

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



Título:

**EFEECTO DE UN NANOCOMPUESTO DE MAGNETITA-BIOCARBÓN DE CÁSCARA  
DE NUEZ PECANERA COMO NANOFERTILIZANTE EN PLÁNTULAS DE  
PIMIENTO MORRÓN (*CAPSICUM ANNUUM L.*)**

Por:

**MÓNICA FRANCO MARÍN**

Tipo de trabajo:

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenvista, Saltillo, Coahuila, México**

**JUNIO 2025**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

EFFECTO DE UN NANOCOMPUESTO DE MAGNETITA-BIOCARBÓN DE  
CÁSCARA DE NUEZ PECANERA COMO NANOFERTILIZANTE EN PLÁNTULAS  
DE PIMIENTO MORRÓN (*CAPSIUM ANNUUM L.*)

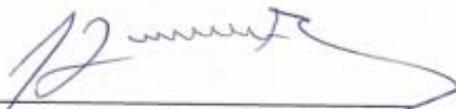
POR:

**MÓNICA FRANCO MARÍN**

TIPO DE TRABAJO

QUE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO  
EXAMINADOR COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

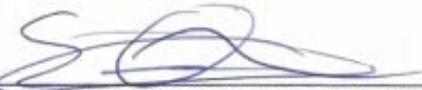
**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**



Dr. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZALES  
ASESOR PRINCIPAL



DRA. SASIROT KHAMKURE  
CODIRECTORA



M.C. ETELBERTO CORTEZ QUEVEDO  
COASESOR



DR. AUDBERTO REYES ROSAS  
COASESOR



M.C. SERGIO SÁNCHEZ MARTÍNEZ  
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

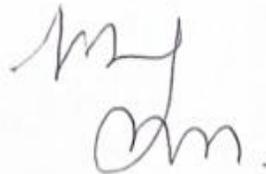
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio de 2025

## Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarlas como propia; omitir referencia bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamiento de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, vídeos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuentes, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducir, edición o modificación, sera perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna institución educativa, organización, medio público o privado

Pasante



---

MONICA FRANCO MARÍN

## AGRADECIMIENTOS

**A Dios**, fuente de toda sabiduría y verdad, le doy gracias por sostenerme en cada momento de este camino, en los días de dificultad me dio fuerzas, en los días de duda me brindó claridad. A él entrego este logro como muestra de gratitud por todo lo que ha obrado en mi vida.

**A mi Alma Terra Mater, La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en un ambiente de excelencia académica, por convertirse en mi segundo hogar y permitirme ser parte de la gran familia Buitre.

**Al Departamento de Riego y Drenaje**, por brindarme un espacio de trabajo y materiales que me ayudaron a llegar hasta esta etapa de mi vida.

**A la Doctora Sasirot Khamkure**, mi asesora principal, le agradezco por su valiosa orientación, dedicación y paciencia durante todo este proceso, su compromiso y apoyo fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

**Al Doctor Audberto Reyes Rosas**, que me brindo su apoyo desde el día uno, abriéndome las puertas de CIQA para poder llevar a cabo mi experimento, por acompañarme con dedicación, por cada consejo, cada corrección y cada palabra de aliento. Su confianza en mí fue un impulso constante para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

## DEDICATORIA

**A mi madre Domitila Marín Castillo**, ese ser extraordinario que ha sido mi refugio y mi motor, lo voz que calma mis dudas y el abrazo que reconforta mis temores, gracias madre por darme el ejemplo de como tomar las cosas, de buscar el lado positivo de las cosas, de medir lo que hago, por tus noches en vela a lo largo de toda mi carrera académica, gracias por levantarte todas las mañanas para hacerme un licuado, para llevarme al transporte, gracias por confiar en mi a pesar de todas las fallas que te he dado, gracias por tu fe inquebrantable en mis capacidades y por el respaldo inalcanzable que me has brindado a lo largo de este proceso.

¡Gracias, mamá!

**A mi hermano el Ing. Gerardo Franco Marín**, mi protector, mi ejemplo y mi fortaleza, más que un hermano ha sido como un padre para mí, gracias por enseñarme a trabajar, por valorar los pequeños detalles, por brindándome amor, por cuidarme en todos los sentidos, gracias por ser la guía en los momentos más difíciles a lo largo de toda mi vida, gracias por estar siempre a mi lado y por enseñarme el verdadero valor del esfuerzo y la perseverancia. Esta tesis es un homenaje a tu amor incondicional y a todo lo que has hecho por mí. No hay palabras suficientes para expresar lo agradecida que estoy de tenerte en mi vida.

¡Gracias, figura paterna!

**A mis hermanas Mayi y Mireya**, gracias por sus palabras de aliento cuando más las necesitaba, por respetar mis silencios, por estar presentes aún en la distancia, y por recordarme siempre de donde vengo y hacia donde quiero llegar, gracias por su cariño y apoyo incondicional.

¡Gracias, hermanas!

**A mi compañero Lalo**, por la compañía y apoyo durante toda mi formación académica. ¡Gracias!

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	4
DEDICATORIA.....	5
CAPÍTULO I.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN .....	8
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	10
1.4 HIPÓTESIS.....	12
1.5 OBJETIVOS.....	13
1.6 OBJETIVOS GENERALES .....	13
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
CAPÍTULO II.....	14
2.1 MARCO TEÓRICO.....	14
2.2 EI BIOCARBÓN Y LA PRODUCCION DE BIOCARBÓN.....	14
2.3 NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA Y BIOCARBÓN MAGNÉTICO DE LA CÁSCARA DE NUEZ .....	15
2.4 PRODUCCIÓN DEL BIOCARBÓN MAGNÉTICO A PARTIR DE CÁSCARA DE NUEZ .....	17
2.5 PROPIEDADES DE LAS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA.....	19
2.6 IMPORTANCIA DE EL USO DE LAS NANOPARTÍCULAS EN GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS.....	21
2.7 LAS APLICACIONES DE LAS NANOPARTÍCULAS DE BIOCARBÓN MAGNETITA EN LA PRODUCTIVIDAD DE CULTIVOS AGRÍCOLAS .....	24
CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....	26
3.1 PROCEDIMIENTO DE SÍNTESIS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA COMPUESTAS POR BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ COMO FERTILIZANTE.....	26
3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	26
3.2.1 Difracción de rayos X (DRX) .....	27
3.2.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	28

3.2.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROSCOPIA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDX) .....	29
3.2.4 MUESTREO DE LAS PLÁNTULAS (GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS) .....	32
3.2.5 ETAPA 1: PLANTACIÓN .....	32
3.2.6 ETAPA 2: GERMINACIÓN .....	35
3.2.7 ETAPA 3: MEDICIÓN DE PLÁNTULAS.....	36
3.2.8 ETAPA 4: CORTE DE HOJAS: .....	37
3.2.9 ETAPA 5: CORTE DE PLÁNTULA .....	38
3.3.0 ETAPA 6: LIMPIEZA DE RAÍZ.....	40
3.3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL Y DE TRATAMIENTO.....	41
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1 SÍNTESIS DE LAS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA COMPUESTO POR BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ COMO FERTILIZANTE.....	42
4.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	42
4.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) .....	42
4.2.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	43
4.2.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) .....	46
4.2.4 ESPECTROSCOPIA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDX).....	48
4.2.5 MAPEO ELEMENTAL .....	51
4.2.6 APLICACIÓN NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA COMPUESTO POR BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ COMO FERTILIZANTE EN UN EXPERIMENTO BAJO INVERNADERO. ....	52
4.2.7 MUESTREO DE LAS PLÁNTULAS (GERMINACIÓN) .....	52
4.2.8 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO (PESO FRESCO Y SECO).....	54
4.2.9 ANÁLISIS DE ESTADÍSTICO DE LOS DATOS .....	57
CAPÍTULO V.....	61
CONCLUSIÓN .....	61
LITERATURA CITADA.....	63

## CAPÍTULO I

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En el contexto de los desafíos agrícolas actuales, que incluyen la necesidad de aumentar la producción de cultivos de manera sostenible y mejorar la salud del suelo, se exploran constantemente nuevas estrategias y materiales [1]. La pérdida de materia orgánica es uno de los problemas más importantes del suelo en ciertas zonas, y la adición de enmiendas orgánicas puede desempeñar un papel clave en la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura [1].

El biocarbón es un material obtenido de la descomposición térmica (pirólisis) de biomasa residual, a menudo proveniente de residuos agroindustriales y forestales [3]. Este material presenta una alta resistencia a la descomposición, favoreciendo que el carbono permanezca más tiempo en el suelo [3].

Se ha descrito que la adición de biocarbón al suelo puede aumentar la capacidad de intercambio catiónico, retener nutrientes beneficiosos para la planta y aumentar la actividad biológica del suelo, contribuyendo así a un mejor crecimiento y producción de los cultivos [3].

Paralelamente, la nanotecnología ha emergido como un área prometedora en la agricultura, con un interés creciente en el uso de nanomateriales como los nanofertilizantes para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos, así como para optimizar la utilización de nutrientes [2].

Entre los nanomateriales de interés se encuentran las nanopartículas magnéticas, particularmente las de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [1], que es un óxido de hierro ampliamente distribuido y de bajo costo, destacando por sus propiedades magnéticas y baja toxicidad, lo que la hace conveniente para diversas aplicaciones, incluyendo las biomédicas y tecnológicas [1]. A escalas nanométricas, las nanopartículas de magnetita exhiben superparamagnetismo. Sin embargo, tienden a aglomerarse debido a fuertes interacciones magnéticas y alta energía superficial, lo que limita su dispersión y estabilidad. Para superar este desafío, se requiere funcionalizarlas o

recubrirlas con materiales orgánicos o inorgánicos, mejorando así su estabilidad, dispersión en medios líquidos y funcionalidad. La síntesis de nanopartículas de magnetita se puede realizar mediante métodos químicos como la coprecipitación. Recientemente, se ha explorado la combinación de las propiedades del biocarbón con la respuesta magnética de la magnetita para crear nanocompuestos magnéticos de biocarbón y magnetita. Estos materiales han mostrado potencial en la remoción de contaminantes del agua, aprovechando la capacidad de adsorción del biocarbón y la facilidad de separación magnética que confiere la magnetita [4]. (Rao et al., 2022; Spanos et al., 2021).

Construyendo sobre estos avances, el presente trabajo se enfoca en la aplicación de nanopartículas magnéticas compuestas por biocarbón derivado de cáscara de nuez y magnetita. Se postula que este nanocompuesto podría funcionar como un fertilizante o enmienda de suelo, combinando los beneficios conocidos del biocarbón para el suelo y el crecimiento vegetal con las propiedades únicas de las nanopartículas magnéticas que podrían influir en procesos biológicos, además de ofrecer posibles ventajas en su manejo o aplicación [5].

Para evaluar este potencial, se propone estudiar su efecto en la germinación de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). El pimiento morrón es un cultivo importante, reconocido por su valor nutricional y económico, y se ha demostrado que responde favorablemente a la aplicación de fertilizantes y nanomateriales que mejoran su crecimiento y atributos de desarrollo, incluyendo etapas tempranas como la germinación [5].

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- El uso excesivo de fertilizantes químicos solubles genera impactos ambientales negativos, como eutrofización del agua, degradación del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero y baja eficiencia en el uso de nutrientes.
- Aunque las nanopartículas de magnetita han demostrado propiedades beneficiosas como fertilizantes en cultivos como maíz forrajero y maní,

presentan limitaciones significativas: tienden a agregarse, reduciendo su superficie activa, reactividad y capacidad de dispersión en el suelo.

- Tanto el biocarbón como las nanopartículas de magnetita tienen desventajas cuando se usan individualmente como fertilizantes:
  - El biocarbón puede tener una composición nutricional inconsistente y una capacidad limitada para retener nutrientes.
  - Las nanopartículas de magnetita no aportan todos los macro y micronutrientes necesarios para el desarrollo óptimo de las plantas.
- Los desechos agrícolas, como las cáscaras de nuez pecan, frecuentemente se descartan en vertederos, y los métodos convencionales de producción de biocarbón no siempre son adecuados para aplicaciones fertilizantes específicas.
- Los métodos tradicionales de suministro de fertilizantes suelen ser poco eficientes, resultando en baja absorción de nutrientes por las plantas y pérdidas significativas por lixiviación o escorrentía.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El uso excesivo de fertilizantes químicos solubles provoca impactos ambientales como la eutrofización del agua, la degradación del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero y una baja eficiencia en el uso de nutrientes. Esta investigación busca crear un fertilizante bio-basado de liberación lenta, empleando biocarbón y nanopartículas de magnetita como una alternativa sostenible a los insumos sintéticos. Aunque la magnetita es prometedora, tiende a agregarse, lo que reduce su superficie activa, reactividad y capacidad de dispersión en el suelo. El recubrimiento con citrato mejora su estabilidad, dispersión y biodisponibilidad, además de favorecer la interacción con las raíces por su biocompatibilidad. Tanto el biocarbón como las nanopartículas de magnetita presentan limitaciones cuando se utilizan individualmente como fertilizantes. El biocarbón puede tener una composición nutricional inconsistente

y una capacidad limitada para retener nutrientes. Por otro lado, las nanopartículas de magnetita no aportan todos los macro y micronutrientes necesarios para el desarrollo óptimo de las plantas. Al combinar ambos en un nanocompuesto, donde las nanopartículas se integran en una matriz de biocarbón, se aprovechan las ventajas de cada material. El biocarbón funciona como soporte para las nanopartículas, mejorando la estructura del suelo, la retención de humedad y aportando carbono. A su vez, las nanopartículas de magnetita, gracias a su elevada área superficial, favorecen la adsorción de nutrientes y permiten su liberación de manera gradual. Los desechos agrícolas, como las cáscaras de nuez pecan, frecuentemente son descartados en vertederos, y los métodos convencionales para producir biocarbón no siempre resultan adecuados para aplicaciones específicas como fertilizantes. Esta investigación emplea biocarbón obtenido a partir de un recurso abundante y poco aprovechado las cáscaras de nuez pecan, transformándolo en un producto con valor agregado. De este modo, se fomenta la economía circular y se promueve un uso más responsable y sostenible de los recursos naturales.

Los métodos tradicionales de suministro de fertilizantes suelen ser poco eficientes, lo que provoca una baja absorción de nutrientes por las plantas y pérdidas significativas hacia el entorno, ya sea por lixiviación o escorrentía. La capacidad de liberación lenta del nanocompuesto, junto con su mayor interacción con las raíces, mejora la disponibilidad de nutrientes y minimiza estas pérdidas, ofreciendo una entrega más precisa y eficaz para la nutrición vegetal. Esta investigación se enfoca en lograr una producción eficiente y sostenible de un cultivo en particular que requiere una nutrición especializada que los fertilizantes comunes no siempre pueden ofrecer. El estudio está orientado específicamente al uso del fertilizante en pimientos morrones, lo que permite ajustar las propiedades del nanocompuesto para satisfacer de forma óptima las necesidades nutricionales de este cultivo. Así, se asegura la aplicabilidad práctica del proyecto en contextos agrícolas reales.

