya, Y. K. Srivastava, V. Ratan, D. J. J. o. P. Srivastava y A. Microbiology 2016. "Nanotechnology and agriculture: a review." *Journal of pure and applied microbiology* 10: 1055-1061.
- Tiwari, K., R. Nayak, A. Rai, S. Singh, A. Singh, Y. Kumar, H. Tomar, T. Singh y R. Raliya 2020. "Nanofertilizers for increasing nutrient use efficiency, yield and economic returns in important winter season crops of uttar pradesh." 16: 772-786.
- Torri, S. I., J. I. Amaturu, L. Sánchez y E. O. Pacheco-Rudz 2021. "Efecto de las zeolitas sobre ciertas propiedades de un suelo enmendado con biosólidos." *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 37: 419-430.
- Tripathi, M., S. Kumar, A. Kumar, P. Tripathi y S. Kumar 2018. "Agro-nanotechnology: a future technology for sustainable agriculture." *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 7: 196-200.
- Uddin, M. N., F. Desai y E. Asmatulu 2020. "Engineered nanomaterials in the environment: bioaccumulation, biomagnification and biotransformation." *Environmental Chemistry Letters* 18: 1073-1083.
- Vidal-Limón, A., O. Contreras y S. A. Águila 2017. "Materiales híbridos como alternativa nanotecnológica para la producción de energéticos %J Mundo nano. *Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología.*" 10: 109-116.
- Waghmare, S., A. Katdare y N. Patil 2021. "Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite blended concrete in rigid pavement using artificial neural network." *Reliability: Theory applications*
- Wang, L. y X. Liu 2019. "Sustained release technology and its application in environmental remediation: A review." *International journal of environmental research and public health* 16: 2153.
- Wibisono, Y., R. Yuliani, N. Kamilia, D. Ardian, A. Lastryanto, V. Rafianto, E. Diniardi y Sandra 2020. "Hybridization of nitrogen compounds and hydroxyapatite: a slowly released fertiliser for water sustainability." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 475: 012005.
- Xin, X., J. D. Judy, B. B. Sumerlin y Z. He 2020. "Nano-enabled agriculture: from nanoparticles to smart nanodelivery systems %J *Environmental Chemistry.*" 17: 413-425.

- Xu, Q., W. Li, L. Ma, D. Cao, G. Owens y Z. Chen 2020. "Simultaneous removal of ammonia and phosphate using green synthesized iron oxide nanoparticles dispersed onto zeolite." *Science of The Total Environment* 703: 135002.
- Yadav, S. y S. Gangwar 2020. "The effectiveness of functionalized nano-hydroxyapatite filler on the physical and mechanical properties of novel dental restorative composite." *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials* 69: 907-918.
- Yang, Z., Z. Fang, L. Zheng, W. Cheng, E. Tsang, J. Fang y D. Zhao 2016. "Remediation of lead contaminated soil by biochar-supported nano-hydroxyapatite." *Ecotoxicology and environmental safety* 132: 224-230.
- Yoleva, A., S. Djambazov y S. Sabrieva 2021. "Preparation of ceramic membranes for microfiltration based on marl clay and natural zeolite from deposits in bulgaria." *Journal of chemical technology metallurgy* 56: 302-306.
- Yoon, H. Y., J. G. Lee, L. D. Esposti, M. Iafisco, P. J. Kim, S. G. Shin, J.-R. Jeon y A. Adamiano 2020. "Synergistic release of crop nutrients and stimulants from Hydroxyapatite nanoparticles functionalized with humic substances: Toward a multifunctional nanofertilizer." *ACS Omega* 5: 6598-6610.
- Yu, H., J.-Y. Park, C. W. Kwon, S.-C. Hong, K.-M. Park y P.-S. Chang 2018. "An Overview of nanotechnology in food science: Preparative methods, practical applications, and safety." *Journal of Chemistry* 2018: 5427978.
- Zhang, B., X. Wang, S. Li, Y. Liu, Y. An y X. Zheng 2019. "Preferable Adsorption of Nitrogen and Phosphorus from Agricultural Wastewater Using Thermally Modified Zeolite–Diatomite Composite Adsorbent." 11: 2053.
- Zhang, L., C. Yan, Q. Guo, J. Zhang y J. Ruiz-Menjivar 2018. "The impact of agricultural chemical inputs on environment: global evidence from informetrics analysis and visualization." *International Journal of Low-Carbon Technologies* 13: 338-352.
- Zhang, L. 2020. "Applications, challenges and development of nanomaterials and nanotechnology." *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 42.
- Zhang, Y., J. Li, M. Soleimani, F. Giacomini, H. Friedrich, R. Truckenmüller y P. Habibovic 2021. "Biodegradable Elastic Sponge from Nanofibrous Biphasic Calcium Phosphate Ceramic as an Advanced Material for Regenerative Medicine." *Advanced Functional Materials* 31.