

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**ZEOLITA AMONIO-CLINOPTILOLITA COMO FERTILIZANTE DE LENTA
LIBERACIÓN EN PLÁNTULAS DE PIMIENTO MORRÓN (*Capsicum annuum L.*)**

POR

JANET LAUREANO RICARDO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

ZEOLITA AMONIO-CLINOPTILOLITA COMO FERTILIZANTE DE LENTA
LIBERACIÓN EN PLÁNTULAS DE PIMIENTO MORRÓN (*Capsicum annum L.*)

POR:

JANET LAUREANO RICARDO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR EL COMITÉ ASESOR

DR. ALEJANDRO ZERMENO GONZALES

ASESOR PRINCIPAL

DRA. SASIROT KHAMKURE

CODIRECTORA

DR. LUIS SAMANIEGO MORENO

COASESOR

DR. FRANCISCO MARCELO LARA VIVEROS

COASESOR

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, diciembre de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

ZEOLITA AMONIO-CLINOPTILOLITA COMO FERTILIZANTE DE LENTA
LIBERACIÓN EN PLÁNTULAS DE PIMIENTO MORRÓN (*Capsicum annum L.*)

POR:

JANET LAUREANO RICARDO

TESIS

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



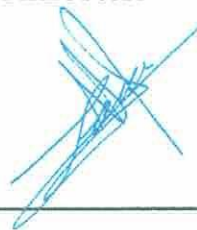
DRA. SASIROT KHAMKURE

CODIRECTORA



DR. LUIS SAMANIEGO MORENO

COASESOR



DR. FRANCISCO MARCELO LARA VIVEROS

COASESOR



M.C. SERGIO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, diciembre de 2025

DECLARATORIA DE NO PLAGIO

El autor quién es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar el autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio del texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Autor principal



Janet Laureano Ricardo

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no habría sido posible sin el apoyo y acompañamiento de las personas que caminaron conmigo durante este proceso.

A mi asesora, Dra. Sasirot Khamkure, gracias por su guía académica y su paciencia inagotable. Sus observaciones, enseñanza y dedicación fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto. Gracias por orientarme con firmeza, pero también con humanidad, y por permitirme crecer en independencia y criterio propio.

A la Dra. Victoria Bustos Terrones, quien se convirtió en una luz en este proceso. Gracias por motivarme a dar ese paso que cambió mi perspectiva profesional. Llevo conmigo cada consejo, cada corrección y cada palabra de aliento.

A Dr. Alejandro Zermeño Gonzales, Dr. Luis Samaniego Moreno y al Dr. Francisco M. Lara Viveros por su orientación académica y apoyo en la revisión de tesis, gracias por atender a mis interminables correos. Y también al Mc. Aaron I. Melendres Álvarez por resolver mis dudas para los trámites

A mis padres, Carmen y Crisóforo, con quienes aprendí el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia. Gracias por enseñarme que los sueños se construyen con trabajo y sacrificio, y por apoyarme incluso cuando las circunstancias no fueron fáciles. Cada logro alcanzado lleva su esencia y su ejemplo.

A mi mamá Celia, cuya presencia marcó profundamente mi vida. Gracias por haberme criado con amor, por cuidarme, y por ser el refugio al que acudí en los momentos en que sentí que no podía más. Sus palabras, su abrazo y su fe en mí fueron sostén en los días oscuros y aliento para levantarme cuando quise rendirme. Este trabajo es fruto de su ternura y fortaleza.

A Rodrigo, mi amado esposo, gracias por escucharme cuando me sentía frustrada o cansada; por acompañarme en silencio cuando lo único que necesitaba era ser comprendida. Gracias por celebrar mis pequeños logros, sostener mis dudas. Tu paciencia, apoyo y cariño hicieron más ligero este camino.

A mis amigos, gracias por su compañía en este camino. Por las conversaciones que me devolvieron claridad, por las risas que aligeraron el cansancio y por su apoyo constante. En especial a mi amiga Alicia Baeza, gracias por tu compañía, por caminar a mi lado con el corazón abierto y el abrazo listo.

Agradezco a CINVESTAV, por brindarme el espacio y las herramientas para realizar los análisis químicos que sustentan esta investigación; y al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por ofrecerme un lugar donde pude desarrollar la parte experimental de este proyecto, así como por el acompañamiento del personal académico (al Dr. Audberto Reyes Rosas), y personal técnico que me apoyó.

*A mi hija Isabella, regalo de Dios y de la vida,
razón de mis pasos y mis sueños.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	2
1.1 Importancia del <i>Capsicum annum L.</i> en México.....	2
1.2 Planteamiento Del Problema.....	4
1.3 Justificación.....	5
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general.	7
1.5.2 Objetivos específicos.	7
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Zeolita. Propiedades Y Modificación.....	8
2.2 Aplicaciones De Las Zeolitas Y Los Fertilizantes Nitrogenados A Base De Zeolitas En La Agricultura	11
2.2.1 Aplicaciones de la zeolita clinoptilolita en tratamiento de aguas residuales. ..	11
2.2.2 Reducción de la pérdida de amoníaco.....	11
2.2.2 Fertilizantes de liberación controlada.	13
2.2.3 Efecto de la fertilización con $NH_4 +$ sobre el crecimiento de las plantas.....	14
METODOLOGÍA	16
3.1 Localización	16
3.2 Materiales Y Preparación De Sustratos	16
3.3 Condiciones Experimentales	17
3.4 Detalles Del Montaje Experimental	19
3.5 Preparación y siembra del material vegetal	24
3.6 Muestreo y evaluación del Crecimiento de las Plántulas.....	26
3.7 Evaluación Integral De Plántulas Y Variables De Rendimiento	27
3.7.1 Determinación de rendimiento (Peso fresco y seco).....	28
3.7.2 Contenido de clorofila con el método espectrofotométrico.	28
3. 8 Análisis Químico Y Estructural Del Material Vegetal	29

3.8.1 Análisis de nitrógeno por el método de Dumas	29
3.8.2 Caracterización Microscópica (SEM/EDS)	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1 Aplicación zeolitas NH4 como fertilizante de liberación lenta en un experimento bajo invernadero.....	31
4.2 Análisis de rendimiento (Peso fresco y seco).....	31
El rendimiento biomásico de las plántulas de <i>Capsicum annuum L.</i> mostró variación entre los tratamientos que incorporaron diferentes proporciones y tipos de zeolita NH4 -clinoptilolita. Los valores obtenidos para peso fresco y seco se resumen en la Tabla 7.....	31
4.3 Análisis de estadístico de los datos	32
4.3.1 Desempeño de las plántulas en altura.	32
4.3.2 Número de hojas verdaderas.	34
4.3.3 Diámetro de tallo.....	35
4.3.4 Contenido de clorofila y área foliar.....	36
4.4 Análisis estructural y química para material vegetal.....	37
4.4 .1 Análisis del contenido de nitrógeno por el método de DUMAS.....	37
4.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y la Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).....	39
4.5 Análisis integral.....	42
CONCLUSIÓN	44
REFERENCIAS.....	45
ANEXOS.	52
ANEXO I. Micrografías de los materiales ECC, ICC e ICP	53
ANEXO II. Difracción de rayos X (XRD) de los materiales ECC, ICC, e ICP	54
ANEXO III. Espectros EDX de los materiales ECC, ICC e ICP.....	55
ANEXO IV. Análisis BET del material ECC, ICC, e ICP	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Evolución del consumo de los fertilizantes. Fuente: (Rimski-Korsakov and Lavado, n.d.)	3
Figura 2 Estructura de la Zeolita mostrando sus poros y diámetros	9
Figura 3 Estructura de la clinoptilolita. Fuente: (Hernández et al., n.d.)	10
Figura 4 Proceso de nitrificación por bacterias. Fuente: BASF Agro España	13
Figura 5 Zeolita natural y Zeolita NH_4 -clinoptilolita listos para ser puestos en charola germinadora.....	17
Figura 6 Zeolita NH_4 -clinoptilolita medido en base a volumen en una probeta de 100 ml	19
Figura 7 Charola preparada anterior a la siembra	25
Figura 8 Sembrado del pimiento morrón	25
Figura 9 Plántulas en la etapa final del experimento	27
Figura 10 Muestras de plántulas molidas previo al análisis Dumas	29
Figura 11 Análisis de los tratamientos respecto a altura	33
Figura 12 Comportamiento de los tratamientos con respecto al número de hojas verdaderas	34
Figura 13 Comportamiento de los tratamientos con respecto al diámetro de tallo	35
Figura 14 Comportamiento del contenido de clorofila en los tratamientos	36
Figura 15 Comportamiento del área foliar en cada tratamiento.....	37
Figura 16 Imágenes SEM a 2500X y 5000X, respectivamente	39
Figura 17 Patrones EDX y tabla de los elementos de análisis puntual del material vegetal correspondiente al tratamiento T1P	40
Figura 18 Patrones EDX y tabla de los elementos de análisis de microárea del material vegetal correspondiente al tratamiento T1P	41
Figura 19 Micrografía SEM de los materiales a)ECC, b)ICC, c)ICP y d)Zeolita natural antes de su aplicación como sustrato	53
Figura 20 Difractograma de los materiales ECC, ICC, ICP y NCC (zeolita natural)	54
Figura 21 Isoterma de adsorción- desorción de los materiales ECC, ICC, ICP y NCC(zeolita natural)	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fertilizantes de liberación lenta y controlada de RISSO-CHEMICAL. Elaboración propia en datos de RISSO-CHEMICAL.....	14
Tabla 2 Respectivos porcentajes de zeolita natural y zeolita NH_4 -clinoptilolita	18
Tabla 3 Porcentaje de ECC y zeolita natural usado en el tratamiento	21
Tabla 4 Porcentaje de ICC y zeolita natural usado en el tratamiento.....	22
Tabla 5 Porcentaje de ICP usado en los tratamientos.....	23
Tabla 6 Formato para registro de datos	26
Tabla 7 Valores de los peso seco y fresco en los distintos tratamientos.....	31
Tabla 8 Contenido de porcentaje de nitrógeno obtenido por el método de DUMAS	38
Tabla 9 Porcentaje en peso y átomos de los elementos detectados	55
Tabla 10 Parámetros BET y propiedades texturales del material ECC, ICC, ICP y NCC (zeolita natural)	56

RESUMEN

En el presente estudio evaluó la eficacia de la zeolita modificada con amonio (NH_4 -clinoptilolita) sobre el crecimiento inicial y el estado nutricional de plántulas de pimiento morrón. Se establecieron nueve tratamientos combinando zeolita natural con zeolita NH_4 -clinoptilolita en tres porcentajes (5%, 15% y 25%), bajo tres tipos de acondicionamiento: impregnación por microondas (ECC), impregnación-secado convencional (ICC) e impregnación en polvo (ICP). Las plántulas se mantuvieron en condiciones controladas durante 33 días, durante los cuáles se registraron variables morfológicas y parámetros fisiológicos.

El análisis de Dumas confirmó la alta eficacia de la zeolita, demostrando un aumento significativo en la absorción de N total del 54% al 73% en las plántulas tratadas respecto al control convencional (T4). Esta disponibilidad de N impulsó un crecimiento vegetativo superior: los tratamientos óptimos duplicaron el área foliar, alcanzando $\sim 100\text{ cm}^2$ (un aumento del 100% frente a $\sim 50\text{ cm}^2$ del control), y produjeron los tallos más gruesos ($\sim 1.1\text{ mm}$) y mayor altura ($\sim 50\text{ mm}$). Se observó una partición efectiva del N: el contenido total de clorofila no mostró diferencias significativas ($p=0.75$), lo que sugiere un efecto de techo nutricional, en el que el N excedente se destinó a la formación de la biomasa estructural.

La forma de Polvo Impregnado (ICP) en concentraciones del 5% al 15% (T1P y T2P) fue identificada como el tratamiento óptimo debido a su área superficial mejorada, que aseguró una liberación de N sostenida y eficiente. En contraste, la forma de Chip (ICC), a pesar de registrar una alta acumulación de N, exhibió un efecto de concentración inverso debido a la impedancia física, lo que limitó el crecimiento. En conclusión, la zeolita NH_4 -clinoptilolita, especialmente en su forma ICP, es una alternativa altamente prometedora para optimizar la nutrición nitrogenada y maximizar el vigor inicial de las plántulas de *Capsicum annuum* L.