- Esta investigación busca desarrollar una alternativa sostenible: un fertilizante bio-basado de liberación lenta, empleando biocarbón y nanopartículas de

magnetita recubiertas con citrato para superar las limitaciones de los insumos sintéticos y los componentes individuales.

- El recubrimiento con citrato mejora la estabilidad, dispersión y biodisponibilidad de las nanopartículas de magnetita, además de favorecer su interacción con las raíces debido a su biocompatibilidad.
- La combinación de ambos materiales en un nanocompuesto (nanopartículas integradas en una matriz de biocarbón) aprovecha sinérgicamente sus ventajas:
  - o El biocarbón actúa como soporte para las nanopartículas, mejorando la estructura del suelo, la retención de humedad y aportando carbono.
  - o Las nanopartículas de magnetita, gracias a su elevada área superficial, favorecen la adsorción de nutrientes y permiten su liberación gradual.
- Esta estrategia aborda el problema de los residuos al transformar un recurso abundante y poco aprovechado (cáscaras de nuez pecan) en un biocarbón con valor agregado, fomentando la economía circular y promoviendo un uso más sostenible de los recursos naturales.
- La capacidad de liberación lenta del nanocompuesto, junto con su mayor interacción con las raíces, mejora la disponibilidad de nutrientes y minimiza las pérdidas ambientales (lixiviación, escorrentía), ofreciendo una nutrición vegetal más precisa y eficiente.
- La investigación se enfoca específicamente en la producción de pimientos morrones, un cultivo que requiere nutrición especializada. Esto permite ajustar las propiedades del nanocompuesto para satisfacer óptimamente sus necesidades, asegurando la aplicabilidad práctica del proyecto en contextos agrícolas reales.

#### 1.4 HIPÓTESIS

- El uso de nanopartículas de magnetita compuestas por biocarbón de cáscara de nuez estimula un mejor crecimiento de plántulas en pimiento morrón (*Capsicum annuum L.*)

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.6 OBJETIVOS GENERALES

Evaluar comparativamente la eficacia de nanocompuestos de magnetita sintetizados a partir de biomasa y de biocarbón derivado de cáscara de nuez pecanera utilizados como nanofertilizantes en la germinación y crecimiento inicial de pimiento morrón bajo invernadero.

### 1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar fisicoquímicamente los nanocompuestos de magnetita elaborados con: biomasa de cáscara de nuez pecanera (sin pirólisis) y biocarbón derivado de cáscara de nuez pecanera.
2. Evaluar el efecto comparativo de ambos nanocompuestos en la germinación de semillas de pimiento morrón en invernadero.
3. Analizar el impacto de los nanocompuestos en el crecimiento inicial de plántulas de pimiento morrón (etapa post-germinación).

## CAPÍTULO II

### 2.1 MARCO TEÓRICO

#### 2.2 EL BIOCARBÓN Y LA PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN

El biocarbón es un material sólido rico en carbono que se obtiene mediante la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado en oxígeno o carente de él [5]. Este producto presenta propiedades físicas y químicas que lo hacen apto para el almacenamiento de carbono a largo plazo en medios naturales, además de tener el potencial de mejorar la fertilidad del suelo [6].

El biocarbón se produce a partir de la carbonización de materias primas como residuos de cosecha, biomasa de árboles, desechos de papel, cascarilla de arroz, entre otros [8]. Su producción tiene cuatro objetivos principales [9]: (1) mejorar la calidad del suelo, (2) aprovechar residuos orgánicos, (3) mitigar el cambio climático y (4) generar energía. La mejora del suelo se logra al incorporar el biocarbón, lo que favorece la retención de agua y nutrientes, incrementa la actividad microbiana y mejora las condiciones edáficas. El aprovechamiento de residuos se cumple al reducir los desechos agrícolas e industriales, dándoles un valor agregado. En cuanto a la mitigación del cambio climático, el biocarbón permite secuestrar carbono de la biomasa y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al almacenar el carbono en forma estable en el suelo. Finalmente, el proceso también permite la generación de energía renovable [5].

Para la producción de biocarbón existen diversas tecnologías termoquímicas, entre ellas los pirólisis (lenta, rápida y ultrarrápida), la gasificación y la carbonización hidrotermal [6]. Según, figura 1 tanto la pirólisis como la gasificación requieren que la biomasa sea previamente secada antes de su carbonización. La carbonización hidrotermal ofrece una ventaja significativa, ya que se realiza en un medio acuoso, lo que permite utilizar residuos con alto contenido de humedad, como los residuos de cosecha recién cortados, sin necesidad de secado previo [9].

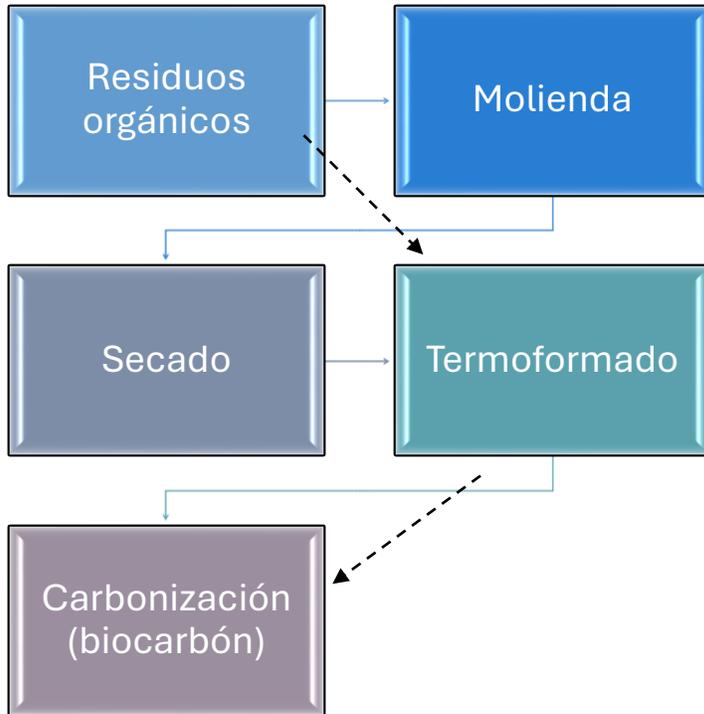


Figura1: Esquema del proceso de carbonización en seco (pirólisis), donde las flechas punteadas representan el proceso de carbonización hidrotermal, basado en la adaptación de Quesada-Kimsey (2012).

### 2.3 NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA Y BIOCARBÓN MAGNÉTICO DE LA CÁSCARA DE NUEZ

El biocarbón magnético es un compuesto híbrido resultante de la integración de biocarbón con nanopartículas magnéticas, como la magnetita. En este caso particular, se emplea la cáscara de nuez como materia prima para elaborar el biocarbón, aprovechando un subproducto agroindustrial con alto contenido de carbono [10].

Las nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) consisten en óxido de hierro con tamaño nanométrico (1–100 nm). Este óxido es peculiar porque contiene hierro en dos estados de oxidación,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , lo que le otorga propiedades magnéticas distintivas, útiles en distintos ámbitos científicos e industriales. [8]

El biocarbón, por su parte, es un material poroso rico en carbono que se obtiene mediante pirólisis, un proceso de descomposición térmica de biomasa en ausencia

de oxígeno Singh Yadav et al., 2023; Xiao et al., 2018. Al incorporarle magnetita, se transforma en biocarbón magnético, lo cual mejora su capacidad de adsorción de contaminantes y permite su recuperación sencilla mediante campos magnéticos [9]. Ali et al., 2021; Rao et al., 2022

Esta combinación convierte al biocarbón magnético en un material eficiente y versátil, ya que combina las características adsorbentes del biocarbón con la capacidad de separación magnética de la magnetita [10].

La cáscara de nuez, utilizada como precursor, es un residuo agrícola abundante en carbono, celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que la convierte en una excelente fuente para obtener biocarbón de alta calidad. Entre sus ventajas destacan:

- Alta porosidad tras el proceso de pirólisis
- Bajo costo y fácil disponibilidad
- Contribución a la reducción de residuos orgánicos
- Aporte a la sostenibilidad ambiental

Características principales del biocarbón magnético:

- Amplia superficie específica
- Alta eficiencia adsorbente
- Separación sencilla mediante imanes
- Reutilizable en múltiples ciclos de tratamiento
- Estructura porosa y superficie funcionalizada químicamente

El biocarbón magnético derivado de cáscara de nuez es un compuesto híbrido formado por biocarbón, producido a través de la pirólisis de esta biomasa, y nanopartículas magnéticas, comúnmente de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Gracias a esta combinación, el material adquiere una mayor capacidad de adsorción y puede ser fácilmente recuperado utilizando un campo magnético, lo que lo convierte en una

herramienta eficaz para la remediación ambiental, en particular en el tratamiento de aguas contaminadas [9].

La cáscara de nuez es un residuo agroindustrial rico en carbono y en compuestos lignocelulósicos como celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que la convierte en una biomasa adecuada para la producción de biocarbón con propiedades deseables como alta porosidad y buena estabilidad térmica. Además, su bajo costo, disponibilidad y contribución a la reducción de residuos orgánicos la posicionan como una materia prima sostenible para el desarrollo de materiales funcionales [8].

#### 2.4 PRODUCCIÓN DEL BIOCARBÓN MAGNÉTICO A PARTIR DE CÁSCARA DE NUEZ

El proceso de obtención del biocarbón magnético a partir de esta biomasa se desarrolla en dos etapas:

1. Pirólisis: Consiste en la descomposición térmica de la cáscara de nuez en un ambiente sin oxígeno, a temperaturas entre 400-600 °C. Este proceso da lugar a un biocarbón poroso, con gran superficie específica y la presencia de grupos funcionales como hidroxilos (-OH) y carboxilos (-COOH), que favorecen su funcionalización [5].
2. Magnetización: El biocarbón obtenido se somete a un tratamiento químico con sales de hierro ( $\text{FeCl}_2/\text{FeCl}_3$ ), y mediante la precipitación controlada de nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), se modifica su superficie. Este proceso requiere el ajuste del pH (usualmente con hidróxido de sodio o amonio) y temperaturas precisas. El resultado final es un material magnético funcionalizada, capaz de ser separado fácilmente con imanes. [8]

Propiedades fisicoquímicas del biocarbón magnético

Este material presenta una serie de propiedades destacadas:

- Alta superficie específica (>100 m<sup>2</sup>/g)
- Estructura (micro/mesoporosa) ideal para procesos de adsorción
- Presencia de grupos funcionales activos (carboxilos, hidroxilos, lactonas)

- Propiedades magnéticas que permite su fácil recuperación
- Elevada estabilidad térmica y química, útil en ambientes contaminados
- Gran capacidad adsorbente para metales pesados (como  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ), colorantes industriales, pesticidas y otros compuestos orgánicos persistentes

#### Aplicaciones principales

El biocarbón magnético de cáscara de nuez tiene diversas aplicaciones, entre las que destacan:

- Tratamiento de aguas residuales: eliminación de metales pesados, fármacos, colorantes y pesticidas
- Remediación de suelos contaminados: inmovilización de contaminantes y mejora de la estructura y fertilidad del suelo
- Soporte catalítico: base para catalizadores en reacciones químicas, especialmente procesos redox
- Otros usos: almacenamiento de energía (por ejemplo, en electrodos), sensores y purificación de gases

#### Ventajas del biocarbón magnético

Este material ofrece beneficios significativos tanto a nivel técnico como ambiental:

-  Sostenible, al ser producido a partir de residuos agrícolas
-  Magnéticamente recuperable, lo que facilita su reutilización
-  Económico, gracias al bajo costo de la materia prima
-  Altamente eficiente en la adsorción de contaminantes en medios líquidos
-  Reutilizable en múltiples ciclos sin pérdida significativa de rendimiento
-  Ecológico, apoyando la economía circular y la gestión responsable de residuos

## Limitaciones y desafíos

A pesar de sus ventajas, existen algunos retos asociados con su uso:

- La magnetización requiere condiciones controladas, como pH y temperatura específicos
- Puede haber una disminución en la eficiencia tras varios ciclos de uso si no se regenera adecuadamente
- Es necesario escalar el proceso de producción y realizar estudios de viabilidad económica para su aplicación a nivel industrial

## 2.5 PROPIEDADES DE LAS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA

La magnetita presenta estructuras notables, como se observa en las figuras 2 y 3, donde se representa su configuración característica de espinela inversa, así como la red cristalina que incluye 32 sitios octaédricos y 64 sitios tetraédricos [9].

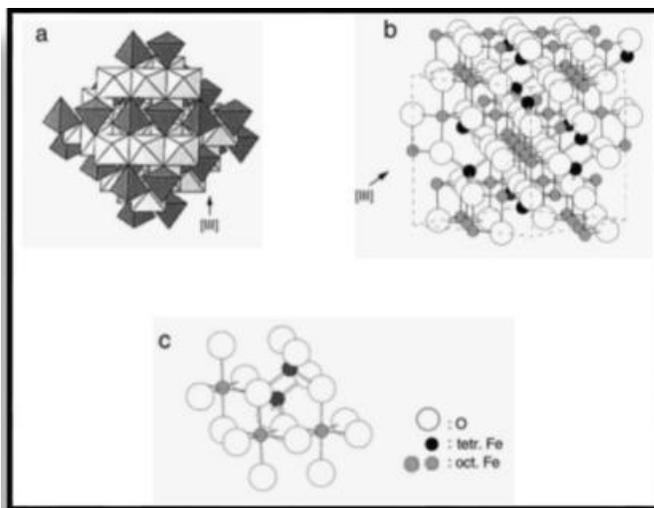


Figura 2: Representación de la estructura de la magnetita: (a) modelo poliédrico que muestra la disposición en capas alternadas de sitios octaédricos y tetraédricos; (b) visualización de la celda unitaria; (c) distribución de los sitios octaédricos y tetraédricos.

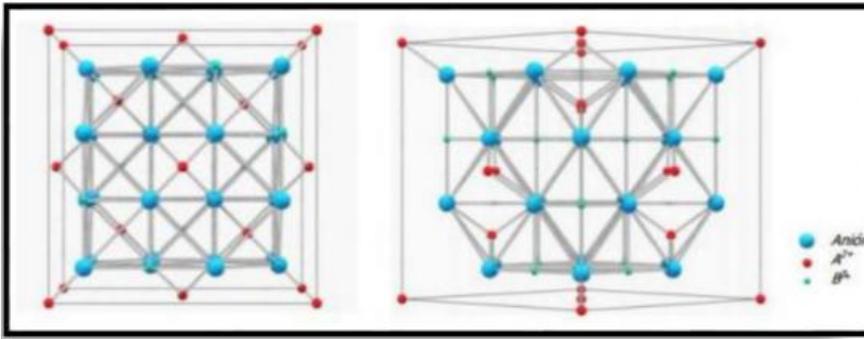


Figura 3: Configuración cristalina de tipo espinela inversa característica de la magnetita.

Las nanopartículas de magnetita poseen un conjunto de propiedades fisicoquímicas que las hacen altamente versátiles y valiosas en múltiples aplicaciones científicas, ambientales e industriales. Una de sus características más destacadas es su comportamiento superparamagnético a escala nanométrica, lo que significa que pueden magnetizarse temporalmente al estar expuestas a un campo magnético externo, pero pierden esa magnetización al retirarlo. Esta propiedad permite su separación rápida mediante imanes, haciéndolas ideales para procesos como la remediación ambiental, el diagnóstico por imágenes (como la resonancia magnética) o tratamientos médicos avanzados como la hipertermia contra el cáncer [10].

Con tamaños entre 1-100 nm, estas partículas presentan una alta relación superficie-volumen, lo que incrementa notablemente su reactividad, capacidad de adsorción y eficiencia catalítica. Gracias a su estructura porosa y superficie activa, tienen una excelente capacidad para adsorber metales pesados, colorantes, fármacos y contaminantes orgánicos, siendo ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas residuales y la descontaminación de suelos [1].

Además, las nanopartículas de magnetita suelen ser biocompatibles y presentan baja toxicidad, lo que permite su aplicación en el campo de la biomedicina, por ejemplo, en la liberación controlada de fármacos, imágenes médicas o terapias dirigidas. No obstante, su seguridad puede depender del tamaño, la concentración empleada y los recubrimientos superficiales utilizados [1].

Desde el punto de vista estructural, estas nanopartículas presentan una estructura cristalina de tipo espinela inversa, donde los iones de hierro ( $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ ) se organizan en sitios octaédricos y tetraédricos. Esta configuración les otorga una gran estabilidad térmica y química, lo cual es ventajoso para su desempeño en ambientes agresivos o procesos industriales exigentes [2].

Otra ventaja es su capacidad de funcionalización: su superficie puede ser modificada químicamente con grupos funcionales como  $-\text{OH}$  o  $-\text{COOH}$ , o recubierta con polímeros, para mejorar su dispersión en medios acuosos, aumentar su selectividad hacia contaminantes específicos o servir como soporte catalítico o transportador de fármacos [6].

Finalmente, estas nanopartículas son reutilizables y rentables, ya que pueden recuperarse magnéticamente, ser regeneradas y utilizadas en varios ciclos sin una disminución considerable de su rendimiento, lo que las convierte en una opción económica, eficiente y sostenible [8].

## 2.6 IMPORTANCIA DE EL USO DE LAS NANOPARTÍCULAS EN GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS

El empleo de nanopartículas (NPs) en el ámbito agrícola constituye una estrategia novedosa con gran potencial para optimizar el desarrollo de los cultivos desde sus fases iniciales, particularmente durante la germinación de las semillas. Su tamaño nanométrico (1-100 nm) y elevada superficie activa les permiten interactuar eficazmente con células vegetales, mejorando la germinación y el establecimiento temprano de plántulas [9].

Uno de los beneficios más destacados es su capacidad para acelerar la velocidad y mejorar la tasa de germinación. Algunas nanopartículas son capaces de romper la dormancia o bien de aumentar la permeabilidad de la cubierta de la semilla, lo que facilita una absorción más eficiente de agua y nutrientes, activando así el metabolismo interno de la semilla con mayor rapidez [3].

Adicionalmente, las nanopartículas metálicas o de óxidos metálicos como las de zinc, hierro o magnesio pueden funcionar como fuentes de micronutrientes, esenciales para la activación de diversas enzimas y proteínas involucradas en la germinación. También pueden inducir la producción de fitohormonas como las auxinas y giberelinas, que intervienen en la elongación celular y el desarrollo de las raíces [4].

Cuando se aplican de forma adecuada, las nanopartículas no solo incrementan la eficiencia germinativa, sino que también favorecen una mayor uniformidad y vigor de las plántulas, aspectos clave para lograr cultivos más robustos y saludables desde sus primeros días [8].

Sin embargo, es importante destacar que su uso requiere precaución, ya que una dosis excesiva o el empleo de nanopartículas no apropiadas pueden tener efectos adversos, fisiológicos interferir con procesos normales de las semillas [3].

El uso de nanopartículas (NPs) en el ámbito agrícola se ha convertido en una estrategia prometedora para favorecer el desarrollo temprano de las plántulas, contribuyendo a un establecimiento más eficiente y al aumento del rendimiento de los cultivos. Debido a su diminuto tamaño (entre 1 y 100 nanómetros) y su elevada superficie activa, estas partículas tienen la capacidad de interactuar directamente con los tejidos celulares de las plantas en sus primeras fases de crecimiento [9].

Una de las ventajas más destacadas de las nanopartículas es su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes. Las NPs metálicas, como las de hierro, zinc o cobre, actúan como fuentes de micronutrientes esenciales, interviniendo en funciones bioquímicas clave como la fotosíntesis, respiración y división celular. Como resultado, las plántulas presentan un crecimiento más robusto, con raíces más profundas, tallos más fuertes y hojas de mayor tamaño [6].

Asimismo, estas partículas pueden influir en el equilibrio hormonal de las plantas, promoviendo la producción de hormonas como auxinas y giberelinas, responsables del alargamiento celular, la generación de raíces secundarias y la resistencia frente a condiciones adversas como sequía o salinidad [7].

Otro aspecto positivo es su acción antimicrobiana, ya que ciertas nanopartículas ayudan a prevenir infecciones bacterianas o fúngicas en las raíces, creando un entorno más saludable para el crecimiento inicial [2].

Sin embargo, para que estos beneficios se manifiesten de manera segura y eficiente, es fundamental controlar adecuadamente factores como el tipo y la concentración de las NPs, el modo de aplicación y la especie vegetal en cuestión. Un manejo inadecuado podría generar efectos tóxicos o alterar el desarrollo natural de la planta [9].

El empleo de nanopartículas (NPs) en la agricultura actual se ha convertido en una estrategia innovadora para potenciar tanto la germinación como el crecimiento inicial de distintos cultivos, incluido el pimiento. Gracias a su diminuto tamaño entre 1 y 100 nanómetros y su elevada superficie específica, estas partículas interactúan eficazmente con los tejidos de las plantas, influyendo de manera positiva en sus funciones fisiológicas desde etapas tempranas [6].

Durante la fase de germinación, las nanopartículas pueden contribuir a romper la dormancia de las semillas y mejorar la permeabilidad de la testa, lo que facilita una absorción más eficiente de agua y nutrientes. Esto provoca una activación más rápida del metabolismo de la semilla, incrementando la velocidad y el porcentaje de germinación, factores fundamentales para lograr una emergencia homogénea del cultivo [5].

En cuanto al crecimiento de las plántulas, las nanopartículas metálicas como las de zinc, hierro o cobre actúan como micronutrientes esenciales, estimulando procesos clave como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la división celular. Esto se refleja en plantas de pimiento con raíces más robustas, tallos fortalecidos y mayor área foliar, facilitando un desarrollo inicial más vigoroso y tolerante [2].

Asimismo, las NPs pueden modular la producción de fitohormonas, como las auxinas y giberelinas, promoviendo la elongación celular y la formación de raíces laterales. También pueden incrementar la tolerancia a condiciones de estrés abiótico, como sequías o suelos salinos, situaciones comunes en la horticultura [6].

Adicionalmente, algunas nanopartículas presentan propiedades antimicrobianas, lo que ayuda a proteger las raíces jóvenes contra infecciones como se muestra en la figura 4 por hongos o bacterias, favoreciendo un entorno más saludable para el crecimiento inicial.



Figura 4: Germinación de pimiento morrón

## 2.7 LAS APLICACIONES DE LAS NANOPARTÍCULAS DE BIOCARBÓN MAGNETITA EN LA PRODUCTIVIDAD DE CULTIVOS AGRÍCOLAS

El uso de nanopartículas de biocarbón funcionalizadas con magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ha surgido como una estrategia innovadora para impulsar el rendimiento de los cultivos agrícolas. Este material combina las ventajas estructurales del biocarbón como su elevada porosidad y capacidad de retención de agua con las propiedades magnéticas y nutricionales del hierro presente en la magnetita [8].

En el suelo, estas nanopartículas actúan como mejoradores de fertilidad, al retener nutrientes esenciales y facilitar su liberación progresiva hacia las raíces. Su estructura porosa ayuda a mejorar la capacidad de retención hídrica, lo que es crucial en condiciones de sequía o suelos degradados. Además, su superficie activa permite adsorber metales pesados y contaminantes, contribuyendo a un entorno radicular más sano y libre de toxinas [2].

Desde el punto de vista nutricional, el hierro contenido en la magnetita funciona como un micronutriente clave, que favorece procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la síntesis de enzimas y el metabolismo energético. Esto se traduce en

un mejor crecimiento de raíces, tallos más fuertes y hojas más desarrolladas, lo que fortalece la planta desde sus primeras etapas [3].

Otro beneficio relevante es su capacidad para estimular la actividad hormonal, incrementando la producción de compuestos como auxinas y giberelinas, que regulan el alargamiento celular y el desarrollo de nuevas raíces. También puede favorecer la actividad microbiana benéfica del suelo, facilitando la colonización de bacterias promotoras del crecimiento vegetal [6].

Además, su naturaleza magnética permite una recuperación sencilla en sistemas controlados, como cultivos hidropónicos, y su capacidad de ser reutilizado en múltiples ciclos agrícolas lo convierte en una opción sostenible y económica [6].

## CAPÍTULO III METODOLOGÍA

### 3.1 PROCEDIMIENTO DE SÍNTESIS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA COMPUESTAS POR BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ COMO FERTILIZANTE

La síntesis de los nanofertilizantes se obtuvo por el método de coprecipitación, modificando el estudio de Ruiz-Moreno (RuizMoreno R. G. et. al., 2013) en el laboratorio del departamento de ciencias del suelo, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Se disolvieron 43.24 g de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y 43.24 g de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 200 mL de agua desionizada, manteniendo la agitación a 500 rpm (figura 5). Posteriormente, se añadió biomasa de cáscara de nuez pecanera tamizada, basándose en una relación de peso específica relativa al contenido de hierro. A continuación, se disolvieron 120 g de NaOH (8 M) en agua desionizada y se agregaron lentamente a la solución bajo agitación. Seguidamente, se añadieron lentamente 50 g de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  a la solución. La solución se dejó reaccionar durante toda la noche. Las partículas negras precipitadas se separaron magnéticamente y se lavaron tres veces con agua desionizada hasta obtener un pH neutro. Finalmente, el material se secó a 40 °C hasta alcanzar peso constante.



Figura 5: Síntesis nanopartículas de magnetita compuestas por biocarbón y biomasa de cáscara de nuez como fertilizante.

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Las caracterizaciones se realizaron en las instalaciones del Cinvestav-Salttillo (Figura 6), un centro de investigación con equipamiento especializado para la

caracterización de materiales para difracción de rayos X (DRX), Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de dispersión de energía (EDX).



Figura 6: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo (Cinvestav) para caracterización los materiales.

### 3.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica no destructiva que se utiliza para caracterizar la estructura cristalográfica, el tamaño de partícula y las imperfecciones de los materiales. El método se basa en la interferencia constructiva de los rayos X cuando estos inciden sobre un material cristalino.

Los análisis de difracción de rayos X se llevaron a cabo utilizando un difractómetro Bruker (Figura 7). Este equipo estaba configurado con un espejo de Gobel, que se encarga de monocromatizar y paralelizar el haz de rayos X, lo que resulta en una mayor intensidad y una mejor relación señal-ruido.

Esta técnica fundamental para analizar la estructura cristalina de materiales nanocompuestos, particularmente en aplicaciones agrícolas donde la interacción entre componentes inorgánicos y orgánicos determina su eficacia. Este capítulo evalúa tres materiales basados en magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): nanopartículas puras ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -C), un compuesto con biomasa residual (BM) y otro con biocarbón de cáscara de nuez (BC), sintetizados para su uso como nanofertilizantes.



Figura 7: Difracción de rayos X (Bruker)

### 3.2.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

La espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica utilizada para identificar grupos funcionales y compuestos orgánicos e inorgánicos en una muestra, basándose en la absorción de luz infrarroja a frecuencias específicas.

Los análisis se llevaron a cabo utilizando un espectrofotómetro de infrarrojo medio (FTIR) modelo Frontier FT-IR/NIR (Figura 8). Para la preparación de la muestra, se empleó un accesorio ATR (Reflectancia Total Atenuada), específicamente el modelo MIRacle Diamond Frontier.

FTIR es una herramienta fundamental en la caracterización de materiales nanocompuestos, especialmente en aplicaciones agrícolas donde la interacción entre componentes orgánicos e inorgánicos define su eficacia. Este capítulo analiza tres materiales basados en magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sintetizados con biocarbón (BC) y biomasa (BM) de cáscara de nuez pecana, evaluando su potencial como nanofertilizantes sostenibles. Este estudio busca correlacionar las propiedades químicas reveladas por FTIR con su funcionalidad agronómica.



Figura 8: espectrofotómetro de infrarrojo medio (FTIR) modelo Frontier FT-IR/NIR

Una vez adquiridos, los espectros se procesan y analizan para identificar las bandas de absorción características. La posición (número de onda,  $\text{cm}^{-1}$ ), la intensidad y la forma de estas bandas proporcionan información sobre la presencia de grupos funcionales específicos, la estructura molecular de la muestra y posibles interacciones moleculares. Los espectros obtenidos se comparan con bases de datos de espectros de referencia para confirmar la identidad de los componentes presentes en la muestra.

### 3.2.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROSCOPIA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDX)

Para caracterizar la morfología de la superficie, microestructura y composición elemental de las nanopartículas de magnetita compuestas por biomasa de cáscara de nuez (BM) como fertilizante, se empleó Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con Espectroscopía de Rayos X Dispersiva por Energía (EDX).

#### 1. Imágenes SEM:

Específicamente, la imagenología tuvo como objetivo: Caracterizar la estructura general de la matriz de biomasa. Identificar la presencia, distribución y tamaño aproximado de nanopartículas de magnetita dentro del material compuesto. Evaluar la porosidad y textura de la superficie del material.