PALABRAS CLAVES

Amonio; clinoptilolita; *Capsicum annuum* L.; fertilizante de liberación lenta; Zeolita

INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia del *Capsicum annum L.* en México

El centro de origen y diversidad de *Capsicum annum L.* es México, y representa uno de los productos de mayor importancia económica a nivel mundial y particularmente en México, ya que constituye una fuente relevante de ingreso agrícola y abastecimiento alimentario.

La etapa de plántula es crítica para asegurar un adecuado establecimiento en campo ya que durante este periodo las plantas son especialmente sensibles al estrés hídrico y nutricional, así como a las limitaciones físicas y químicas del sustrato utilizado en vivero.

En los sistemas de producción actuales, los sustratos comerciales tienden a presentar características que afectan negativamente el desarrollo temprano, tales como baja retención de humedad, escasa disponibilidad nutrimental y pérdidas de nutrientes por lixiviación. Por ello, existe el interés en incorporar materiales naturales que mejoren la estructura y aumenten la eficiencia del uso de nutrientes y agua.

La importancia de los fertilizantes radica en su uso. Es el principal insumo agrícola para aumentar el rendimiento por hectárea. En México se utilizan fertilizantes de los siguientes tipos:

1. Fertilizantes inorgánicos: obtenidos a partir de minerales, suelen ser de origen sintético. Siendo los más comunes los fertilizantes nitrogenados (el nitrato de amonio (NH_4NO_3), Sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$), El nitrito de calcio ($Ca(NO_2)_2$), los fosfatados, como el superfosfato de calcio ($Ca(H_2PO_4)_2$) y los fertilizantes potásicos como el cloruro de potasio (KCl).
2. Fertilizantes orgánicos: como la urea (CH_4N_2O), estos se obtienen a partir de materiales orgánicos.
3. Fertilizantes foliares: se aplican directamente sobre hojas de las plantas y son absorbidos a través de las estomas.
4. Fertilizantes de liberación controlada: son fertilizantes que liberan los nutrientes de manera gradual y sostenida en el tiempo, lo que permite una nutrición constante

a las plantas. Los cuales aún se encuentran en investigación como es el caso de este trabajo de investigación.

El consumo de fertilizante aumentó a nivel mundial a partir de mediados de la década de los 40 en países desarrollados como EE. UU. y posteriormente la Unión Europea tomó la delantera en la década de los 90, como se indica en la Figura 1, se puede observar cómo los países mencionados inicialmente lideraban el consumo de fertilizantes; sin embargo, en la década de los 90 hubo un punto de inflexión en donde China e India continuaron incrementando su consumo de fertilizante. En el caso de América Latina, el consumo es menor en comparación con estos países, aunque eso no excluye su aumento en el tiempo. (Rimski-Korsakov and Lavado, n.d.)

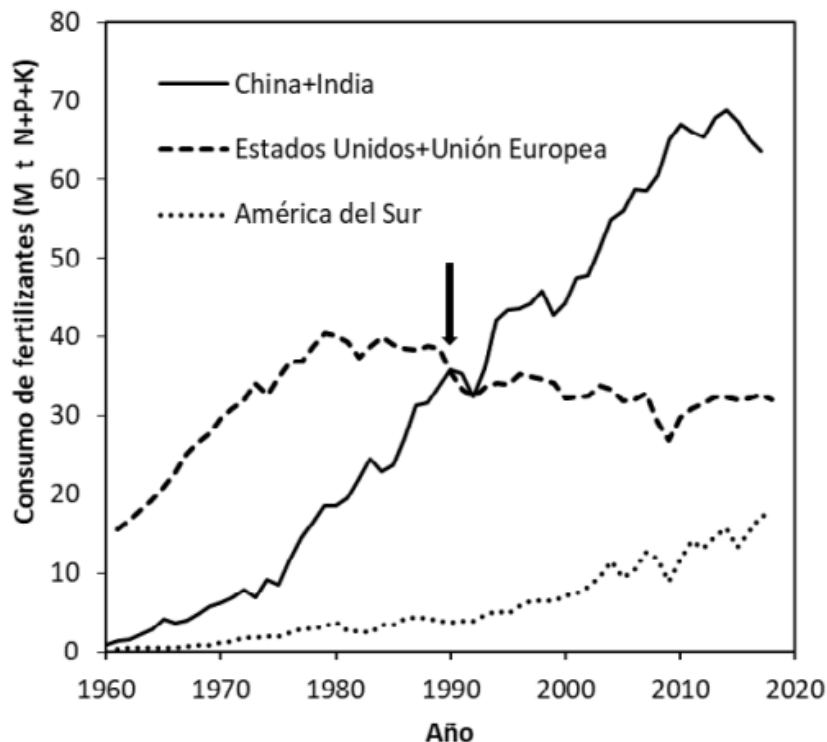


Figura 1 Evolución del consumo de los fertilizantes. Fuente: (Rimski-Korsakov and Lavado, n.d.)

El nitrógeno es considerado un contaminante debido a que los fertilizantes nitrogenados usados en la agricultura pueden lixiviarse y alcanzar los cuerpos de agua, aumentando la

concentración de nitratos y nitritos, provocando la eutrofización¹ de los cuerpos de agua. Bijay-Singh et al (2021) mencionan que más del 50% del N de los fertilizantes es utilizado directamente por los cultivos a los que se aplica; gran parte termina en cuerpos de agua subterráneos (Bijay & Craswell, 2021).

Las zeolitas son aluminosilicatos naturales con estructura microporosa capaces de adsorber agua y retener cationes de manera reversible, gracias a su elevada capacidad de intercambio catiónico. Entre ellas, la clinoptilolita es la más abundante y estudiada, destacando por su estabilidad química, su capacidad para retener amonio (NH_4^+) y potasio (K^+), y su eficacia para mejorar las propiedades físicas del sustrato. Estas características la convierten en un material con potencial para optimizar la disponibilidad nutrimental, reducir la lixiviación y favorecer el crecimiento temprano de las plantas. (Widiastuti, Hongwei, Ming, & Zhang, 2008).

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de zeolita puede incrementar el vigor, el desarrollo radical y la acumulación de biomasa en distintas especies vegetales. No obstante, la información específica para *Capsicum annum L.*, en especial en la etapa de plántula, aún es limitada y se desconocen las concentraciones óptimas de clinoptilolita que pueden incorporarse en sustrato para potenciar su crecimiento. (Cataldo et al, 2021)

1.2 Planteamiento Del Problema

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, no solo como nutriente, sino también como bioestimulante. Siendo los fertilizantes amoniacales una fuente de nitrógeno, pueden provocar la reacción de nitrificación por su alta inestabilidad (Donald L. 2024). Por esta razón, los fertilizantes se consideran una fuente antropogénica de contaminación por nitratos en las aguas subterráneas. Los altos niveles de este contaminante plantean amenazas tanto para la salud humana como para la productividad agrícola.

¹ Eutrofización: incremento en los niveles de nutrientes con respecto a lo habitual en el ecosistema de una masa de agua. (Romero, 2020)

La OMS y la FAO establecieron estándares de nitrato para el agua potable y el agua de riego: siendo para el agua potable 50 *mg/L* y para el agua de riego 22 *mg/L*. En México, la NOM-001-SEMARNAT-2021, si bien no considera el parámetro de nitratos en descargas de aguas tratadas para riego, sí establece que se debe medir el nitrógeno total y determina límites para aguas cársticas (15, 25 y 30 *mg/L*).

1.3 Justificación

La zeolita es un mineral de aluminosilicatos hidratados de estructura porosa, ocupados por agua, cationes alcalinos y alcalinotérreos. Su estructura presenta propiedades como el tamiz molecular. Tienen arreglos tridimensionales de aluminosilicato tetraédrico. El átomo de aluminio (Al^{3+}) es intercambiado por silicio (Si^{4+}). Los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} Están unidos al aluminosilicato por fuerzas electrostáticas débiles, lo que permite su capacidad de intercambiarse con cationes en las soluciones. (Widiastuti, Hongwei, Ming, & Zhang, 2008).

La zeolita es un mineral natural con propiedades únicas de intercambio iónico. Su estructura porosa y la capacidad de intercambio de cationes ofrecen beneficios valiosos cuando se utilizan fertilizantes mediante un sistema de liberación controlada, generando nutrientes más duraderos y reduciendo la lixiviación (Soltys, L. 2020).

La zeolita es un mineral que ha sido utilizado como adsorbente por su alta capacidad para adsorber iones de amonio presentes en el agua, lo que la hace funcional y económica; las propiedades de intercambio iónico de la zeolita y sus características de alta porosidad permiten que el ion amonio (NH_4^+) sea intercambiado en sus poros a cambio del sodio. (Cataldo et al, 2021)

Se han utilizado polímeros para optimizar la preparación de un CRF (Fertilizante de Liberación Controlada, por sus siglas en inglés Controlled Release Fertilizer), como se menciona en el artículo “Matrices Poliméricas sólidas basadas en quitosano y xantano para liberación controlada de fertilizantes”, donde se utilizó el KNO_3 como modelo. Se obtuvo que el xantano posee un perfil de liberación más adecuado. (Daraio et al., 2012)

En varios trabajos de investigación se han usado materiales como hidrogeles en forma de perlas a partir de alginato de sodio para la remoción de amonio de aguas residuales por su

propiedad de redes poliméricas tridimensionales, entrecruzadas y flexibles, removiendo casi el 25% de amonio y sosteniendo su capacidad por más tiempo (Dietrich, n.d.). El uso de *biochar* se ha estudiado también como un adsorbente de NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ y PO_4^{3-} . (Marrero et al., 2019).

El uso de la técnica de electrocoagulación para remoción de amonio y metales pesados, sin embargo, en este trabajo no se obtuvo resultados favorables, removiendo únicamente el 18 % de nitrógeno amoniacal, pero bajo en remoción de metales pesados (Ríos, 2005). También se ha aprovechado la adsorción resinas porosas y materiales nanoestructurados como el óxido de hierro (Fe_3O_4) y óxido de titanio (TiO_2), biosorbentes como cáscaras de arroz, aserrín, algas, arcillas y otros minerales.

La EPA (Environmental Protection Agency) indica que la zeolita clinoptilolita posee mejores características para adsorber rápidamente el amonio y des adsorber lentamente a través del tiempo, controlándose por el tamaño de la zeolita (un tamaño pequeño libera más rápido el amonio) (Del Campo, 2004).

En este trabajo se propone utilizar este material como un sistema de liberación controlada de nitrógeno para nutrir los cultivos de *Capsicum annum L.* Además, este fruto tiene relevancia en la economía nacional ya que se produce de temporada y en invernaderos.

Considerando la distribución y abundancia de zeolita clinoptilolita en la república mexicana (se encuentra principalmente en los estados de Chihuahua, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala y Veracruz) hace económicamente atractivo su uso (Ostrooumov, M. 2012). Y el proceso de intercambio catiónico sugerido es económico y de fácil manejo.

1.4 Hipótesis

La zeolita-clinoptilolita intercambiada con amonio mediante el método de microondas o impregnada en forma de pellets y polvo, al ser utilizadas como fertilizante de lenta liberación, propicia una mejora en la germinación y el crecimiento de plántulas de *Capsicum annum L.*

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general.

Evaluar la eficiencia de la zeolita amonio-clinoptilolita como fertilizante de lenta liberación, cuantificando su efecto sobre la germinación, la altura de plántula y el diámetro del tallo.

1.5.2 Objetivos específicos.

Caracterizar la zeolita amonio-clinoptilolita mediante cambio en diversas técnicas, con el fin de estudiar los cambios en sus propiedades morfológicas, texturales y de área superficial.

Evaluar el efecto de los fertilizantes utilizados sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de pimiento morrón mediante el análisis de datos obtenidos de un diseño experimental completamente al azar (DCA) con ocho tratamientos y un testigo, con 26 repeticiones por tratamiento.

MARCO TEÓRICO

2.1 Zeolita. Propiedades Y Modificación

Los retos actuales para la agricultura claramente están relacionados con la promoción de una agricultura, además de intensiva, sustentable y sobre todo ecológica; es decir, sin generar afectaciones al ambiente, lo que hace necesario eficientar los suministros agrícolas. Es decir, producir alimentos a partir de la innovación de tecnologías que permitan obtener un máximo rendimiento en los cultivos. En este contexto, y considerando que las plantas obtienen sus nutrientes a través de sus raíces, las líneas de investigación se enfocan en la búsqueda de alternativas que impulsen el crecimiento de la planta a partir del fortalecimiento del área radicular y asegurar que las condiciones de absorción tanto de nutrientes como de agua se optimicen asegurando el crecimiento de la planta.

En esta búsqueda se han evaluado desde residuos agrícolas y agroindustriales y, en general, residuos orgánicos valorizados a través de la producción de composta, la cual se aplica como enmienda orgánica en lugar de utilizar fertilizantes inorgánicos como los ya mencionados. Otras propuestas incluyen el uso de sustratos como base para los cultivos. Generalmente, se proponen compuestos naturales de origen local, evitando en gran medida comprometer la sostenibilidad de otros recursos. (Heredia et al. 2023)

Dentro de este tipo de materiales naturales, las zeolitas se han propuesto como sustratos para promover la sustentabilidad agrícola, sobre todo en regiones en donde se puede obtener de manera natural, como en México, en donde afortunadamente se cuenta con muchos yacimientos de este mineral. Además, las zeolitas son arcillas de fácil síntesis y de bajo costo en términos de energía, y de los beneficios que se obtienen al poder modificar su estructura. (Méndez et al, 2019)

La zeolita es un material poroso compuesto por aluminosilicatos de origen volcánico (su estructura se muestra en la Figura 2). Estos materiales poseen alta capacidad de intercambio catiónico. Sobre todo, es un material con una alta afinidad por el ion amonio (NH_4^+).

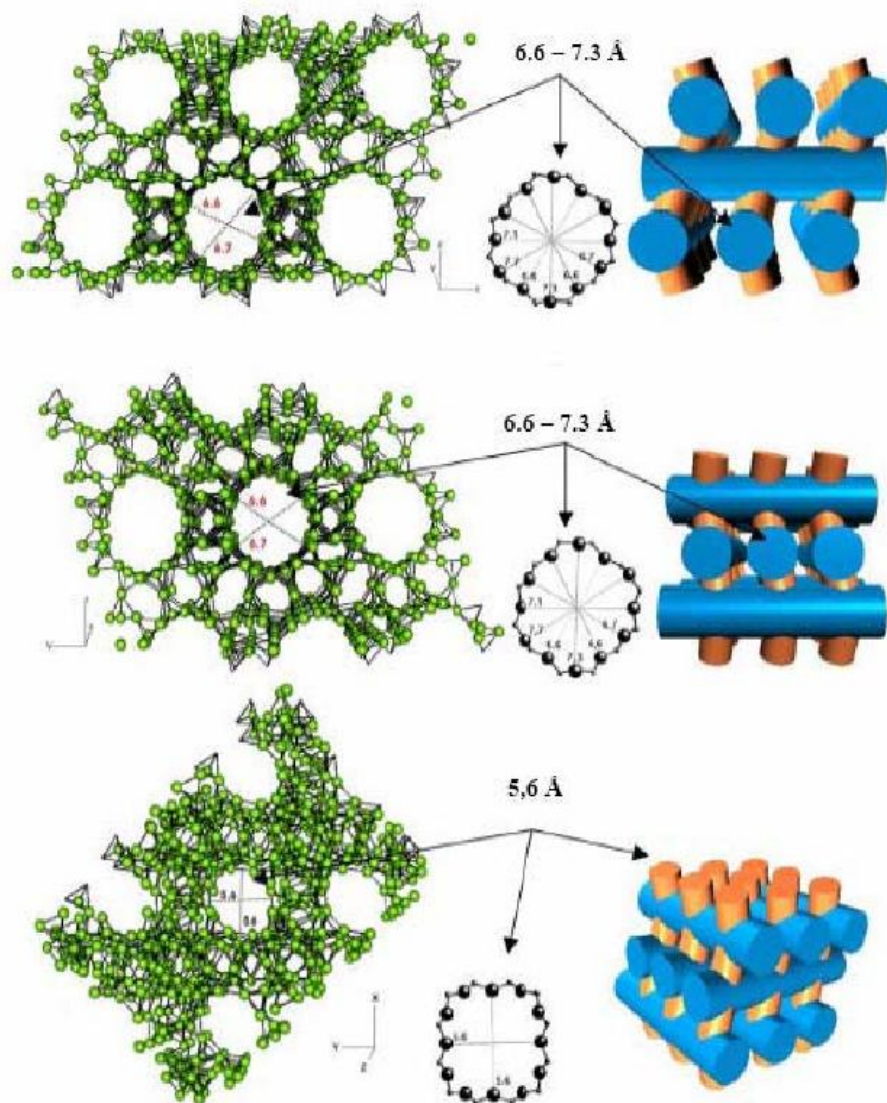


Figura 2 Estructura de la Zeolita mostrando sus poros y diámetros

La zeolita de origen natural es atractiva en el campo de la agricultura debido a su alto contenido de nutrientes como el magnesio, potasio, calcio y otros como el sodio. Las características de su estructura (forma de panal) son interesantes, ya que le permiten retener los nutrientes del suelo (Figura 3).

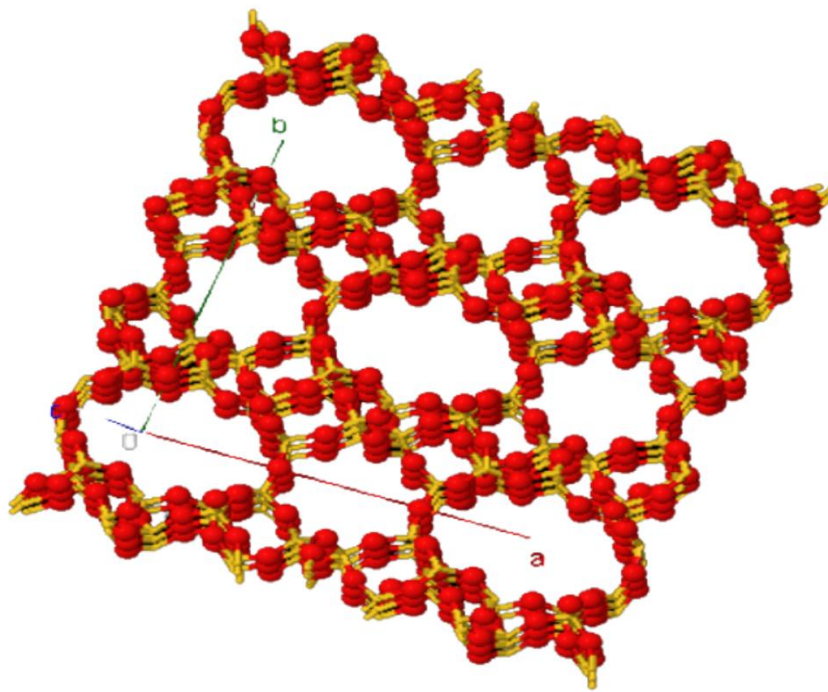


Figura 3 Estructura de la clinoptilolita. Fuente: (Hernández et al., 2010)

Gamboa et al (2024) aseveran que la aplicación de sustratos de zeolita mezclada con fertilizantes reduce la pérdida de nitratos por lixiviación. Esto mejora las condiciones del suelo, favoreciendo la disponibilidad de los nutrientes por un tiempo prolongado. Además, aseguran que cuando se aplica en suelos arenosos y alto contenido de humedad, se reducen los niveles de lixiviación de nitratos.

Dentro de las zeolitas naturales además de la mordenita, chabazita, erionita y ferrierita está la clinoptilolita. Ésta última presenta tres canales huecos: un canal formado por anillos contiguos de ocho miembros con un acceso libre de $0.26 \times 0.47 \text{ nm}$, y dos canales paralelos, uno de ocho miembros con ventanas de acceso de $0.33 \times 0.76 \text{ nm}$ como se muestra en la Figura 3.(Hernández et al., n.d.)

2.2 Aplicaciones De Las Zeolitas Y Los Fertilizantes Nitrogenados A Base De Zeolitas En La Agricultura

Las propiedades fisicoquímicas de la zeolita han permitido que varios estudios en agricultura, la utilicen como un aditivo en los sustratos para producción de hongo *Pleurotus ostreatus* (Romero et al. 2010) y *Zea maiz* en parcelas bajo sistema de riego donde se obtuvo que el tratamiento con clinoptilolita destacó por tener un mayor diámetro de tallo (González et al. 2012). Y también como fertilizantes de liberación controlada y de liberación lenta, en el el que se soportan nutrientes como el nitrógeno en forma de amonio.

En el caso de un fertilizante de liberación lenta, Gamboa (2024) obtuvo un resultado favorable al combinar la zeolita en un 40% con 20% de urea, 20% de nitrato de potasio y 20% roca fosfórica, considerándola como apta para futuras investigaciones.

2.2.1 Aplicaciones de la zeolita clinoptilolita en tratamiento de aguas residuales.

La zeolita clinoptilolita es usada para la remoción de contaminantes del agua residual, aprovechando su capacidad de intercambio iónico y de adsorción. El orden de selectividad de captación de cationes, de acuerdo con Del Campo (2004), es: Cs^+ , Rb^+ , K^+ , Li^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Co^{3+} y cuando ésta se encuentra en forma sódica, la selectividad se da de forma descendiente: $Pb^{2+} > NH_4^+$, $Ba^{2+} > Cu^{2+}$, $Zn^{2+} > Cd^{2+} > Co^{2+}$.

En un estudio realizado con compost de lodos, la zeolita puede remover metales pesados que pudieran afectar en las plantas por medio de la raíz, reteniendo además el nitrógeno y fósforo existente en los lodos, liberando los iones a través del tiempo y optimizando su utilización. (Ramos et al., 2001).

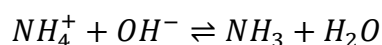
2.2.2 Reducción de la pérdida de amoníaco.

Refiriéndonos al ciclo del nitrógeno, la volatilización es el proceso por el cual el ion amonio (NH_4^+) se convierte en amoníaco (NH_3) y pasa a la atmósfera desde la solución en el suelo. El nitrógeno que se volatiliza es el proveniente de la mineralización de compuestos orgánicos del suelo y del nitrógeno contenido en los fertilizantes aplicados en el suelo (Aloé et al. 2008). Por lo anterior, existe la necesidad de reducir la volatilización del amoníaco proveniente de actividades agrícolas y pecuarias.

La emisión de amoníaco afecta el contenido de nitrógeno amoniacal (NH_3 y NH_4^+ en solución), el pH y la temperatura. Cuando éstos son elevados y la dosis de nitrógeno es alta, aumenta la probabilidad de ocurrencia de volatilización, es entonces que la pérdida por este proceso depende principalmente de las condiciones climáticas y de la composición del suelo. (Tiquia y Tam, 2000; Van der Stelt et al., 2007; Aloé et al., 2008)

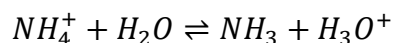
La ecuación para la conversión de NH_4^+ a NH_3 es una reacción ácido-base reversible que ocurre en solución, típicamente en agua y está influenciada por el pH. La ecuación es:

Ecuación 1



Alternativamente, puede representarse como la reacción inversa de Bronsted-Lowry, la cual es.

Ecuación 2



En una solución acuosa, el ion amonio (NH_4^+) puede actuar como un ácido y donar un protón al agua, formando amoníaco (NH_3) y iones hidronio (H_3O^+). Esto forma parte del equilibrio entre amoníaco y iones amonio en agua (Purwono et al, 2023).

Si bien la volatilización es una forma de pérdida del amoníaco, la conversión a otros compuestos como la nitrificación y la desnitrificación participan también en este proceso.

Al disolverse el amoníaco en agua del suelo, puede convertirse en amonio (NH_4^+) y después puede ser absorbido por las plantas o bien convertido en nitrato (NO_3^-) por las bacterias nitrificantes (Figura 4). También puede estar en la desnitrificación transformándose en gas como el óxido nitroso (N_2O) y el nitrógeno molecular (N_2) los cuales se liberan a la atmósfera. (AEFA. 2022; BASF Agro España, 2025) esto se observa en la Figura 4.