#### 2. Análisis EDX para Composición Elemental:

Se empleó la Espectroscopia de Rayos X Dispersiva por Energía (EDX) para determinar la composición elemental de la muestra de BM. El análisis EDX se realizó utilizando el sistema EDAX integrado. Durante el análisis EDX, el haz de electrones del SEM interactúa con la muestra, provocando la emisión de rayos X característicos. La energía de estos rayos X es única para cada elemento, lo que permite un análisis cualitativo y cuantitativo de la composición elemental. La muestra se preparó montándola en una cinta conductora de carbono (Figura 9).



Figura 9: Preparación la muestra para análisis con SEM/EDX.

- ✓ Se operó un Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM) Philips XL30 equipado con un sistema EDS EDAX Genesis a un voltaje de aceleración de 15 kV.
- ✓ Imágenes SEM: Se realizaron imágenes SEM para observar la morfología superficial y la microestructura del compuesto BM.
- ✓ Las imágenes se adquirieron a diversas magnificaciones que oscilan entre 1,000x y 10,000x para capturar tanto las características estructurales generales como los detalles más finos del material.

Análisis EDX para la composición elemental:

- ✚ La espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDX) se utilizó para determinar la composición elemental de la muestra de BM (Figura 10(a)).
- ✚ La energía de estos rayos X es única para cada elemento, lo que permite un análisis cualitativo y cuantitativo de la composición elemental.
- ✚ Se analizaron los espectros para identificar la presencia de elementos clave, incluidos carbono (C), oxígeno (O), hierro (Fe) y otros elementos de interés (p. ej., sodio (Na), silicio (Si), potasio (K), etc.).

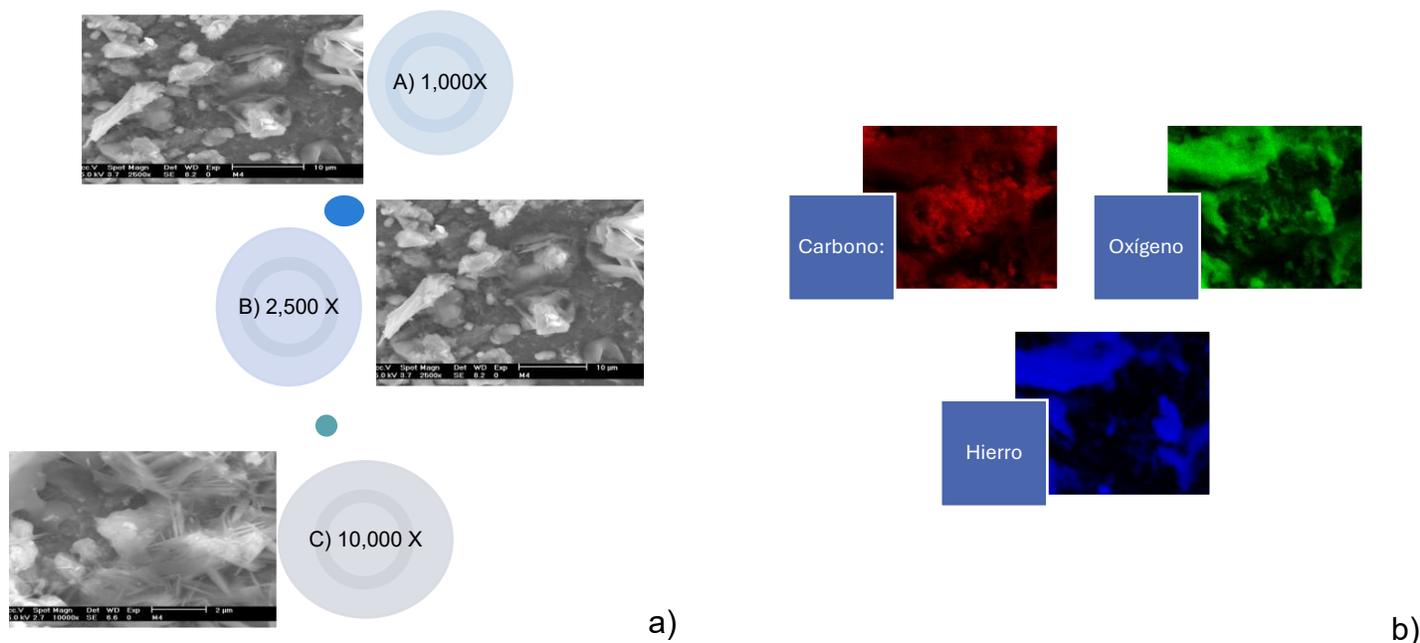


Figura 10: a) las magnificaciones para análisis con SEM y b) los elementos para análisis mapeo elemental.

- ✚ Se realizó un análisis EDX cuantitativo en múltiples puntos a lo largo de la muestra para determinar los porcentajes en peso y porcentajes atómicos de cada elemento identificado. Se realizó un mapeo elemental para visualizar la distribución espacial de elementos específicos dentro del material.

- Los datos de EDX se procesaron utilizando el software EDAX Genesis para identificar picos, calcular composiciones elementales y generar mapas elementales (Figura 10(b)).

Los resultados obtenidos de la imagen SEM y el análisis EDX se combinaron para proporcionar una comprensión integral del compuesto BM. Las imágenes de SEM se utilizaron para correlacionar la composición elemental con características morfológicas específicas, proporcionando información sobre la distribución espacial de los elementos y las interacciones entre los diferentes componentes del material.

### 3.2.4 MUESTREO DE LAS PLÁNTULAS (GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS)

El trabajo experimental constó de tres etapas:

#### 3.2.5 ETAPA 1: PLANTACIÓN

- Las actividades correspondientes a esta primera fase se llevaron a cabo durante el ciclo primavera-verano de 2024, dentro de un invernadero, ubicado en el Campo Agrícola Experimental del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Este sitio se encuentra al noreste de la ciudad de Saltillo, Coahuila, con coordenadas geográficas de 25°27'37" latitud norte, 100°58'6" longitud oeste y a una altitud de 1610 metros sobre el nivel del mar (Figura 11).



Figura 11: Centro de Investigación en química aplicada, lugar donde se llevó a cabo el experimento

2. La temperatura y la humedad relativa fueron registrados de manera automática mediante sensores de registro de lecturas en continuo en el invernadero. En figura 12 plasmo fue donde se llevo a cabo el experimento, un invernadero de las instalaciones de CIQA.



Figura 12: En este invernadero se llevo a cabo la plantación de pimiento, estructura diseñada para crear un entorno controlado para el cultivo, protegiéndolas de las inclemencias del tiempo y permitiendo la manipulación de factores ambientales clave como la temperatura, la humedad y la luz, buscando optimizar el crecimiento de las plantas mediante el control preciso.

3. Se realizó la selección del material vegetal, utilizando semillas de pimiento morrón (*Capsicum annuum L.*).
4. Se desinfectaron cuatro charolas
5. La siembra se realizó el día 9 de septiembre de 2024.
6. En la primera charola, se colocaron dos tratamientos con sus respectivas tres repeticiones de pimiento morrón (*Capsicum annuum L.*).  
Tratamiento 1 que fue biomasa repeticiones: consistió en 200g de biomasa mezclado con 100g de sustrato y sus respectivas tres repeticiones.
7. El segundo tratamiento se mezcló con 600g de biomasa más 100g de sustrato y sus respectivas tres repeticiones.
8. Se colocó el tercer tratamiento con 1200g de biomasa más 100 g de sustrato y sus respectivas tres repeticiones.
9. Se colocó el cuarto tratamiento, a éste le fue agregado 200g de biocarbón más 100g de sustrato y sus respectivas tres repeticiones.
10. Tratamiento 5 con 600g de biocarbón más 100g de sustrato y sus respectivas tres repeticiones
11. Tratamiento 6 con 1200g de biocarbón más 100g de sustrato y sus respectivas tres repeticiones.
12. Y la última charola se reservó como testigo, conteniendo únicamente sustrato, para evaluar el crecimiento de las plántulas sin biomasa ni biocarbón.
13. Con lo anterior se explica y se representa en la figura 13 el resultado de las charolas, donde se llevo a cabo dos tratamientos que fue biomasa y biocarbón a diferentes concentraciones y el respectivo testigo para así observar la diferencia de crecimiento.



Figura 13: Resultado final de la siembra de pimiento con sus respectivos tratamientos y repeticiones

### 3.2.6 ETAPA 2: GERMINACIÓN

14. Se dejó el lapso de nueve días después de la siembra para observar cuantas semillas ya habían germinado en ese tiempo, mencionando aquí mismo que las charolas se regaban todos los días a un punto de saturación.
15. Los datos iniciales fluctuaron entre un rango de 0 a 7 semillas germinadas por repetición, lo cual dejamos otros seis días más para que las semillas germinaran en un 100%.
16. A los 15 días, la germinación alcanzó el 100% (20 de 20 semillas germinadas por repetición) (Figura 14).



Figura 14: Imagen donde se observa la germinación total a un 100%.

17. Durante el periodo comprendido entre la siembra y la germinación, se mantuvo un riego constante para garantizar condiciones óptimas de humedad.

### 3.2.7 ETAPA 3: MEDICIÓN DE PLÁNTULAS

18. A partir del día 15, desde el momento en que ya todas las semillas habían germinado, se inició la medición de la altura de las plántulas, tomando como referencia el ápice de la planta hacia el tallo.

19. Se realizaron ocho mediciones de altura a intervalos de tres días, registrando los datos en hojas de cálculo en Excel para su análisis.

20. Los datos obtenidos cada semana se fueron registrando en una hoja de cálculo y graficando para mantener un monitoreo del crecimiento de la plántula, es decir, cuando la gráfica mostrara una disminución en su ritmo de crecimiento fue lo que se tomó como indicativo para determinar la finalización del monitoreo de las plántulas en las charolas, señal de que las plántulas requerían entonces del trasplante (Figura 15).



Figura 15: El crecimiento de la planta con su respectivo tratamiento

21. Tras completar las ocho mediciones, se constató que el ritmo de crecimiento estaba en ascenso o bien que este se mantenía, así hasta la octava medición cuando el ritmo de crecimiento disminuyó (Figura 16).



Figura 16: El crecimiento uniforme, y estable de la planta.

#### 3.2.8 ETAPA 4: CORTE DE HOJAS:

22. Posteriormente, se procedió a cortar dos hojas por repetición para medir el contenido de clorofila.

23. Las hojas se almacenaron en una hielera (Figura 17).



Figura 17: Hielera donde se almacenaron las hojas para ser trituradas.

24. Cuando las dos hojas de cada tratamiento ya estaban congeladas con una textura cristalizada se procedió a molerlas para obtener un polvo fino y este ser analizado para cuantificar el contenido de la clorofila (Figura 18).



Figura 18: En esta figura se representa la etapa que se llevó a cabo para remoler las hojas y llevarlas a laboratorio para saber el contenido de la clorofila, de inicio se cortaron y se colocaron en la hielera, dejando unos minutos para su reposo, cuando ya estaban congeladas se trituraron.

### 3.2.9 ETAPA 5: CORTE DE PLÁNTULA

25. Se cortaron el resto de las hojas (Figura 19).



Figura 19: En esta figura se representa cuando se cortaron las plántulas para ser colocadas en bolsas de papel y continuar a meterlas a la estufa, mencionando que cada una con su respectivo tratamiento.

26. Se colocaron las plántulas en bolsas de papel para poder meterlas a la estufa (Figure 20).



Figura 20: En esta figura se representa ya las bolsas con las hojas en su respectivo tratamiento listas para meterlas a la estufa.

27. Seguido de colocar las plántulas en bolsas de papel se pesaron antes de meterlas a la estufa y después de su salida para poder obtener resultados de su peso fresco y seco (Figura 21).



Figura 21: En la figura se observa donde ya se estaba pesando las plántulas antes de ser metidas a la estufa

### 3.3.0 ETAPA 6: LIMPIEZA DE RAÍZ

28. Se limpiaron las raíces, hasta remover el máximo de sustrato adherido a las raíces y tomar imágenes y además de así poder analizar el contenido nutricional que tenía la plántula (Figura 22).

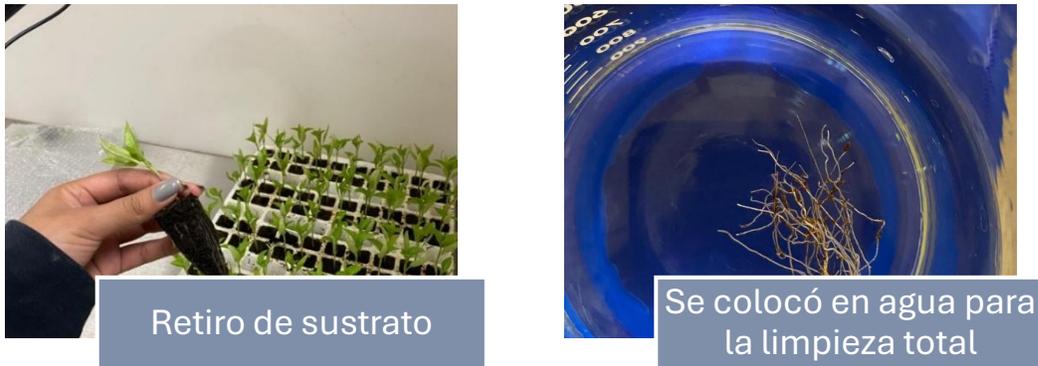


Figura 22: En la figura se observa que se retiró el sustrato lo más que se pudo y se colocó en agua la raíz para que se limpiará lo más posible

29. Las plántulas secas fueron molidas en un mortero para analizar los nutrientes presentes en los diferentes tratamientos (Figura 23).



Figura 23: En la figura se observan las hojas ya molidas para continuar con su análisis

30. Se continuaron pesando lo que había quedado de las plantas ya molidas con el mortero para enviarlas a analizar (Figura 24).



Figura 24: Balanza analítica para el peso de las plántulas molidas

### 3.3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL Y DE TRATAMIENTO

- Se estableció un diseño experimental completamente al azar, con 3 tratamientos y tres repeticiones que dieron un total de 21 unidades.

Los tratamientos consistieron en la aplicación de nanopartículas de magnetita-biocarbón de cáscara de nuez con concentraciones de 200g de biomasa, 600g de biomasa, 1200g de biomasa, 200g de biocarbón, 600g de biocarbón y 1200g de biocarbón a las semillas de pimienta morrón (cuadro 1).

<b>BIOMASA</b>	<b>200</b>	<b>BM 200</b>
<b>BIOMASA</b>	<b>600</b>	<b>BM 600</b>
<b>BIOMASA</b>	<b>1200</b>	<b>BM 1200</b>
<b>BIOCARBÓN</b>	<b>200</b>	<b>BC 200</b>
<b>BIOCARBÓN</b>	<b>600</b>	<b>BC 600</b>
<b>BIOCARBÓN</b>	<b>1200</b>	<b>BC 1200</b>
<b>TESTIGO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

## CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 SÍNTESIS DE LAS NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA COMPUESTO POR BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ COMO FERTILIZANTE.