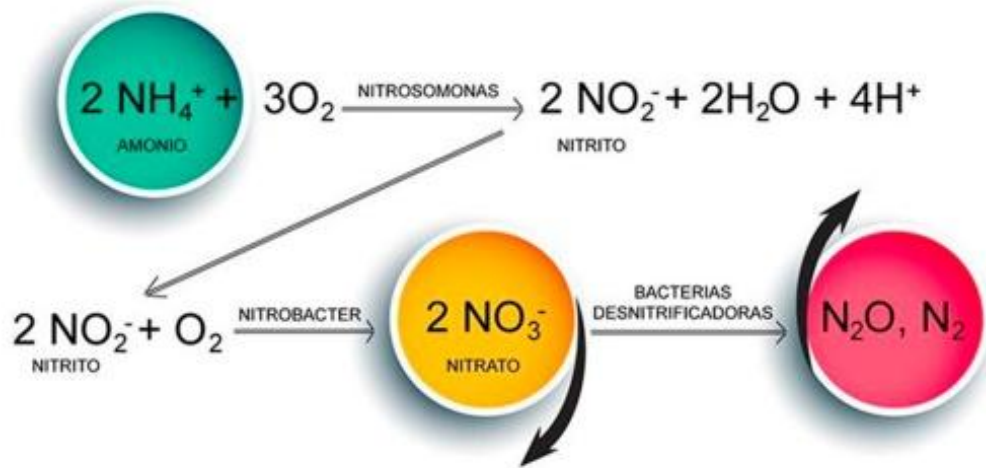


Figura 4 Proceso de nitrificación por bacterias. Fuente: BASF Agro España

2.2.2 Fertilizantes de liberación controlada.

La aplicación de fertilizantes de liberación controlada (FLC) permiten disminuir costos al ser incorporados en el sustrato en un solo evento. (Martínez et al. 2023)

Existen en el mercado fertilizantes de liberación controlada, algunos de la marca RISSO-CHEMICAL GLOBAL- ORIENTED FERTILIZERS SUPPLIER, éstos normalmente utilizan un polímero como medio de soporte para el nutriente (Tabla 1).

Tabla 1 Fertilizantes de liberación lenta y controlada de RISSO-CHEMICAL. Elaboración propia en datos de RISSO-CHEMICAL

Clasificación	Tipo de fertilizantes
NPK	Nitrógeno
Fully Coated Controlled Realease NPK	SCU UREA
Single Element Controlled Release Fertilizers	AGR UREA
Controlled Release Blended with Instant Realease Fertilizer	SCR UREA
	IND UREA
	PCU UREA
	POLYPEPTIDE UREA

Otra empresa que maneja fertilizantes complejos granulares de liberación controlada de nitrificación es IAUSA con los siguientes productos:

Basacote Plus 3M

Basacote Plus 6M

Bsacote Plus 9M

Nutriforest

La empresa española ICL con su tecnología Agromaster y Agromaster Start Mini que son fertilizantes de liberación controlada, ésta encapsula los gránulos convencionales mediante polímeros.

2.2.3 Efecto de la fertilización con NH_4^+ sobre el crecimiento de las plantas.

Las plantas requieren el nitrógeno, éste lo obtienen del amonio y nitrato. La relevancia de aplicación del amonio radica en que se lixivia menos y su conversión a aminoácido en la planta tiene un menor gasto energético comparado con el nitrato. (Cisternas, 2024).

Se aplicó en un cultivo de arándanos en Chile, amonio y nitrato, para comparar cuál de éstos tiene mejores resultados en biomasa de hojas, crecimiento de tallos y contenido de nitrógeno; el amonio mostró una mejor respuesta en crecimientos de brotes y biomasa en hojas. (Rojas Mego & Bonomelli de Pinaga, 2024).

METODOLOGÍA

3.1 Localización

El experimento se llevó a cabo en los invernaderos del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) en Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140, Saltillo, Coahuila México. C.P. 25294 en las coordenadas 14R 302135 y 14R 2817252, durante el periodo de 19 de julio a 21 de agosto del 2024, bajo condiciones controladas con un sistema de cultivo en charolas destinado a la producción de plántulas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.).

3.2 Materiales Y Preparación De Sustratos

Se utilizaron plántulas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) obtenidas a partir de la semilla comercial. Las plántulas se desarrollaron en las charolas de germinación hasta alcanzar la etapa de tres hojas verdaderas, momento en que fueron retiradas.

El sustrato base estuvo constituido por zeolita natural, utilizada sin modificación más allá de su tamizado a un tamaño de partícula aproximado de 59 μm .

El segundo componente fue zeolita clinoptilolita en forma amoniacal (NH_4^+), ésta mediante el método de intercambio iónico descrito en el Anexo A. Este material fue secado previamente a 70° C para homogeneizar su humedad.

Las mezclas de sustratos se prepararon combinando zeolita natural + NH_4 -clinoptilolita en diferentes proporciones (Figura 5) según los tratamientos experimentales descritos a continuación.



Figura 5 Zeolita natural y Zeolita NH_4 -clinoptilolita listos para ser puestos en charola germinadora

3.3 Condiciones Experimentales

Se evaluó el efecto de distintos porcentajes de zeolita NH_4 -clinoptilolita con diferentes técnicas de impregnación de amonio (ECC, ICP e ICC) aplicada en mezcla con zeolita natural como sustrato. El diseño experimental se quedó establecido como se muestra en la Tabla 2. El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar con 26 repeticiones por tratamiento, cada unidad experimental consistió en una cavidad de la charola germinadora conteniendo una plántula de pimiento morrón.

Tabla 2 Respectivos porcentajes de zeolita natural y zeolita NH_4 -clinoptilolita

Tratamiento	Identificación	Zeolita procesada	Porcentaje zeolita natural	Porcentaje NH_4 -clinoptilolita
1	T1E	ECC	95%	5%
2	T2E	ECC	85%	15%
3	T1P	ICP	95%	5%
4	T2P	ICP	85%	15%
5	T3P	ICP	75%	25%
6	T1C	ICC	95%	5%
7	T2C	ICC	85%	15%
8	T3C	ICC	75%	25%
9	T4	Zeolita natural	100%	0%

3.4 Detalles Del Montaje Experimental

Para la obtención de las cantidades en gramos de la zeolita natural y de la NH_4 -clinoptilolita se hicieron los siguientes cálculos y obtener la cantidad unitarias. En la *Figura 6*.

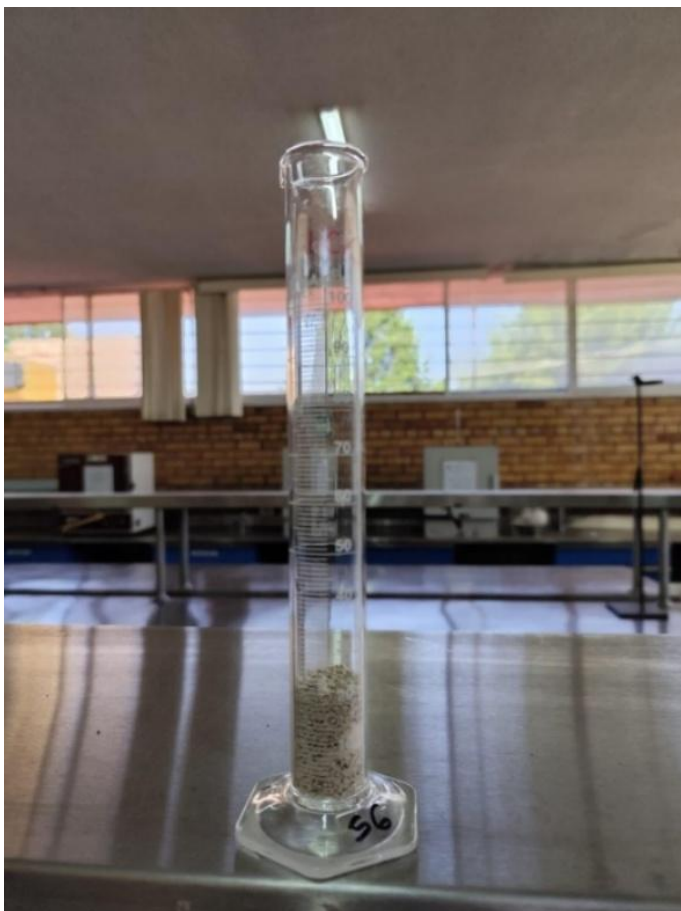


Figura 6 Zeolita NH_4 -clinoptilolita medido en base a volumen en una probeta de 100 ml

Para definir la cantidad de zeolita NH_4 -clinoptilolita utilizar en cada tratamiento, se calculó el volumen correspondiente a cada porcentaje establecido, el caso del ECC en cada tratamiento se realizó el cálculo para 26 plantas y en caso de ICP se utilizaron 30 plantas. El cálculo se realizó con base en el volumen de la cavidad del contenedor (15 ml) y el porcentaje de zeolita procesada asignado a cada tratamiento.

El volumen de zeolita procesada por cavidad (VZP) se obtuvo mediante la siguiente expresión (Ecuación 3):

Ecuación 3

$$VZP = Vc \times \frac{\%Zp}{100}$$

Donde:

VZP= Volumen de zeolita procesada por cavidad (ml)

Vc=Volumen de la cavidad (ml)

%Zp= porcentaje zeolita procesada asignada al tratamiento

Una vez determinado el volumen por cavidad se multiplicó por el número total de plantas por tratamiento (*Np*), para obtener el volumen total de zeolita procesada por tratamiento.

A partir del volumen de la cavidad (15 ml), se calculó también el volumen correspondiente de zeolita natural (*Zn*), restando la fracción ocupada por la zeolita procesada:

Ecuación 4

$$Zn = 15ml - VZP$$

Donde:

VZP= Volumen de zeolita procesada por cavidad (ml)

Zn=Volumen de la zeolita natural (ml)

Posteriormente, el volumen total de zeolita natural por tratamiento se obtuvo multiplicando *Zn* por el número de plantas asignadas a ese tratamiento.

Los cálculos para el tratamiento T1E y T2E correspondiente al material ECC se presentan en la Tabla 3. En estos casos, se utilizaron 26 plantas por tratamiento. Para los tratamientos T1C, T2C y T3C que corresponden al material ICC, se utilizaron 30 plantas por tratamiento, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3 Porcentaje de ECC y zeolita natural usado en el tratamiento

Zeolita NH_4 -clinoptilolita ECC					
Porcentaje de zeolita procesada	volumen de zeolita procesada por cavidad, V_{zp} (ml)	Número de plantas, N_p	volumen de zeolita procesada por tratamiento, $V_{zp} * N_p$ (ml)	volumen de zeolita natural por cavidad, $Zn = 15 \text{ ml} - V_{zp}$ (ml)	volumen de zeolita natural por tratamiento, $Zn * N_p$ (ml)
5%	0.75	26	19.5	14.25	370.5
15%	2.25	26	58.5	12.75	331.5

Tabla 4 Porcentaje de ICC y zeolita natural usado en el tratamiento

Zeolita NH_4 -clinoptilolita ICC					
Porcentaje de zeolita procesada	volumen de zeolita procesada por cavidad, V_{zp} (ml)	Número de plantas, N_p	volumen de zeolita procesada por tratamiento, $V_{zp} * N_p$ (ml)	volumen de zeolita natural por cavidad Z_n , 15 ml- V_{zp} (ml)	volumen de zeolita natural por tratamiento, $Z_n * N_p$ (ml)
5%	0.75	30	19.5	14.25	370.5
15%	2.25	30	58.5	12.75	331.5
25%	3.75	30	112.5	11.25	337.5

A diferencia del tratamiento ECC, donde la zeolita se encontraba en presentación granular y los cálculos se realizaron en función del volumen, en el caso del tratamiento ICP la zeolita se presentó en polvo, por lo que fue necesario realizar los cálculos con base en el peso del material.

Para ello, se tomó como referencia el peso equivalente a un volumen de 15 ml de zeolita natural, el cual a 8.9064 gramos. A partir de este valor se estimó el peso de zeolita procesada por cavidad y por tratamiento, utilizando la siguiente Ecuación 5.

Ecuación 5

$$PZP = P_c * \frac{\%Z_p}{100}$$

Donde:

PZP =Peso de zeolita procesada por cavidad (g)

P_c =Peso de la cavidad (g)

$\%Zp$ = porcentaje zeolita procesada asignado al tratamiento

El peso total de zeolita procesada por tratamiento se obtuvo multiplicando el peso por cavidad entre el número cavidades o plantas incluidas en dicho tratamiento ($Np=30$).

Asimismo, el peso de zeolita natural por cavidad (PZN) se calculó restando el peso de zeolita procesada al peso de referencia (P_c) (Ecuación 6):

Ecuación 6

$$PZN = P_c - PZP$$

Donde:

PZN = Peso zeolita natural (g)

P_c =Peso de la cavidad (g)

PZP = Peso de zeolita procesada por cavidad (g)

Los resultados se presentan en la Tabla 5

Tabla 5 Porcentaje de ICP usado en los tratamientos

Zeolita NH_4 -clinoptilolita ICP					
Porcentaje de zeolita procesada	Peso de zeolita procesada por cavidad, Pzp (g)	Número de cavidades, Np	Peso de zeolita procesada por tratamiento, $Pzp*Np$ (g)	Peso de zeolita natural por cavidad Pzn , 8.9064 g- Pzp (g)	Peso de zeolita natural por tratamiento, $Pzn*Np$ (g)
5%	0.44532	30	13.3596	8.46108	253.8324
15%	1.33596	30	40.0788	7.57044	227.1132
25%	2.2266	30	66.798	6.6798	200.394

Teniendo ya medidos y/o pesados las cantidades totales de zeolita natural y procesada a utilizar, se mezclaron de tal forma que hayan sido lo más uniforme posible, obteniendo un volumen total para cada tratamiento.

3.5 Preparación y siembra del material vegetal

Se usaron charolas de plástico con 200 cavidades desinfectadas previamente; Se prepararon las charolas germinadoras partiendo del volumen total del sustrato respecto al número de cavidades a utilizar (Figura 7). El cual fue previamente humedecido antes de colocar la semilla (una semilla por cavidad Figura 8) a una profundidad de 0.5 *cm* (Del Moreno Pérez et al., 2011)



Figura 7 Charola preparada anterior a la siembra



Figura 8 Sembrado del pimiento morrón

El sembrado se realizó el 19 de julio 2024. Después realizada la siembra y debido a las altas temperaturas presentadas en el periodo del experimento, las charolas germinadoras se mantuvieron con riego homogéneo para todos los tratamientos, utilizando agua de red. La frecuencia de riego se ajustó para mantener el sustrato cercano a capacidad de campo, evitando encharcamientos debido a la alta capacidad de retención de agua de la zeolita, con una frecuencia de dos veces al día y un aproximado de 1.5 *litros* cada vez.

No se aplicaron fertilizantes adicionales para asegurar que la fuente principal de nitrógeno fuera la zeolita NH_4 -clinoptilolita incorporada en cada tratamiento.

El control de plagas y enfermedades se realizó preventivamente y de manera uniforme en todas unidades experimentales.

Se observó la aparición de las plántulas a los 9 días después de la siembra; momento en el que se empezó a tomar datos de plántulas emergentes.

3.6 Muestreo y evaluación del Crecimiento de las Plántulas.

Para la toma de datos de altura de las plántulas se seleccionaron al menos 15 plántulas por tratamiento, seleccionando las que mejor represente el bloque, en un formato como se muestra a continuación (Tabla 6).

Tabla 6 Formato para registro de datos

TRATAMIENTO:						
	FECHA:			FECHA:		
Numero de plantas	Altura (mm)	Grosor del tallo (mm)	Numero de hojas verdaderas	Altura (mm)	Grosor del tallo (mm)	Numero de hojas verdaderas
1						
2						
...						
15						

A los 16 días (4 de agosto) después de ser sembradas las semillas se empezó a tomar datos de altura de las plántulas, se midió desde la base del tallo hasta el ápice con un vernier digital con precisión de 0.01 mm.

El número de hojas verdaderas de la plántula del pimiento morrón se registró mediante conteo directo de las hojas completamente expandidas en cada planta, en las mismas fechas en que se efectuaron las mediciones de altura.

Pasados seis días más (22 días posteriores a la siembra) se pudo tomar datos del diámetro del tallo, se midió en la parte basal del tallo, aproximadamente a 1-2 cm sobre el nivel del sustrato, para ello se utilizó un vernier digital en las mismas plantas seleccionadas para la evaluación de altura y número de hojas.

Se dio por concluido el experimento cuando las plántulas presentaron tres hojas verdaderas en promedio, como se observa en la Figura 9 con esto el periodo experimental tuvo una duración de 33 días, del 19 de julio al 21 de agosto de 2024.



Figura 9 Plántulas en la etapa final del experimento

3.7 Evaluación Integral De Plántulas Y Variables De Rendimiento

El análisis de plantas permitió evaluar de manera integral el efecto de los diferentes porcentajes de zeolita natural y zeolita NH_4 -clinoptilolita empleados como sustrato. Para ello, se analizaron variables morfológicas, de rendimiento y químicas, con el fin de determinar cómo los tratamientos influyeron en el crecimiento, acumulación de biomasa y contenido de nitrógeno total de las plántulas del pimiento morrón (*Capsicum annum* L.).

3.7.1 Determinación de rendimiento (Peso fresco y seco).

Finalizado el periodo de crecimiento (día 33), en este periodo de tiempo se tomaron datos de altura, diámetro del tallo y número de hojas verdaderas de las plántulas; el vigésimo día se dio por concluida la etapa de medición de plántulas y fue extraída cuidadosamente cada plántula de la charola germinadora para evitar pérdidas de tejido.

a) Peso fresco (PF) y secado del material vegetal

Las plantas se pesaron inmediatamente después de la extracción utilizando una balanza analítica. El material se colocó en bolsas de papel previamente identificadas y se llevó a una estufa de aire forzado a 70 °C, hasta alcanzar peso constante (durante tres días).

b) Peso seco (PS)

Tras es secado, las muestras se pesaron nuevamente para obtener el peso seco de cada tratamiento. Este valor refleja la acumulación real de biomasa sin influencia del contenido de agua.

c) Cálculo de la humedad porcentual (%H)

Ecuación 7

$$\%H = \frac{PF - PS}{PF} \times 100$$

Donde:

PF= Peso fresco (g)

PS=Peso seco (g)

%H= Porcentaje de humedad

Este procedimiento permitió estimar la capacidad de las plántulas para transformar los nutrientes aportados por la zeolita en biomasa real.

3.7.2 Contenido de clorofila con el método espectrofotométrico.

El contenido de clorofila foliar se determinó mediante un análisis espectrofotométrico realizado a partir de extractos obtenidos de hojas verdaderas de las plántulas. Para ello se seleccionaron hojas completamente expandidas en el día final del experimento y se

prepararon extractos utilizando un solvente adecuado (acetona al 80%). Las muestras fueron centrifugadas y el sobrenadante se utilizó para las lecturas espectrofotométricas.

Las absorbancias se midieron en un espectrofotómetro a longitudes de onda específicas para clorofila a y b (663 y 645 *nm*, respectivamente). Los valores obtenidos se procesaron mediante un script en R (versión 4.2), utilizando funciones incluidas en un paquete especializado para cálculos de pigmentos. El software permitió estimar el contenido de clorofila total empleando las ecuaciones de Lichtenthaler y Wellburn.

3. 8 Análisis Químico Y Estructural Del Material Vegetal

3.8.1 Análisis de nitrógeno por el método de Dumas

Se seleccionaron muestras de plántulas que fueron previamente secadas en estufa hasta peso constante a 70°C por 24 horas. Se pesaron las muestras para ser enviados a laboratorio de análisis químicos de CINVESTAV Unidad Saltillo (Figura 10). Los análisis se realizaron en un analizador elemental por combustión (método Dumas) siguiendo las condiciones del fabricante.



Figura 10 Muestras de plántulas molidas previo al análisis Dumas

Durante el análisis, la muestra es sometida a combustión a alta temperatura ($\geq 900^{\circ} C$) en atmósfera rica en oxígeno, transformando el nitrógeno orgánico en N_2 gaseoso. La cuantificación se realizó mediante un detector térmico integrado al equipo.

El equipo realiza la conversión automática, pero el principio del cálculo es:

$$\%N = \frac{m_N}{m_{muestra}} \times 100$$

Donde:

m_N = masa nitrógeno detectado

$m_{muestra}$ = masa de muestra seca utilizada

Los valores de N y los pesos y datos de control se registraron en la hoja de laboratorio.

3.8.2 Caracterización Microscópica (SEM/EDS)

La composición morfológica y elemental del compuesto de biocarbón-magnetita se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) acoplada a espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS). La muestra se preparó montándola en una cinta de carbono conductora. Un microscopio electrónico de barrido ambiental Philips XL30 (ESEM) equipado con un sistema EDS EDAX Genesis se operó a un voltaje de aceleración de 20 kV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Aplicación zeolitas NH_4 como fertilizante de liberación lenta en un experimento bajo invernadero.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) con diseño completamente aleatorizado. En caso de detectar diferencias significativas ($p < 0.05$), las medias de los tratamientos se compararon mediante la prueba de Tukey. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico R v4.2 con “ExpDes” (Reyes et al, 2024).

4.2 Análisis de rendimiento (Peso fresco y seco).

El rendimiento biomásico de las plántulas de *Capsicum annuum* L. mostró variación entre los tratamientos que incorporaron diferentes proporciones y tipos de zeolita NH_4 -clinoptilolita. Los valores obtenidos para peso fresco y seco se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7 Valores de los peso seco y fresco en los distintos tratamientos.

Clase	Tratamiento	Peso plantas fresco (g)	Peso plantas secas (g)
P	T1P	3,5458	0,4639
P	T2P	3,348	0,4388
P	T3P	2,7116	0,3735
C	T1C	3,3659	0,4348
C	T2C	2,2448	0,3127
C	T3C	2,7033	0,3353
E	T1E	2,6075	0,3137
E	T2E	2,8655	0,3602
Testigo	T4	2,2451	0,2641
		Promedio	0.3663
		Desviación estándar	0.0676

En general los tratamientos elaborados con zeolita procesada mediante impregnación química convencional en chip (ICC) y en polvo (ICP) presentaron mayores valores de biomasa fresca respecto al testigo T4. El tratamiento T1P (95/5) registró el valor más alto

de peso fresco (3.5458 g) y también uno de los mayores valores de peso seco (0.4639 g), indicando una mayor acumulación de materia estructural.

Por el contrario, los tratamientos con menor proporción de zeolita natural y mayor porcentaje de NH_4 -clinoptilolita (T3P y T3C) mostraron reducciones en el rendimiento, lo cual podría relacionarse con una mayor liberación de amonio o cambios en la conductividad eléctrica del sustrato, afectando la fisiología de plántula.

El tratamiento testigo T4, presentó uno de los valores más bajos de peso fresco y seco (2.2451 y 0.2641 g respectivamente). Este comportamiento sugiere que la incorporación de NH_4 -clinoptilolita mejora la disponibilidad inicial del nitrógeno intercambiable, favoreciendo así la formación de biomasa durante las primeras etapas de crecimiento del *Capsicum annuum* L.

El aumento de biomasa en tratamientos amonificados coincide con reportes recientes que demuestran que la clinoptilolita cargada con amonio actúa como reservorio de N, liberándolo de forma gradual y evitando pérdidas por lixiviación (Rahmani et al, 2023).

4.3 Análisis de estadístico de los datos

4.3.1 Desempeño de las plántulas en altura.

Los tratamientos evaluados correspondieron a mezclas de zeolita natural con zeolita NH_4 -clinoptilolita obtenida por tres métodos de impregnación:

- a) ECC, impregnación asistida con microondas en forma de chip (T1E 95/5 y T2E 85/15);
- b) ICC, impregnación convencional con secado en chip (T1C 95/5, T2C 85/15 y T3C 75/25); y
- c) ICP, impregnación convencional en polvo (T1P 95/5, T2P 85/15 y T3P 75/25).
- d) El tratamiento T4 correspondió al sustrato con zeolita natural al 100%.