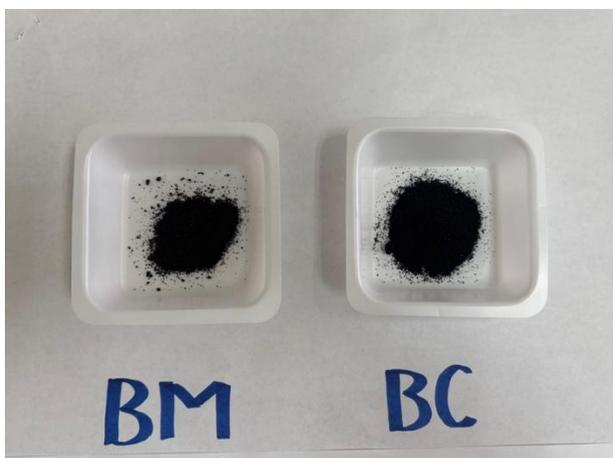


Figura 24: Las nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa (BM) y biocarbón (BC) de cáscara de nuez como fertilizante

### 4.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

#### 4.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

El análisis de difracción de rayos X (DRX) se realizó para confirmar las fases cristalinas y las características estructurales de los materiales sintetizados: nanopartículas de magnetita pura ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -C), el compuesto de magnetita/biomasa (BM) y el compuesto de magnetita/biocarbón (BC). Los patrones se compararon con los picos de difracción de la magnetita de referencia ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) (Figura 25) Guel-Nájar et al., 2023. Este indica que el proceso de pirólisis y modificación magnética ha alterado significativamente la estructura de la cáscara de nuez, lo que lleva a la formación de óxido de hierro cristalino y, potencialmente, a una reducción en el contenido amorfo total de la biomasa original (Khamkure, 2024).

El análisis de DRX confirma la presencia de magnetita cristalina en todos los materiales sintetizados, y los compuestos exhiben una cristalinidad modificada debido a las interacciones con las matrices orgánicas. Estas características estructurales tamaños de cristalito más pequeños en BM y el fondo amorfo del biocarbón en BC subrayan las propiedades fisicoquímicas a medida de los

compuestos, lo que puede influir en su eficacia como fertilizantes mejorados con nanotecnología. Esta validación de fase es fundamental para interpretar su rendimiento en ensayos de crecimiento de plántulas y plantas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.).

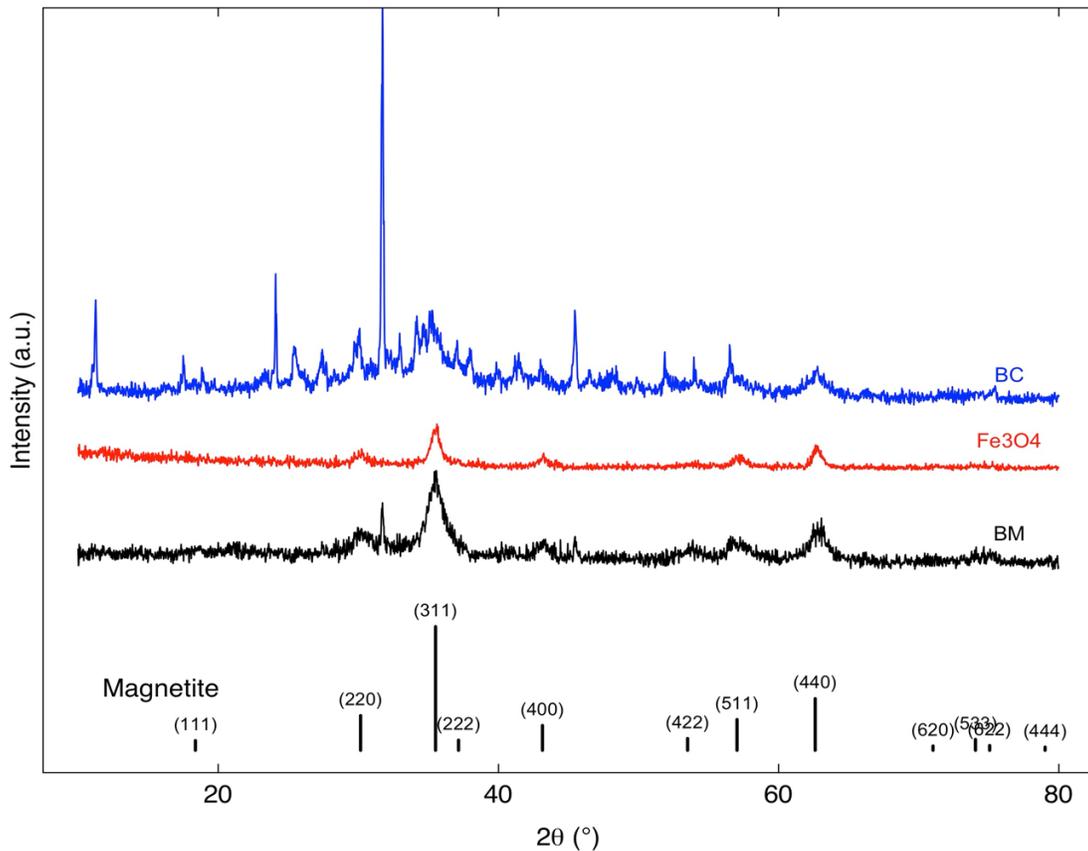


Figura 25: Patrones de XRD en las nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa (BM) y biocarbón (BC) de cáscara de nuez como fertilizante

#### 4.2.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

El análisis FTIR revela propiedades funcionales distintas críticas para aplicaciones agrícolas: El compuesto  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Biochar (BC) (Figura 26) actúa principalmente como un soporte inerte, preservando la estructura cristalina de la magnetita (evidente en picos Fe-O intensos), mientras que su polaridad superficial reducida (pico O-H débil) y grupos carboxilato (pico C=O) crean posibles sitios de intercambio catiónico para

adsorber nutrientes catiónicos como  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{K}^+$ , ofreciendo una combinación de estabilidad estructural y retención de nutrientes (Lehmann et al., 2011).

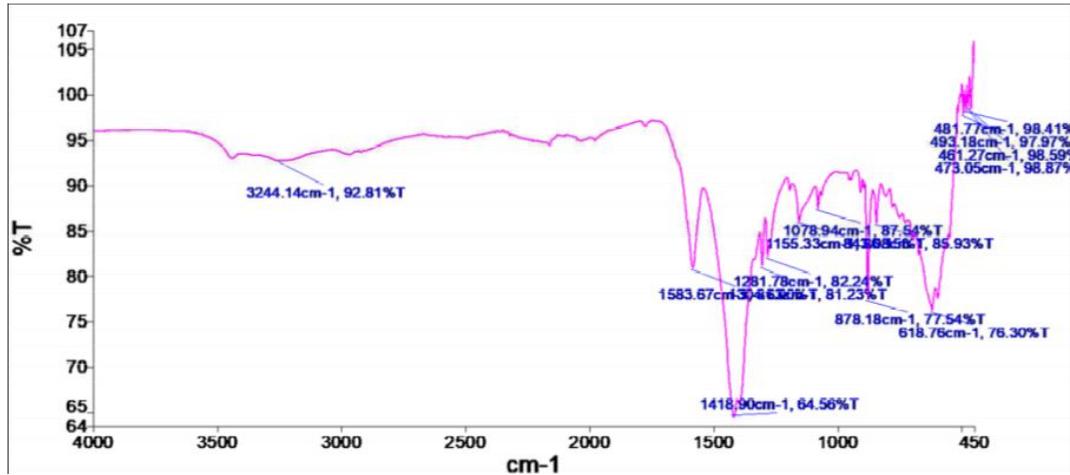


Figura 26: Espectros de nanopartículas de magnetita compuesto por biocarbón (BC) de cáscara de nuez por espectroscopia FTIR

Las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Figura 27) estabilizadas con citrato exhiben estabilidad coloidal mejorada en agua (indicada por una banda O-H ancha y un pico C=O simétrico que confirma la coordinación del citrato), crucial para lograr una dispersión homogénea en el suelo y maximizar la biodisponibilidad de hierro para las plantas; el recubrimiento de citrato también puede ayudar a preservar las propiedades magnéticas al reducir la oxidación (Lehmann et al., 2011), aunque una limitación crítica es la liberación de  $\text{Fe}^{3+}$  dependiente del pH, que requiere más estudios de lixiviación para su uso práctico.

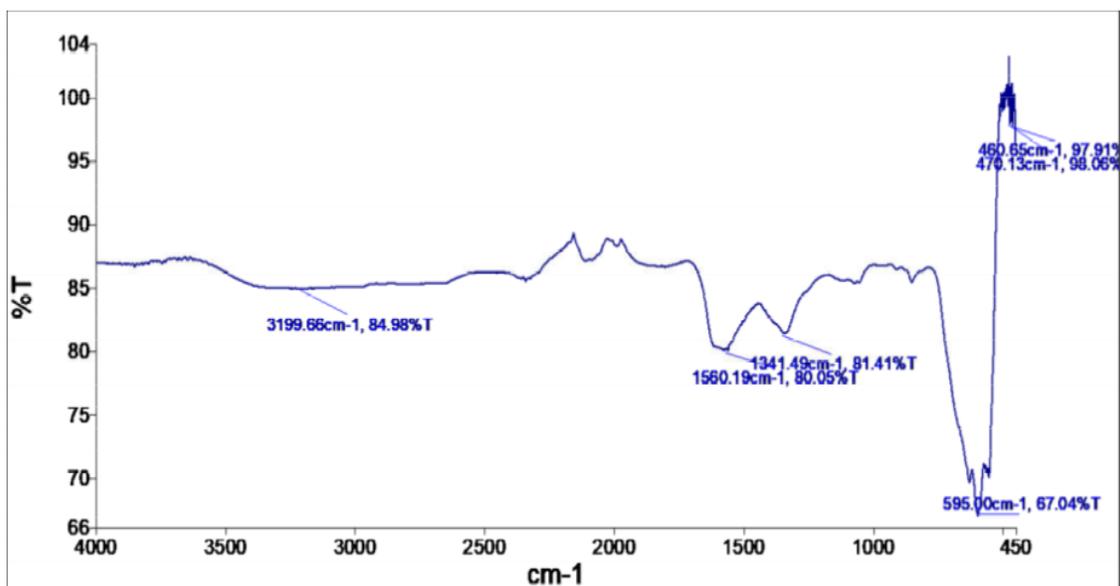


Figura 27: Espectros de nanopartículas de magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

El compuesto  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -Biomasa (BM) representa un sistema multifuncional que integra magnetita dentro de una matriz orgánica compleja (polisacáridos y lignina, mostrado por bandas O-H anchas y picos C=O desplazados), donde la biomasa ofrece beneficios significativos como la posible estimulación de la actividad microbiana del suelo (vía polisacáridos que actúan como prebióticos) y mejor retención de agua (de la lignina) (Sánchez-Monedero et al., 2018); el pico Fe-O débil sugiere nanopartículas posiblemente más pequeñas, ventajosas potencialmente para la absorción radicular, pero introduce una contrapartida clave ya que la naturaleza rica en materia orgánica y el tamaño reducido podrían limitar su persistencia/permanencia en el suelo en comparación con los otros compuestos Nikmah, A., 2019.

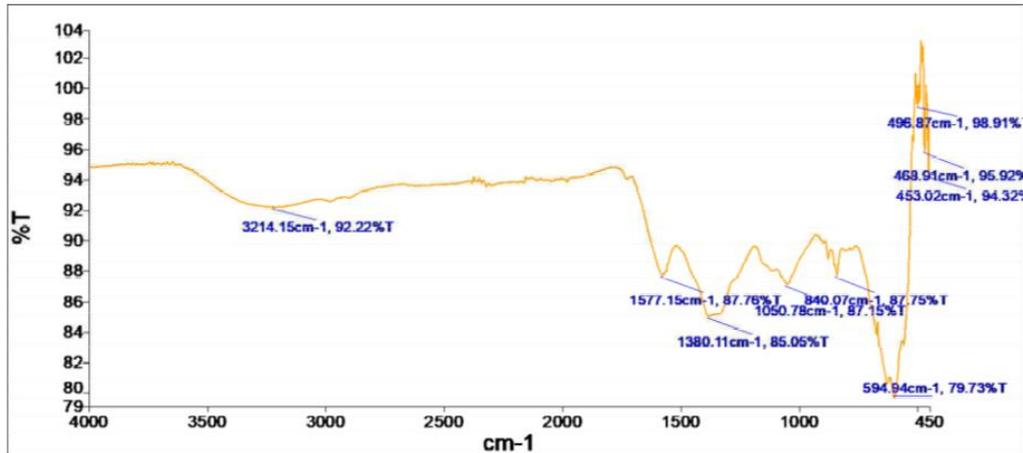


Figura 28: Espectros de nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa (BM) de cáscara de nuez por espectroscopia FTIR.

#### 4.2.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Las figuras 29, 30 y 31 muestran micrografías SEM de la muestra de nanomagnetita-biochar a diferentes aumentos para elucidar sus características estructurales y morfológicas. El material exhibe una morfología heterogénea, lo que sugiere que es un compuesto de diferentes componentes y/o estructuras. En aumentos menores (figura 29), se observa que el material presenta una estructura porosa, probablemente derivada de la matriz de biochar. Esta porosidad es esencial para el suelo, ya que puede mejorar la retención de agua y la aireación, optimizando las condiciones de crecimiento. La superficie del biochar muestra rugosidad, lo que favorece una adsorción más eficiente. Estos resultados revelan partículas en la superficie de la estructura, con presencia de porosidad.

La figura 30 captura la estructura y textura de las nanopartículas en la matriz. Esta textura rugosa permite una mayor retención superficial en el fertilizante. En una vista de mayor aumento (figura 31), se observan numerosas partículas agregadas, lo que confiere mayor estabilidad superficial.