En las primeras evaluaciones (4, 6 y 8 de agosto) no se detectaron diferencias significativas en la altura de plántula entre tratamientos (ANOVA, $p > 0.05$; Figura 11), lo que indica que el efecto de la zeolita amonio clinoptilolita sobre el crecimiento inicial fue discreto. A partir del 10 de agosto, el análisis de varianza mostró diferencias altamente

significativas entre tratamientos ($p < 0.0001$), las cuales se mantuvieron en las mediciones posteriores.

En las fechas intermedias (10-15 de agosto) los tratamientos con ICP (T1P, T2P y T3P) y con ICC al 15- 25% de NH_4 -clinoptilolita (T2C y T3C) tendieron a presentar las mayores alturas, mientras que el testigo T4 y el tratamiento ECC al 5% mostraron los valores más bajos. Al final del experimento (21 y 23 de agosto), las plántulas de los tratamientos T2P (ICP 85/15) y T3P (ICP 75/25) registraron las mayores alturas, estadísticamente superiores al testigo de zeolita natural, de acuerdo con las letras de comparación de medias (Figura 11).

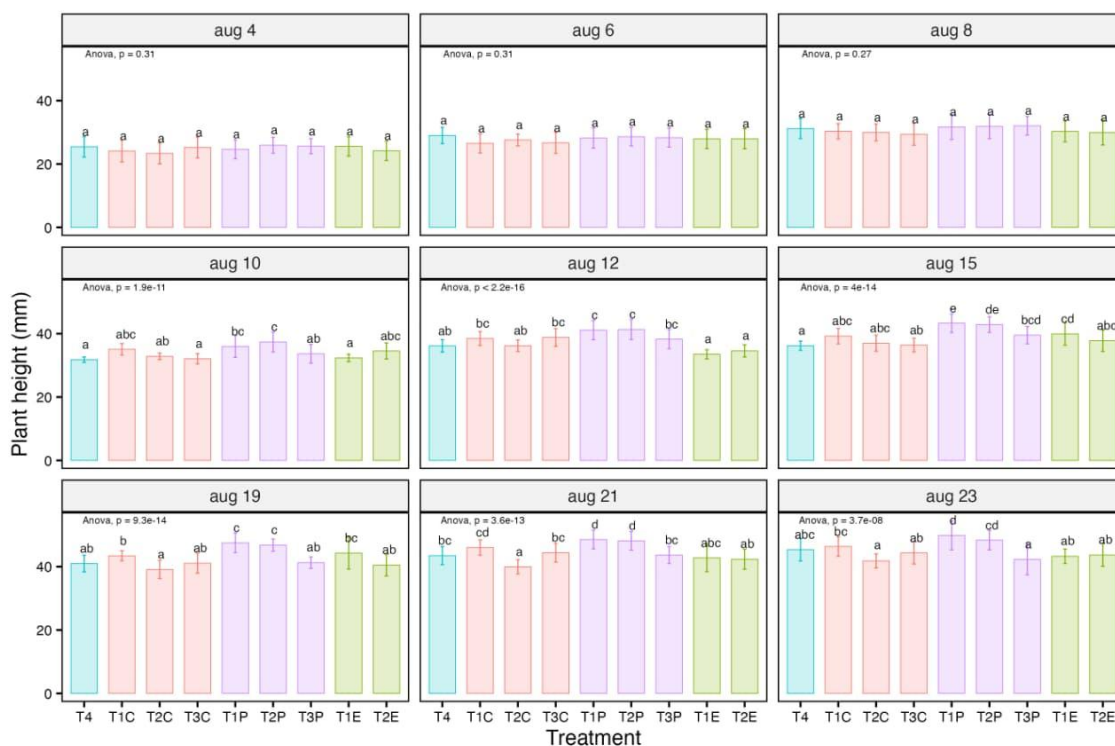


Figura 11 Análisis de los tratamientos respecto a altura

Estos resultados indican que la forma en polvo de la zeolita amonio-clinoptilolita y los porcentajes intermedios-altos (15-25%) favorecieron el crecimiento en altura de las plántulas, probablemente por una mayor superficie específica y un intercambio más eficiente de NH_4^+ con la solución del sustrato (ANEXO D). Estudios recientes señalan sobre el uso agrícola de zeolitas señalan que estos materiales incrementan la retención de agua y nutrientes, mejorando el desarrollo inicial de los cultivos (Mondal et al, 2021).

4.3.2 Número de hojas verdaderas.

El numero promedio de hojas verdaderas mostró diferencias significativas desde la primera fecha de evaluación (10 de agosto; $p < 0.0001$; Figura 12). En esa fecha, los tratamientos como ICC (T1C,T2C y T3C) y ECC al 15% (T2E) presentaron entre una y dos hojas más por plántula que el testigo T4, lo que cual refleja una respuesta temprana del aparato foliar a la disponibilidad del nitrógeno intercambiable en el sustrato.

En las fechas posteriores, el patrón se hizo más evidente: hacia el 21 y 23 de agosto, los tratamientos ICP, T1P, T2P y T3P concentraron las mayores medias de hojas por planta, mientras que T4 y T1E se mantuvieron entre los valores más bajos (Figura 12). Aunque las diferencias absolutas en número de hojas son moderadas, la tendencia coincide con la observada en altura: los tratamientos con zeolita amonio –clinoptilolita, especialmente en polvo, promovieron un aparato foliar más desarrollado.

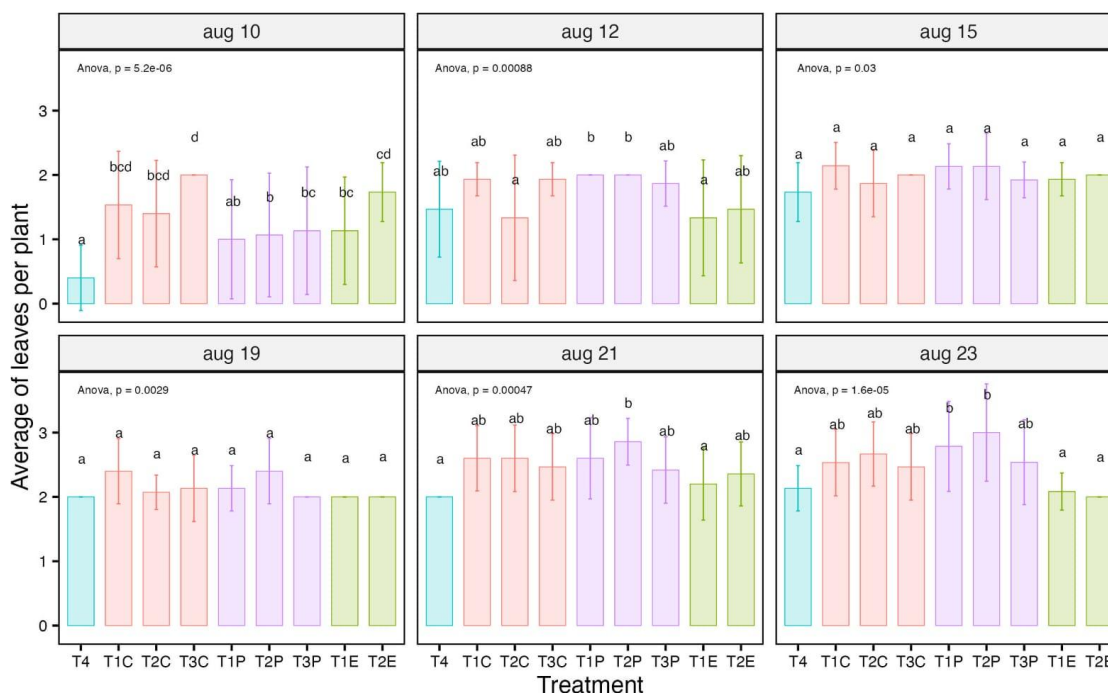


Figura 12 Comportamiento de los tratamientos con respecto al número de hojas verdaderas

Otros trabajos en hortalizas han reportado aumentos en números de hojas y biomasa aérea cuando se incorpora clinoptilolita enriquecida con nutrientes al sustrato de producción de

plántulas, atribuidos a una mejor disponibilidad de N y K y a la mejora de las propiedades físicas del medio de crecimiento (Castronuovo et al, 2023).

4.3.3 Diámetro de tallo.

El diámetro de tallo fue menos sensible que la altura, pero también mostró diferencias estadísticas en todas las fechas registradas ($p \leq 0.05$; Figura 13). En general, los tratamientos con zeolita procesada (ECC, ICC e ICP) presentaron diámetros de tallo iguales o superiores al testigo T4 a lo largo del experimento.

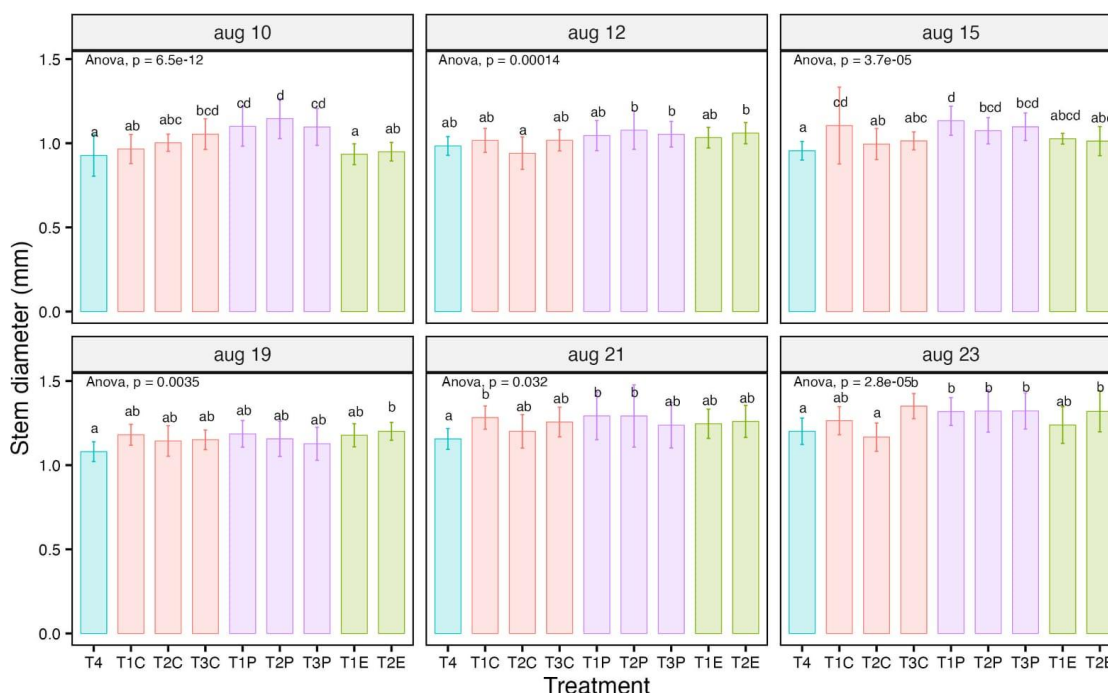


Figura 13 Comportamiento de los tratamientos con respecto al diámetro de tallo

En las últimas evaluaciones, los tratamientos T2P, T3P y T2E se ubicaron en el grupo de mayor diámetro, mientras que el testigo de zeolita natural y en algunas fechas, T1P mostraron los valores mínimos. Esto sugiere que, además de promover elongación y emisión de hojas, la NH_4 -clinoptilolita contribuyó a la formación de tallos más robustos, lo cual es deseable para reducir el acame y daños mecánicos durante el trasplante.

La literatura señala que las zeolitas pueden mejorar la estructura del sustrato, incrementando la porosidad y la retención de humedad, lo que favorece el desarrollo

radicular y, en consecuencia, un mayor diámetro de tallo en diferentes cultivos (Méndez et al, 2018).

4.3.4 Contenido de clorofila y área foliar.

El contenido total de clorofila ($g/g\ PF$) no presentó diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA, $p=0.75$; Figura 14). Todos los tratamientos se agruparon en la misma letra en la prueba de comparación de medias, indicando que la concentración de pigmentos por unidad de masa foliar fue similar en plántulas cultivadas con zeolita natural o con mezclas de NH_4 -clinoptilolita.

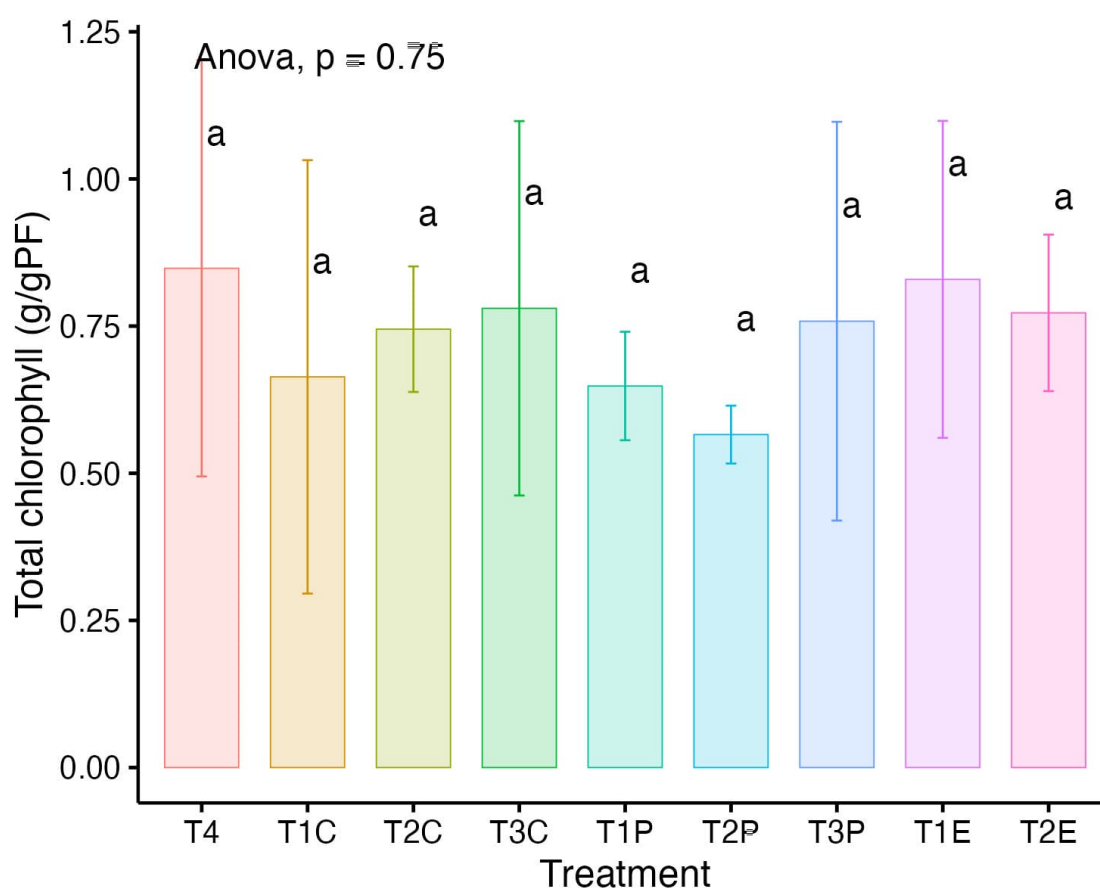


Figura 14 Comportamiento del contenido de clorofila en los tratamientos

Sin embargo, al analizar el área foliar total por planta, se observó un patrón distinto (Figura 15). Los tratamientos con zeolita NH_4 -clinoptilolita, particularmente T1C (ICC 95/5), T1P (ICP 95/5) y T2P (ICP 85/15), mostraron los valores más altos de área foliar, casi el doble que el testigo T4. Esto indica que, aunque la concentración de clorofila no cambió, la

superficie fotosintética efectiva sí aumentó en presencia de NH_4 -clinoptilolita, lo que concuerda con el mayor número de hojas registrado en esos tratamientos.

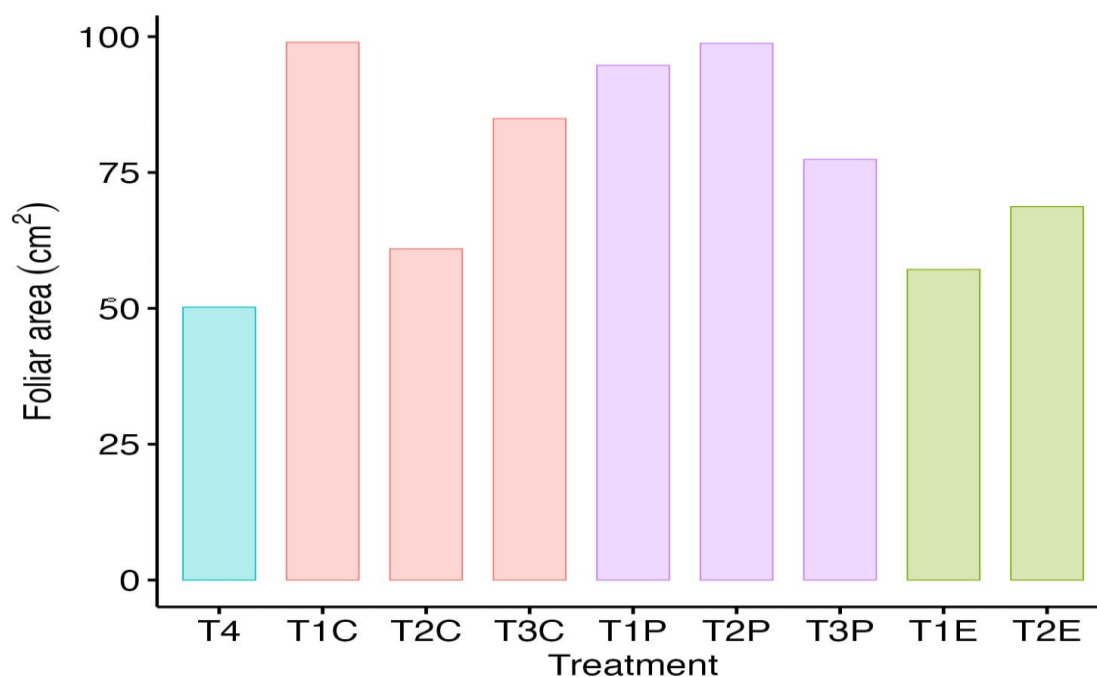


Figura 15 Comportamiento del área foliar en cada tratamiento

Resultados similares se han reportado en plántulas de pimiento y otros cultivos donde la adición de zeolita o zeolita cargada con nitrógeno incrementa el área foliar y la biomasa, mientras que los cambios en contenido de clorofila son menos consistentes (Castronuovo, 2023). Esto puede explicarse porque la clorofila responde no solo al N disponible, sino también a condiciones de luz y estado hídrico, que en este experimento se mantuvieron homogéneos entre tratamientos.

4.4 Análisis estructural y química para material vegetal

4.4 .1 Análisis del contenido de nitrógeno por el método de DUMAS.

El informe de laboratorio obtuvo un porcentaje de nitrógeno total (%N) para nueve muestras, correspondientes a cada uno de los tratamientos establecidos en el experimento. Los valores reportados se reportan en la Tabla 8.

Tabla 8 Contenido de porcentaje de nitrógeno obtenido por el método de DUMAS

Muestra	Tratamiento	%N
M1	T1E	3.59
M2	T2E	3.823
M3	T1P	3.529
M4	T2P	3.958
M5	T3P	4.032
M6	T1C	3.693
M7	T2C	4.108
M8	T3C	4.183
M9	T4	2.288

Los valores más altos se observaron en T2C (4.108%) y T3C (4.183%), mientras que el valor más bajo correspondió a T4 (2.288%), asociado al tratamiento con 100% de zeolita natural (T4).

Los tratamientos que incorporaron NH_4 -clinoptilolita presentaron concentraciones de nitrógeno consistentemente mayores que el control T4. Eso sugiere que:

- Liberación gradual de NH_4^+ desde la clinoptilolita cargada, actuando como un reservorio de amonio.
- Menor lixiviación de N, gracias a la capacidad de intercambio catiónico de la zeolita.
- Mayor disponibilidad del nutriente para la planta durante el periodo de crecimiento.

Las muestras con mayor porcentaje de NH_4 -clinoptilolita (15-25%) presentan los valores más altos de N (T2C y T3C), lo cual coincide con la hipótesis de que el incremento en la cantidad de zeolita procesada mejora la provisión de nitrógeno.

El valor observado en T4 (2.288%N) fue marcadamente inferior. Esto es congruente con el hecho de que la zeolita natural no modificada no contiene NH_4^+ adsorbido, por lo tanto,

no aporta nitrógeno adicional más allá del que la planta obtiene del sustrato o agua de riego.

Al comparar estos resultados con los datos de altura, número de hojas y diámetro de tallo: Los tratamientos T1P, T2P y T3P, que en los gráficos presentan mayor altura o área foliar, también coinciden con muestras que mostraron mayores valores de %N (M5 –M8). Esto respalda que la disponibilidad de nitrógeno influyó positivamente en el crecimiento vegetativo de las plántulas. En contraste con el control de zeolita natural que mostró valores de crecimiento y también el menor contenido de N.

4.4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y la Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).

Se obtuvo la micromorfología y la composición elemental del tejido vegetal seco del tratamiento (T1P) (Zeolita en Polvo Impregnada, 5%), las imágenes SEM (a 5000x , Figura 16) confirmaron la integridad morfológica de las células vegetales secas.

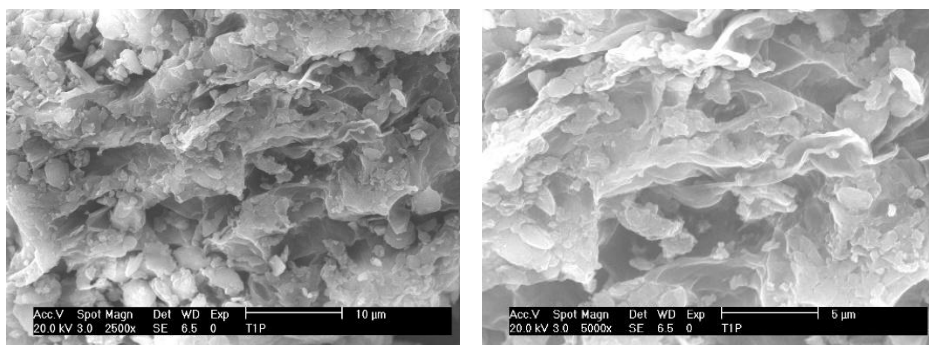


Figura 16 Imágenes SEM a 2500X y 5000X, respectivamente

El análisis EDS se realizó en dos modos distintos para diferenciar la absorción de nutrientes de la contaminación: Análisis puntual (tejido vegetal) y análisis de barrido (material externo).

Análisis Puntual (Tejido Vegetal) enfocado en áreas limpias, este análisis confirmó la asimilación exitosa de nutrientes esenciales. Los hallazgos clave incluyeron altas concentraciones de Nitrógeno (N, 11.79 %) y Potasio (K, 11.04 %) como se observa en la Figura 17. Este valor sustancial de N valida la eficacia de liberación lenta de la zeolita

NH_4 -clinoptilolita al proporcionar N sostenido para los compuestos estructurales. Los niveles mínimos de Si y Al confirmaron que la medición se dirigió al tejido vegetal, excluyendo el material de zeolita a granel.