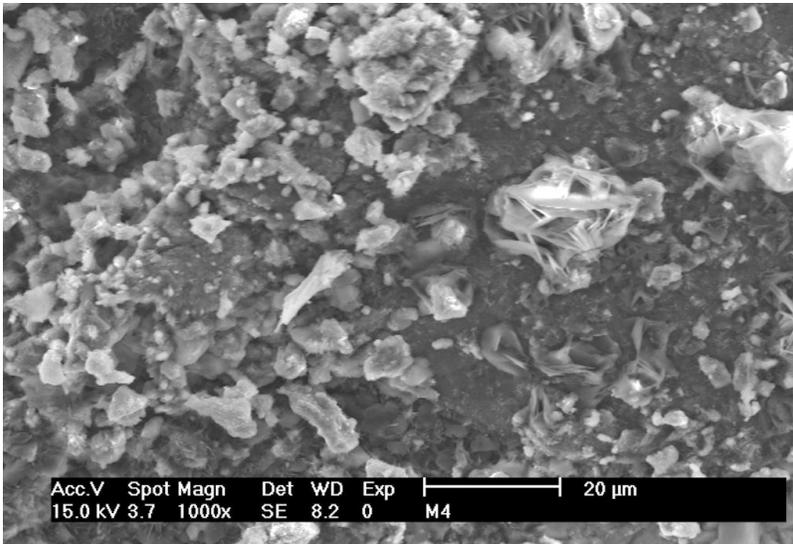


Figura 29: SEM de compuestos de nanomagnetita biochar 1,000x

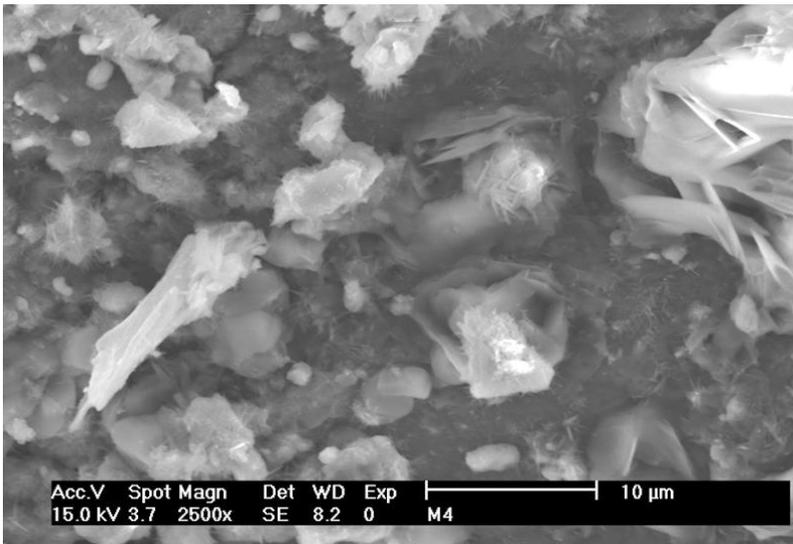


Figura 30: SEM de compuestos de nanomagnetita biochar 2,500x

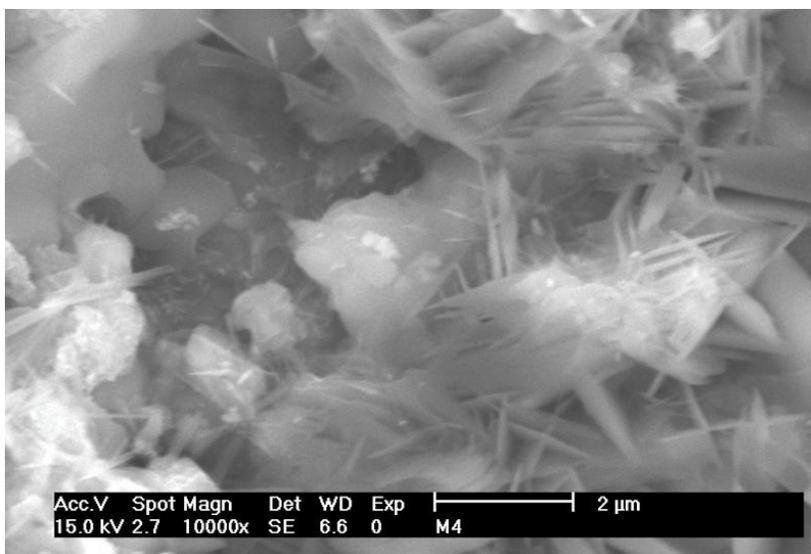


Figura 31: SEM de compuestos de nanomagnetita biochar 10,000x

#### 4.2.4 ESPECTROSCOPIA DE DISPERSIÓN DE ENERGÍA (EDX)

La composición elemental del BM se determinó mediante Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) (Figura 32). Este análisis revela picos de intensidad característicos en función de la energía (keV), donde la posición identifica el elemento y la intensidad se correlaciona con su concentración.

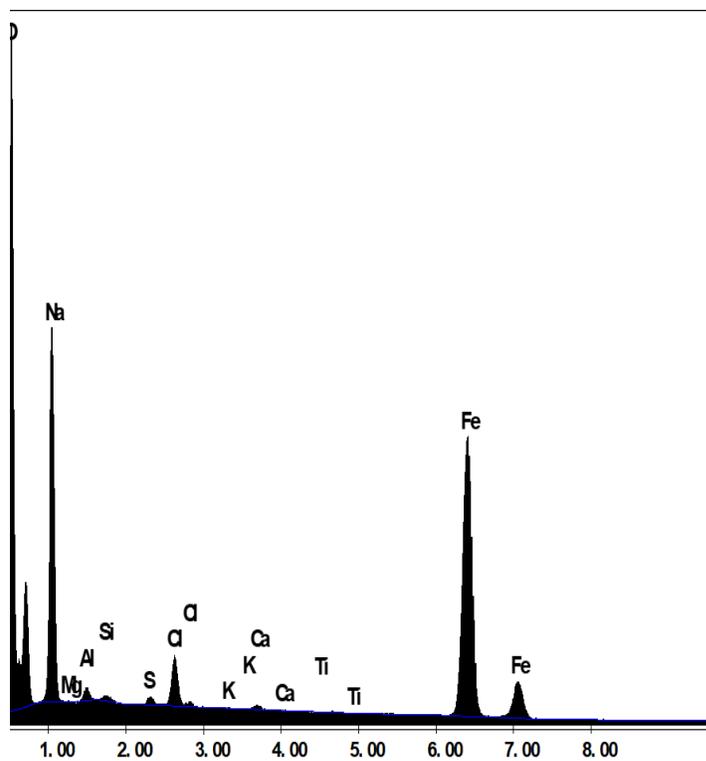
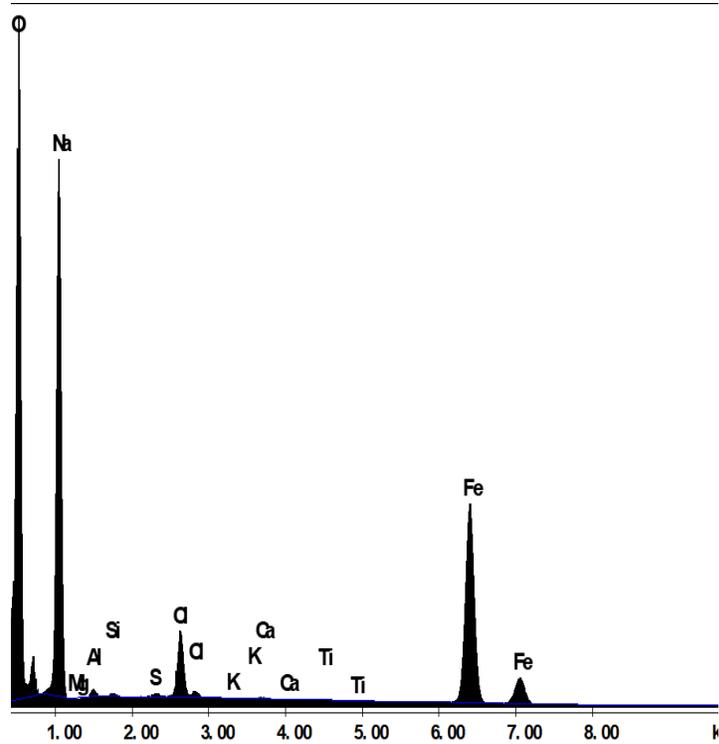
Se analizaron dos regiones representativas (Tablas 2 y 3), reportando composición en porcentaje en peso (Wt%) y atómico (At%):

Wt%: Contribución del elemento a la masa total de la muestra.

At%: Proporción atómica del elemento en la muestra.

El carbono es el elemento predominante (35.19 Wt% en Tabla 2), coherente con su origen en biomasa pirolizada. El oxígeno (31.90–35.26 Wt%) proviene de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), grupos funcionales del biochar (carboxílicos, hidroxilos), y agua adsorbida. Hierro (Fe) detectado en proporciones significativas (19.80–20.81 Wt%), confirmando la integración exitosa de magnetita. Concentraciones de Sodio (Na) elevadas (11.38–23.90 Wt%), probablemente originadas en materias primas, reactivos sintéticos (sales sódicas), o ambiente de procesamiento. Elementos traza (Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti) presentes en bajas proporciones (<1 Wt%).

La biomasa y biocarbón elevan una capacidad de retención hídrica en suelos, mejorando la disponibilidad de agua para cultivos. Fuente potencial de hierro para corrección de suelos deficientes y fertilización micronutriente. La desviación de la relación estequiométrica Fe:O (3:4) se atribuye a contribuciones de oxígeno del biochar. La aplicación de biocarbón ha demostrado influir positivamente en las características del suelo, lo que resulta en cambios en la composición de la comunidad microbiana debido a alteraciones en las condiciones del suelo y la disponibilidad de recursos Xiao et al., 2018; Yadav et al., 2023.



**TABLA 2:**

Elemento	% Peso	% Atomico
C	17.41	28.18
O	35.26	42.85
Na	23.9	20.21
Al	0.25	0.18
Si	0.1	0.07
S	0.13	0.08
Cl	2.08	1.14
K	0.01	0.01
Ca	0.06	0.03
Fe	20.81	7.25
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**TABLA 3:**

Elemento	% Peso	% Atomico
C	17.41	28.18
O	35.26	42.85
Na	23.9	20.21
Al	0.25	0.18
Si	0.1	0.07
S	0.13	0.08
Cl	2.08	1.14
K	0.01	0.01
Ca	0.06	0.03
Fe	20.81	7.25
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Figura 32: Patrones de energía dispersiva por rayos X de BM en dos regiones.

#### 4.2.5 MAPEO ELEMENTAL

El análisis de mapeo elemental, realizado a través de EDS (Espectroscopía de Rayos X de Dispersión de Energía) en modo de mapeo utilizando el software EDAX Genesis, proporciona información crítica sobre la distribución espacial de los elementos en el compuesto de biocarbón-magnetita.

Mapas Elementales: Los mapas coloreados para O, C, Na, Al, Si, S, Cl, Ca y Fe muestran la distribución espacial de cada elemento. La intensidad del color corresponde a la concentración. Carbono (C): Coincide con la estructura porosa del SEM, confirmando su papel como el esqueleto matriz del biocarbón. Hierro (Fe): Distribuido uniformemente, pero en baja densidad, lo que sugiere que las nanopartículas de magnetita están presentes, pero no óptimamente dispersas. Oxígeno (O): Co-localiza con Fe, apoyando la formación de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetita), y se superpone con C debido a los grupos funcionales del biocarbón. Sodio (Na): Se detectaron niveles altos en toda la muestra, lo que genera preocupaciones sobre la salinización del suelo. Elementos Traza (Al, Si, S, Cl, Ca): Distribución esporádica y de baja concentración, probablemente impurezas del material de partida o síntesis.

Los picos cuantitativos confirman la presencia de elementos, con señales notables de Fe y O (magnetita) y un pico pronunciado de Na, que se alinean con las observaciones de mapeo (Figura 33).

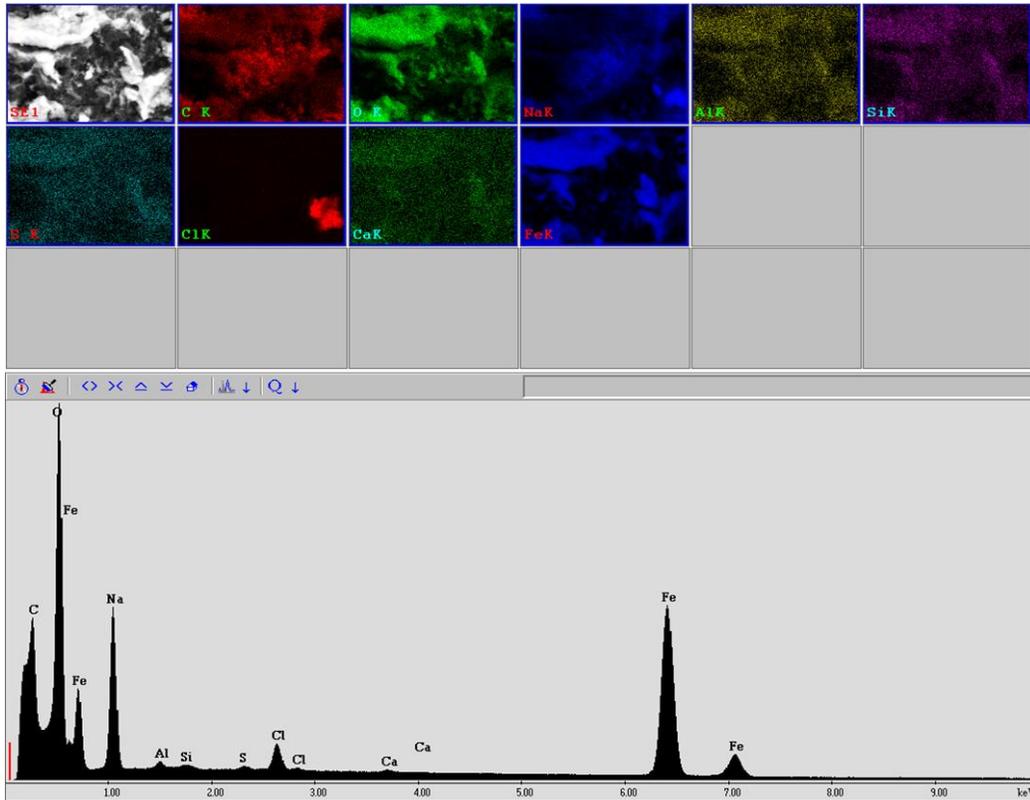


Figura 33: Mapeo elemental nanopartículas de magnetita compuesto por biomasa de cáscara de nuez.

#### 4.2.6 APLICACIÓN NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA COMPUESTO POR BIOCARBÓN DE CÁSCARA DE NUEZ COMO FERTILIZANTE EN UN EXPERIMENTO BAJO INVERNADERO.

La integración de nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) con biocarbón y biomasa derivada de cáscara de nuez presenta un enfoque innovador para mejorar la eficiencia de fertilizantes en sistemas agrícolas bajo condiciones controladas. Este compuesto combina las propiedades magnéticas de las nanopartículas con la capacidad de retención de nutrientes y mejora estructural del biocarbón, optimizando procesos biogeoquímicos en el suelo. A continuación, se analizan los mecanismos, resultados experimentales y perspectivas basados en la literatura científica disponible.

#### 4.2.7 MUESTREO DE LAS PLÁNTULAS (GERMINACIÓN)

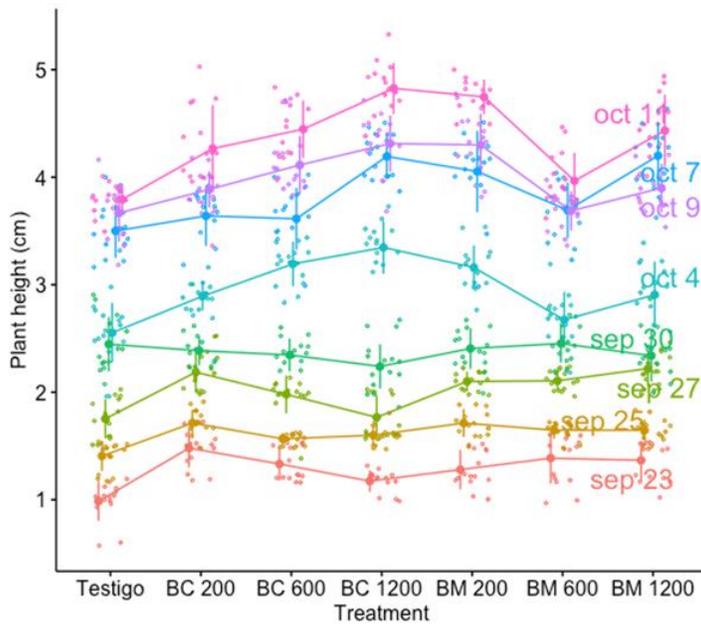


Figura 34: Gráfica sobre el incremento de altura de las plántulas de pimienta morrón

Como se muestra en la figura 34, se realizaron ocho mediciones consecutivas del crecimiento en altura de una plántula de pimienta durante un periodo de observación de ocho días. A partir de los datos obtenidos, se observó un patrón de crecimiento progresivo caracterizado por una fase inicial lenta seguida de una etapa de incremento más acelerado.

Durante las primeras tres mediciones, correspondientes a los primeros días del desarrollo, el crecimiento fue moderado, con incrementos graduales en la altura que indican la fase de establecimiento de la plántula. A partir de la cuarta medición se evidenció un crecimiento más sostenido, coincidiendo con la expansión de los cotiledones y la aparición de las primeras hojas verdaderas.

El crecimiento continuó de manera constante hasta la última medición, mostrando una curva ascendente, lo que indica condiciones ambientales favorables y una adecuada adaptación fisiológica de la plántula. En términos cuantitativos, la altura aumentó de 1.2 cm en la primera medición a 4.8 cm en la octava.

Este patrón de crecimiento es consistente con lo esperado para plántulas de pimienta bajo condiciones controladas, reflejando un desarrollo saludable y sin signos visibles de estrés biótico o abiótico durante el periodo evaluado.

Los resultados se alinean con investigaciones previas que indican los efectos beneficiosos de las NPs de  $Fe_3O_4$  en la fisiología de las plantas. Por ejemplo, Tombuloglu et al. (2019) observaron una mejora en el crecimiento y la expresión de genes fotosintéticos en cebada cuando fue tratada con NPs de  $Fe_3O_4$ . De manera

similar, Feng et al. (2022) reportaron un crecimiento y una fotosíntesis mejorados, así como un mayor contenido de Fe, P y K en las hojas de plantas de trigo expuestas a estas nanopartículas.

#### 4.2.8 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO (PESO FRESCO Y SECO).

La medición del peso fresco es un método para estimar el crecimiento general de la planta en un período corto. Es útil para detectar cambios en la biomasa debido a los tratamientos en que se sometió, el agua es esencial para las reacciones metabólicas y el transporte de nutrientes en la planta, por lo tanto es necesario pesar antes y después de que las plántulas entran a la estufa el peso fresco esta relacionado con la actividad fotosintética y el metabolismo general de la plántula, mientras que el peso seco proporciona una medida precisa de la cantidad de materia orgánica acumulada en la planta, lo que refleja su crecimiento real sin la influencia del contenido de agua, un mayor peso seco indica una mayor eficiencia fotosintética y una mejor conversión de CO<sub>2</sub> en biomasa, en la figura 35 se muestra que en los dos tratamientos que utilizamos se muestran diferencias significativas, siendo el mejor tratamiento BM 1200.



Figura 35: en la anterior grafica de barras se muestra el resultado final de cada tratamiento, pesado antes y después de ser colocado en la estufa, dando como mejor resultado el tratamiento BM 1200.

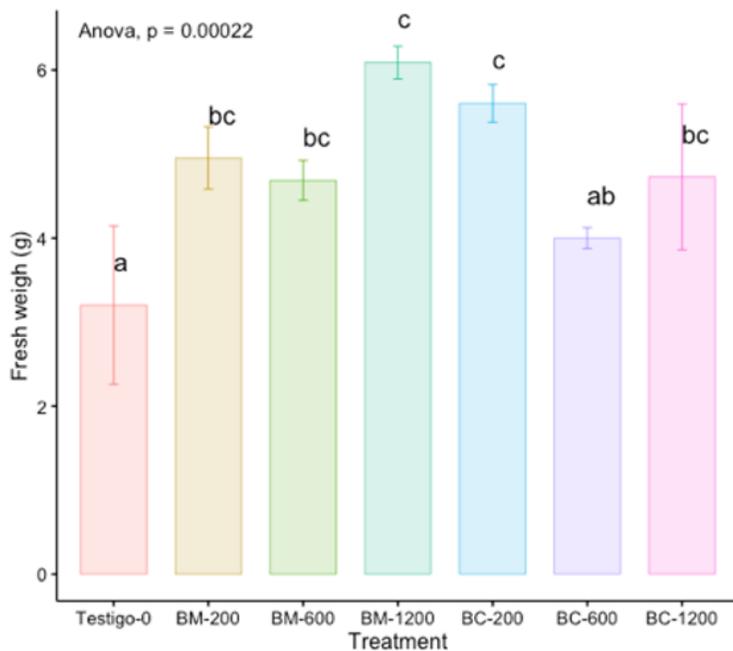


Figura 36: El efecto de diferentes tratamientos sobre el peso fresco de plántulas de pimiento morrón.

En esta gráfica (Figura 36) se representó el peso fresco se refiere a la masa total de la plántula inmediatamente después de su recolección, incluyendo su contenido de agua natural de cada tratamiento y las letras significan la diferencia significativa de cada tratamiento, donde se demuestra que el testigo arroja la letra a lo cual nos dice que tiene diferencia significativa del tratamiento BM 200, BM 600, BM 1200, BC 200 Y BC 1200 pero, semejanza con el tratamiento BC 600.

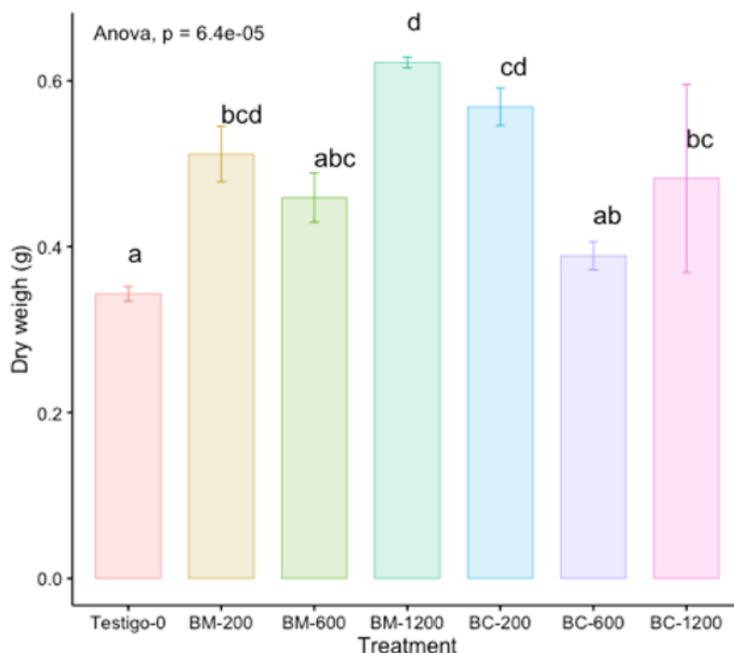


Figura 37: El efecto de diferentes tratamientos sobre el peso seco de plántulas de pimiento morrón.

En esta gráfica (Figura 37) se representó el peso seco de cada tratamiento, el peso seco de una plántula se refiere a la masa de la plántula después de que se le ha removido toda el agua mediante un proceso de secado y la gráfica nos arroja resultados donde hace la diferencia entre el testigo con el tratamiento BM 200, BM 1200, BC 200 y BC 1200 pero semejanza con los tratamientos BM 600 y BC 600. De manera similar a los hallazgos de Gutiérrez-Ruelas et al. (2021) en judías verdes, la aplicación de NPs de óxido de hierro mejoró significativamente la biomasa total, la producción de frutos y la asimilación de nitrógeno en pimiento morrón. Esto respalda aún más su potencial como alternativa de fertilizante sostenible.

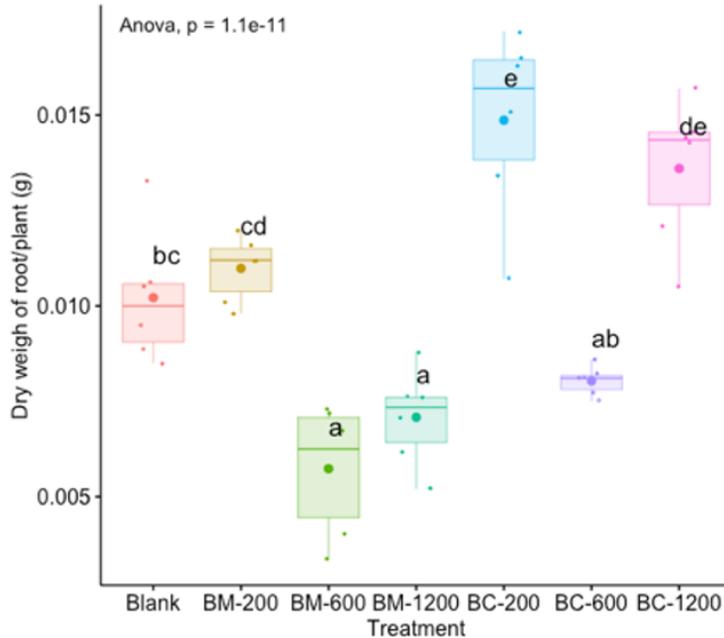


Figura 38: El impacto de varios tratamientos que involucran biomasa de nanopartículas de magnetita (BM) y biocarbón (BC) como fertilizante en el peso seco de las raíces de plántulas de pimiento morrón.

En esta gráfica (Figura 38) se representó el peso fresco de cada tratamiento con una gráfica de cajas la cual es una herramienta de visualización de datos que resume la distribución de un conjunto de datos a través de sus cuartiles, esta representación gráfica es valiosa para identificar la tendencia central, la dispersión y la presencia de valores, es decir, nos arroja los datos que se interceptan al distribuirlos o por lo contrario al no interceptarse lo cual no dice que no tiene semejanza alguna

#### 4.2.9 ANÁLISIS DE ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

En esta gráfica (Figura 39) representó los siete tratamientos que maneje con sus respectivos resultados donde las letras significan la similitud o diferencia de cada uno. En la primera medición del 23 de septiembre la altura no tenía tanta variación entre el tratamiento de biomasa y biocarbón, en la medición 25 de septiembre la altura era semejante, e la medición del 27 de septiembre la altura se disparo con el tratamiento de biomasa las plántulas crecieron un 20% más que en el tratamiento de biocarbón, en la medición 30 de septiembre seguía adelante la altura del tratamiento de biomasa, en la medición del 04 de octubre la altura de la plántula del

tratamiento de biocarbón ya había alcanzado el crecimiento del tratamiento de biomasa, dejando abajo el tratamiento de BM 600, en la medición del 07 de octubre, era semejante a los tratamientos pero en esta el tratamiento BM 1200 se mantenía por encima de los demás, en la medición del 09 de octubre la altura se mantenía igual que la de la fecha anterior es aquí cuando se decidió tomar una última medición más para confirmar que se mantiene en a misma altura, con esto se llegó a la medición número ocho donde el tratamiento de biocarbón supero la altura de las plántulas con el tratamiento de biomasa.

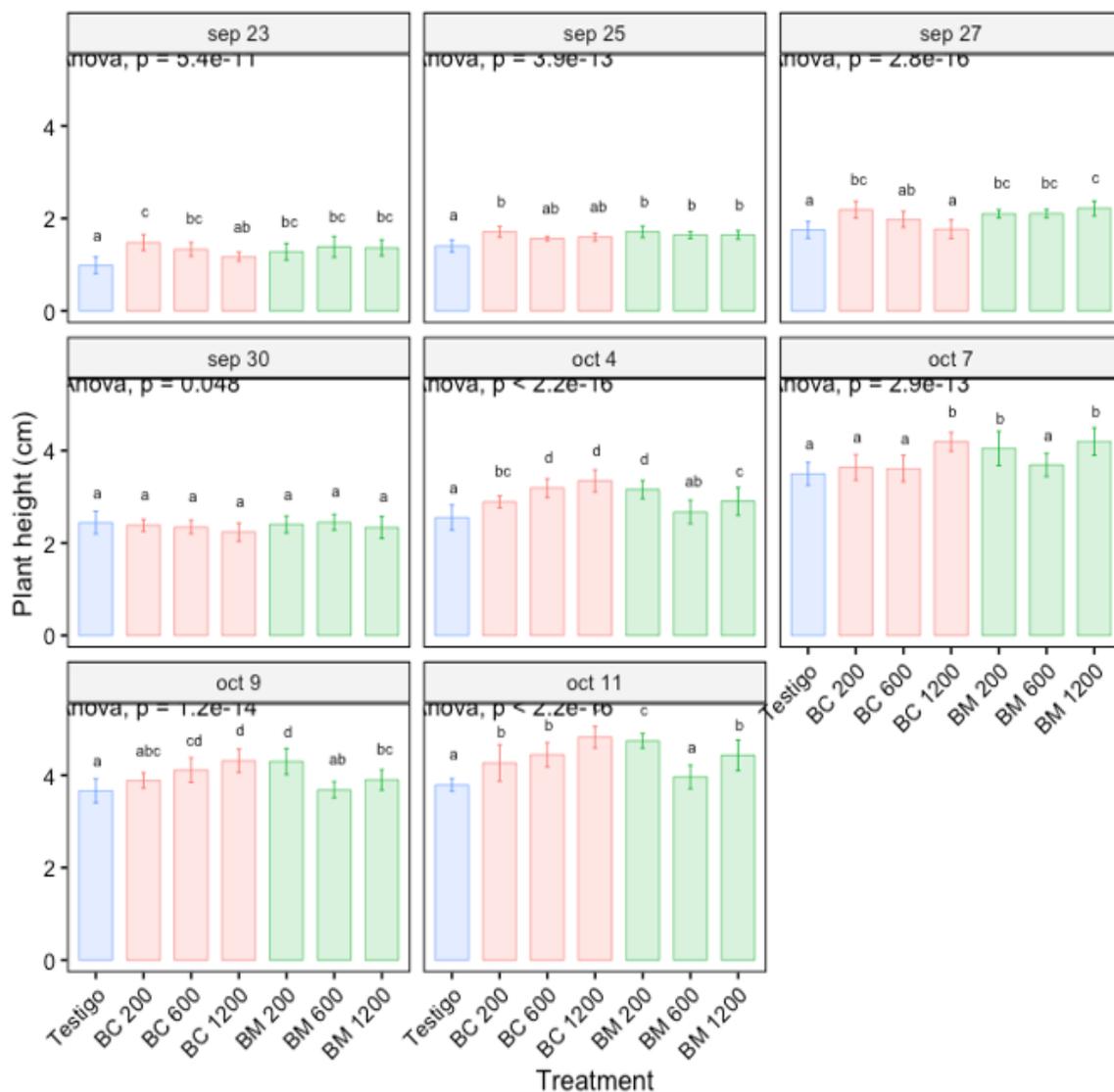


Figura 39: El efecto de diferentes tratamientos sobre de altura de plantas de plántulas de pimienta morrón.

En está gráfica (Figura 40) representó el total de clorofila de cada tratamiento utilizado, donde el testigo contiene una mayor concentración con 1.5g, el tratamiento

BC 200 con 1.3g, BC 600 1.4g, BC 1200 1.1g, BM 200 1.4g, BM 600 1.2g y BM 1200 1.05g. La clorofila es un pigmento esencial en las plántulas, fundamentalmente para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas convierten la luz en energía química y con esto se demuestra que al agregarle estos tratamientos de biomasa y biocarbón su concentración disminuye a comparación del testigo que no se le agregó nada más que sustrato. La incorporación de nanopartículas de magnetita en el biocarbón ofrece un enfoque prometedor para mejorar los rendimientos de los cultivos (Feng et al., 2022; Tombuloglu et al., 2019).

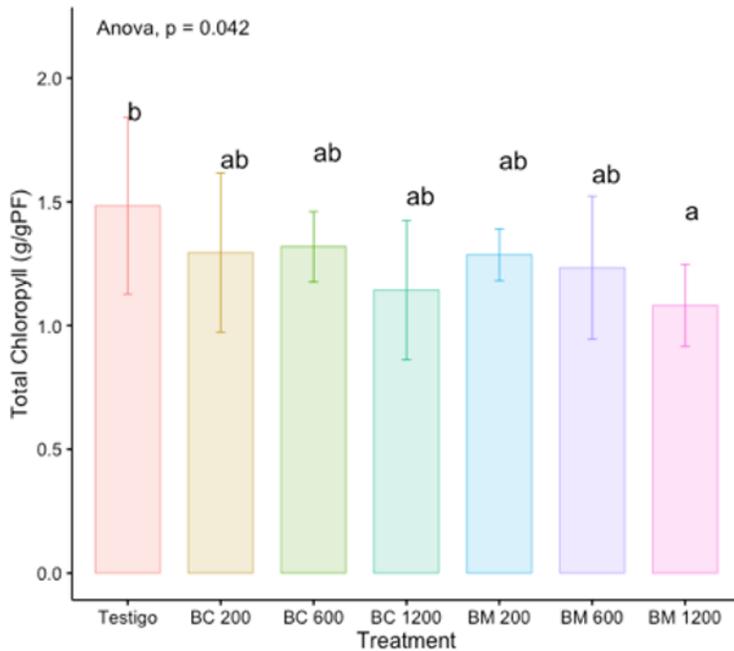


Figura 40: Gráfica representativa de los tratamientos y la concentración que se tuvo de cada uno y las letras significan la semejanza o diferencia de cada uno de ellos

En esta gráfica (Figura 41) de cajas muestra la distribución de la longitud de la raíz de semilla de pimienta bajo dos tratamientos distintos: biomasa y biocarbón.

Se observa que el tratamiento BC1200 presenta la mayor mediana de longitud de raíz, seguido por BM 200, el tratamiento de BC 200, BC 600, BM 1200 y el testigo tienen medianas más bajas, siendo similares entre sí.

Además, la variabilidad de los datos es mayor en BC 1200, lo que indica una respuesta más dispersa entre las semillas.

En conjunto, la gráfica sugiere que los tratamientos BC 1200, BM 200 estimulan un mayor crecimiento de raíces, aunque también presenta más variabilidad en los resultados.

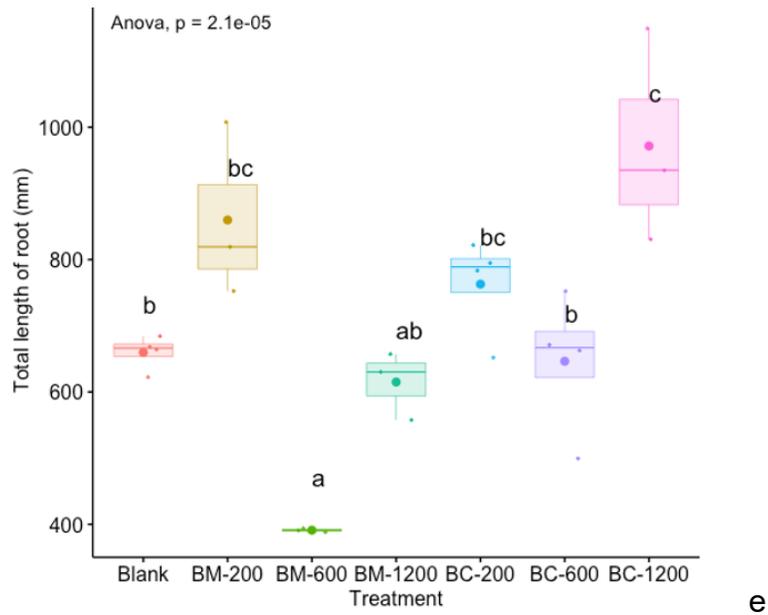


Figura 41: Gráfica representativa de la distribución de cada tratamiento y la concentración que se obtuvo al medir la longitud total de la raíz

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos en este experimento sobre el uso de nanopartículas de magnetita compuestas por biocarbón (BC) y biomasa (BM) de cáscara de nuez como fertilizante para mejorar la germinación de pimiento morrón (*capsicum annum l.*) se concluye los siguientes puntos:

- ❖ La plantación de pimiento tuvo un 100% de germinación, donde se utilizaron dos tratamientos: BC y BM a diferentes concentraciones, sin mencionar su concentración confirmo que su germinación fue uniforme.
- ❖ En el análisis de crecimiento de la plántula se observó que el crecimiento era constante en los diferentes tratamientos, hubo un disparo de crecimiento en la fecha 04 de octubre de 2024, podría decir que ese fue el disparo que dio el crecimiento de la planta, pasando esa fecha se tomaron las mediciones para la plántula ya no crecía más, entonces se suspendió la medición.
- ❖ El análisis de DRX confirma la presencia de magnetita cristalina en todos los materiales sintetizados, y los compuestos exhiben una cristalinidad modificada debido a las interacciones con las matrices orgánicas. Estas características estructurales tamaños de cristalina más pequeños en BM y el fondo amorfo del biocarbón en BC subrayan las propiedades fisicoquímicas a medida de los compuestos, lo que puede influir en su eficacia como fertilizantes mejorados con nanotecnología. Esta validación de fase es fundamental para interpretar su rendimiento en ensayos de crecimiento de plántulas y plantas de pimiento morrón (*Capsicum annum L.*).
- ❖ El presente estudio permitió corroborar que la aplicación de un nanocompuesto formulado a partir de magnetita y biocarbón obtenido de

cáscara de nuez pecanera incide positivamente en el desarrollo inicial de plántulas de pimiento morrón (*Capsicum annuum L.*), lo cual sugiere su potencial como agente nanofertilizantes en sistemas agrícolas sustentables.

- ❖ Los datos experimentales evidenciaron mejoras estadísticamente significativas en variables como el porcentaje de germinación.
- ❖ Por otra parte, el aprovechamiento de residuos agroindustriales, como la cáscara de nuez pecanera, para la síntesis del biocarbón representa una estrategia de valorización de desechos con implicaciones ambientales positivas, al integrarse en un enfoque de economía circular y producción agrícola más limpia.
- ❖ En su conjunto, los resultados se manifiestan ecológica y eficiente para favorecer el crecimiento vegetal en etapas tempranas.

## LITERATURA CITADA

- [1] Rocha-Santillano, J.J., Sangerman-Jarquín, D.M., Preciado-Rangel, P., De la O-Olán, M., Fortis-Hernández, M., Márquez-Guerrero, S.Y., Flores-Hernández, E.A., & Romero-Arenas, O. (2025). IMPACTO DE NANOPARTÍCULAS DE HIDROXIAPATITA EN LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ACTIVIDAD ENZIMÁTICA EN PIMIENTO MORRÓN. *Revista Fitotecnia Mexicana*.
- [2] Antón-Herrero, R., García-Delgado, C., Mayans, B., Camacho-Arévalo, R., & Eymar, E. (2020). Impact of New Micro Carbon
- [3] Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L.A., Puente-Urbina, B.A., & Lira-Saldivar, R.H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, 8, 140-156.
- [4] REYES PEREZ, Juan José et al. Fertilización con abonos orgánicos en el pimiento (*Capsicum annum* L.) y su impacto en el rendimiento y sus componentes. *Ctro. Agr. [online]*. 2017, vol.44, n.4, pp. 88-94. ISSN 0253-5785.
- [5] Díaz, M.S., Aguila, I.D., González, L.C., Ortiz, R.S., & Rodríguez, Y.P. (2016). Sustratos y soluciones nutritivas para la obtención de plántulas de pimiento y su influencia en la producción en cultivo protegido.
- [6] Huang, D., Liu, C., Zhang, C., Deng, R., Wang, R., Xue, W., Luo, H., Zeng, G., Zhang, Q., & Guo, X. (2019). Cr (VI) removal from aqueous solution using biochar modified with Mg/Al-layered double hydroxide intercalated with ethylenediaminetetraacetic acid. *Bioresource Technology*, 276, 127-132.

[7] Islam, M. A., Angove, M. J., & Morton, D. W. (2019). Recent innovative research on chromium (VI) adsorption mechanism. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 12, 100267.

[8] ZAMORA, D. T., ORTEGA, A. C., & GONZÁLEZ, J. A. R. (s. f.). Los sitios de disposición final: Una narrativa de los avances y las asignaturas pendientes en León, Guanajuato. *Expresión Económica*, 5.

[9] AAE (2020) La biomasa en Andalucía. Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. Junta de Andalucía.

[10] Alburquerque JA, Salazar P, Barrón V, Torrent J, del Campillo MC, et al. (2021) Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development* 33: 475–484.

[11] Aguilar-Meléndez, A. 2004. Ethnobotany, classification, and distribution of *Capsicum annuum* L. in Mexico. En Pozo C., O. (ed) Primera Convención Mundial del Chile 2004, Memorias. León, Gto., México. pp. 419-421.

[12] Aguilar-Rincón, V. H., T. Corona Torres, P. López López, L. Latournerie Moreno, M. Ramírez Meraz, H. Villalón Mendoza y J. A. Aguilar Castillo. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.

[13] Quesada-Kimsey (2012).

[14] RuizMoreno, R., Martinez, A., Falcony, C., Castro-Rodriguez, R., Bartolo, P., & Castro-Roman, M. (2013). One pot synthesis of water compatible and monodisperse magnetite nanoparticles. *Materials Letters*, 92, 181–183.

[15] Ali, A., Shah, T., Ullah, R., Zhou, P., Guo, M., Ovais, M., Tan, Z., Rui, Y.K., 2021. Review on Recent Progress in Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Diverse Applications. *Front Chem.* <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.629054>

[16] Rao, M.S., Rao, C.S., Kumari, A.S., 2022. Synthesis, stability, and emission analysis of magnetite nanoparticle-based biofuels. *Journal of Engineering and Applied Science.* <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00127-y>

[17] Xiao, X., Chen, B., Chen, Z., Zhu, L., Schnoor, J.L., 2018. Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review. *Environ Sci Technol.* <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06487>

[18] Singh Yadav, S.P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, Prava, Paudel, Pragya, Shrestha, J., Oli, B., 2023. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *J Agric Food Res.* <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>

[18] Spanos, A., Athanasiou, K., Ioannou, A., Fotopoulos, V., Krasia-Christoforou, T., 2021. Functionalized magnetic nanomaterials in agricultural applications. *Nanomaterials.* <https://doi.org/10.3390/nano11113106>

[19] Tombuloglu, H., Slimani, Y., Tombuloglu, G., Almessiere, M., Baykal, A., 2019. Uptake and translocation of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles and its impact on photosynthetic genes in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Chemosphere* 226. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.075>

[20] Feng, Y., Kreslavski, V.D., Shmarev, A.N., Ivanov, A.A., Zharmukhamedov, S.K., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S.I., Shabala, S., 2022. Effects of Iron Oxide Nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) on Growth, Photosynthesis, Antioxidant Activity and Distribution of Mineral Elements in Wheat (*Triticum aestivum*) Plants. *Plants*

[21] <https://doi.org/10.3390/plants11141894>

[22] S. Khamkure, A. Reyes-Rosas, V. Bustos-Terrones, S.-E. Garrido-Hoyos, P. Gamero-Melo, and D.-E. Pacheco-Catalán, “Enhancing Adsorption and Desorption of Arsenic on Carbon Xerogel Nanocomposites in Aqueous Solution: Process Optimization,” in *Response Surface Methods - Theory, Applications and Optimization Techniques*, Valter Silva and João Sousa Cardoso, Ed., Rijeka: IntechOpen, 2024, ch. 3. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online].

[23] Xiao, X., Chen, B., Chen, Z., Zhu, L., & Schnoor, J. L. (2018). Insight into Multiple and Multilevel Structures of Biochars and Their Potential Environmental Applications: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, 52(9), 5027–5047. doi:10.1021/acs.est.7b06487

[24] Singh Yadav, S.P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N.P., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*.

[25] Gutiérrez-Ruelas, N.J., Palacio-Márquez, A., Sánchez, E., Muñoz-Márquez, E., Chávez-Mendoza, C., Ojeda-Barríos, D.L., & Flores-Córdova, M.A. (2021). Impact of the foliar application of nanoparticles, sulfate and iron chelate on the growth, yield and nitrogen assimilation in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*.

[26] Sanchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., Bolan, N., Role of biochar as an additive in organic waste composting, *Bioresource Technology* (2017), doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>