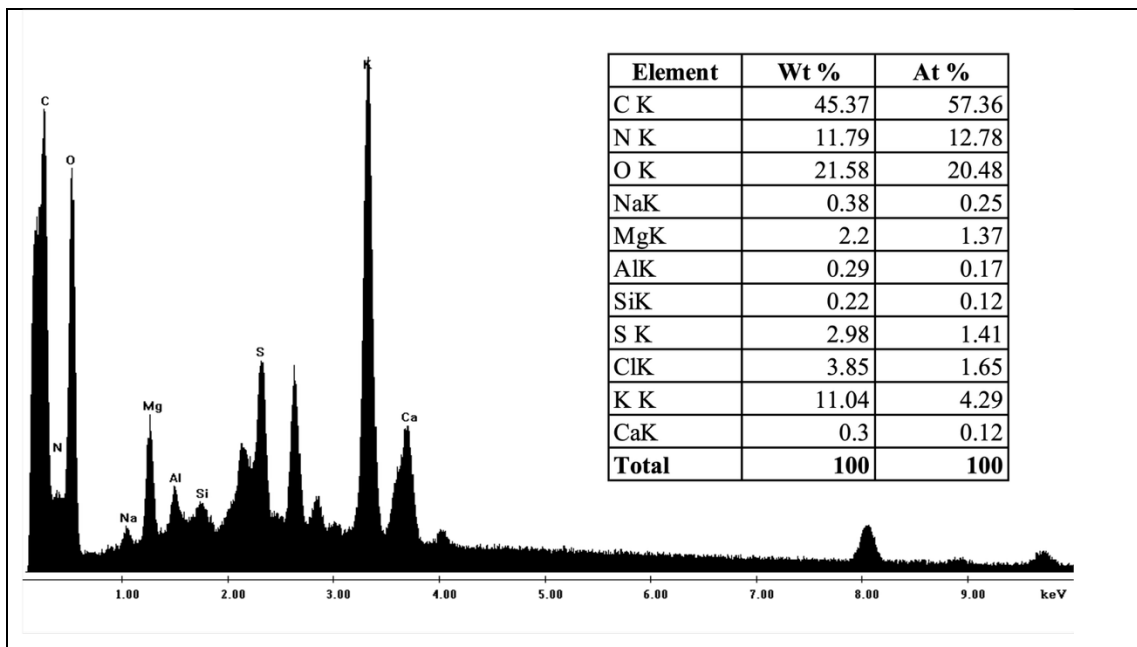


Figura 17 Patrones EDX y tabla de los elementos de análisis puntual del material vegetal correspondiente al tratamiento TIP

El análisis de Barrido (Figura 18) mostró un perfil dominado por metales pesados, incluyendo Hierro (Fe, 35.07 %), Níquel (Ni, 24.73 %) y Cobalto (Co, 11.25 %). Esta composición se atribuye a contaminación del sustrato o a partículas ricas en metales adheridas a la superficie (Figura 18).

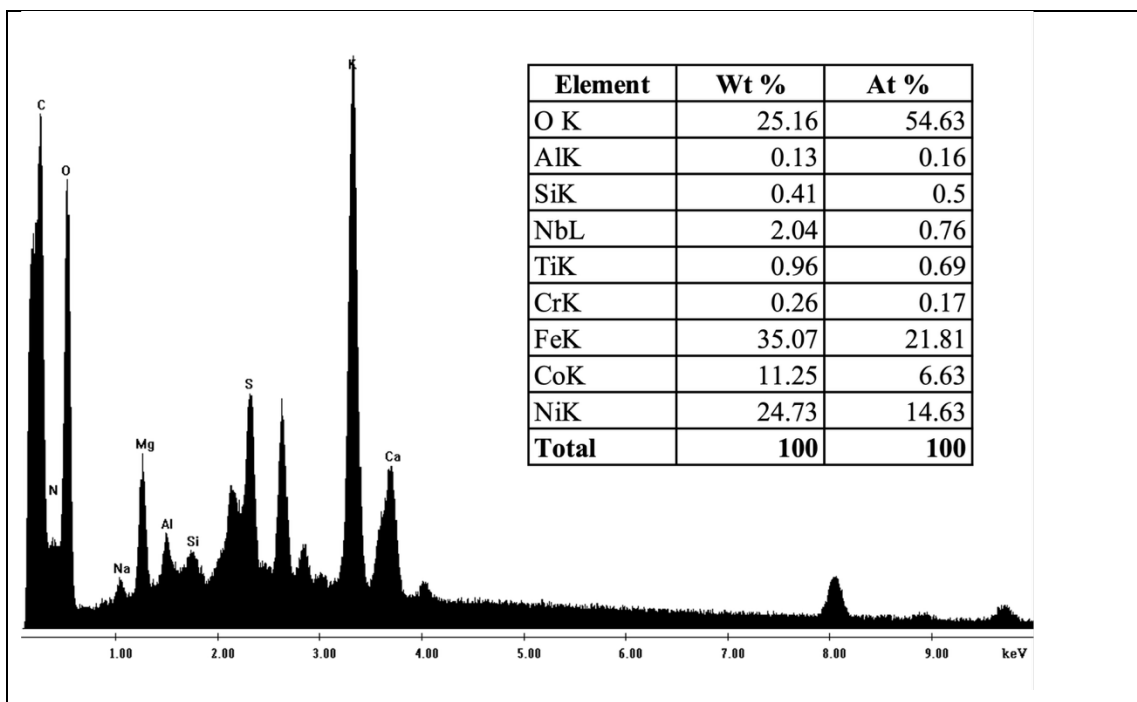


Figura 18 Patrones EDX y tabla de los elementos de análisis de microárea del material vegetal correspondiente al tratamiento T1P

La comparación resalta el poder analítico del EDS: el Análisis Puntual aisló la señal biológica genuina de la alta absorción de N y K, mientras que el Análisis de Barrido identificó la contaminación externa, confirmando que la planta absorbió selectivamente los nutrientes a pesar de la presencia de metales pesados.

Análisis Estructural y Químico del NH_4 -clinoptilolita-Impregnada en Polvo (T1P). Las imágenes de SEM confirmaron la micro-morfología del polvo T1P como las partículas de forma irregular con agrupaciones agregadas. Esta estructura, lograda mediante molienda, aumentó drásticamente la superficie externa, un factor clave que hizo a los iones NH_4^+ altamente accesibles para una liberación lenta y eficiente.

El Análisis Puntual de EDS confirmó la composición química elemental de la clinoptilolita, detectando O (el más alto, 50% en peso), Si (alto, 30-40% en peso) y Al (moderado, 5-10% en peso). Crucialmente, la presencia detectable de Nitrógeno en el análisis puntual confirmó la carga exitosa de iones NH_4^+ . La combinación de esta carga química verificada (señal de N) con la alta superficie externa del polvo actuó como el impulsor de la eficiencia, asegurando que los iones NH_4^+ fueran fácilmente accesibles para

las raíces de la planta. Por lo tanto, el análisis de SEM y EDS del Polvo NH_4^+ T1P proporcionó la base estructural y química para su rendimiento superior, que resultó en la duplicación del área foliar del pimiento a 100 cm^2 .

4.5 Análisis integral

La comparación entre el Análisis de Combustión Dumas (medida global) y el Análisis Puntual de EDS (medida localizada) aclaró la distinción crítica entre la carga química total y la confirmación elemental. El análisis Dumas estableció la referencia cuantitativa para la reserva total de nitrógeno del fertilizante: 3.529 wt% de N. Esta carga total de N fue suficiente para impulsar el rendimiento biológico superior del polvo, llevando a una duplicación del área foliar a 100 cm^2 . Por el contrario, aunque el EDS confirmó la presencia cualitativa de N en la superficie (junto a los elementos principales), no pudo cuantificar con precisión el valor de 0.34 wt% debido a su menor fiabilidad para concentraciones bajas de elementos ligeros. De esta forma, la comparación destaca que el contenido de 3.529 wt% (Dumas) es la verdadera reserva, y la efectividad del T1P radica en que su forma de polvo maximiza la accesibilidad de esta reserva limitada a las raíces.

En resumen, los tratamientos con NH_4 -clinoptilolita en forma de Polvo Impregnado (T1P y T2P) demuestran ser la mejor alternativa para la fertilización de liberación lenta en plántulas de pimiento. Estos tratamientos lograron una máxima eficiencia biológica al optimizar la morfología de la partícula (polvo, confirmado por SEM) para garantizar la máxima accesibilidad a su reserva de nitrógeno de 3.529 wt% (confirmado por Dumas), lo que resultó en un desarrollo vegetativo superior y una ventaja significativa en el área foliar y la altura.

Las imágenes de SEM (Figura 16) confirmaron la micro-morfología del polvo T1P como las partículas de forma irregular con agrupaciones agregadas. Esta estructura, lograda mediante molienda, aumentó drásticamente la superficie externa, un factor clave que hizo a los iones NH_4^+ altamente accesibles para una liberación lenta y eficiente.

El Análisis Puntual de EDS confirmó la composición química elemental de la clinoptilolita, detectando O (el más alto, 50% en peso), Si (alto, 30-40% en peso) y Al (moderado, 5-10% en peso). Crucialmente, la presencia detectable de Nitrógeno en el análisis puntual confirmó la carga exitosa de iones NH_4^+ . La combinación de esta carga

química verificada (señal de N) con la alta superficie externa del polvo actuó como el impulsor de la eficiencia, asegurando que los iones NH_4^+ fueran fácilmente accesibles para las raíces de la planta. Por lo tanto, el análisis de SEM y EDS del Polvo NH_4^+ T1P proporcionó la base estructural y química para su rendimiento superior, que resultó en la duplicación del área foliar del pimiento a 100 cm^2 .

La comparación entre el Análisis de Combustión Dumas (medida global) y el Análisis Puntual de EDS (medida localizada) aclaró la distinción crítica entre la carga química total y la confirmación elemental. El análisis Dumas estableció la referencia cuantitativa para la reserva total de nitrógeno del fertilizante: 3.529 wt% de N. Esta carga total de N fue suficiente para impulsar el rendimiento biológico superior del polvo, llevando a una duplicación del área foliar a 100 cm^2 . Por el contrario, aunque el EDS confirmó la presencia cualitativa de N en la superficie (junto a los elementos principales), no pudo cuantificar con precisión el valor de 0.34 wt% debido a su menor fiabilidad para concentraciones bajas de elementos ligeros. De esta forma, la comparación destaca que el contenido de 3.529 wt% (Dumas) es la verdadera reserva, y la efectividad del T1P radica en que su forma de polvo maximiza la accesibilidad de esta reserva limitada a las raíces.

CONCLUSIÓN

El estudio demuestra que la zeolita NH_4 -clinoptilolita es una alternativa de fertilización efectiva para *Capsicum annuum* L. destacando que su forma física influye de manera determinante en el desempeño. Los tratamientos incrementaron significativamente el N total (54-73%) y favorecieron un mayor crecimiento estructural, reflejado en la duplicación del área foliar y tallos más gruesos. Aunque no hubo diferencias en clorofila total, el exceso de N se destinó a biomasa estructural, optimizando la capacidad fotosintética. La forma de polvo impregnado (ICP) en bajas concentraciones (5-15%) mostró el mejor desempeño debido a su alta superficie y liberación sostenida de N, mientras que el Chip impregnado (ICC) presentó limitaciones por impedancia física radicular en conjunto, la zeolita ICP se posiciona como una opción eficiente para optimizar el suministro de N y promover el desarrollo vegetativo en plántulas de *Capsicum annuum* L.

Recomendaciones para futuros proyectos

1. Extender el tiempo de evaluación. Los efectos de liberación prolongada del NH_4^+ usualmente se reflejan con mayor claridad después de 45-60 días. Se recomienda evaluar el ciclo completo vegetativo hasta floración.
2. Cuantificar la liberación de amonio en el tiempo. Implementar mediciones seriadas en el sustrato, permitirá correlacionar directamente la disponibilidad de N con el crecimiento.
3. Evaluar otros cultivos hortícolas. Para validar la aplicación general del material zeolítico amonizado en sistemas de producción diversificados.
4. Comparar contra una fuente sintética de nitrógeno. Para cuantificar el potencial de sustitución real de fertilizantes convencionales.
5. Estudiar el efecto de proporciones más amplias de zeolitas (30-50%). Esto podría maximizar su capacidad de intercambio catiónico y mejorar aún más la liberación gradual del N.

REFERENCIAS

- Agua para la prosperidad y la paz Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024, 2024.
- Aloé, J., & Toribio, M. (2008). Pérdidas por volatilización del amoníaco. Engormix. Recuperado de https://www.engormix.com/agricultura/fertilizacion-maiz/perdidas-volatilizacion-amoniacos_a27589/
- Análisis de tamaño de partículas con difracción de láser. (2020). Malvernpanalytical.com. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>
- Análisis EDS | Espectroscopia de energía dispersiva | Thermo Fisher Scientific - MX. (2025). Thermofisher.com. <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/materials-science/eds-technology.html>
- Ateş, A., & Hardacre, C. (2012). The effect of various treatment conditions on natural zeolites: ion exchange, acidic, thermal and steam treatments. Journal of colloid and interface science, 372 1, 130-40 .
- Bijay-Singh, & Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. SN Applied Sciences. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- Bonilla, Carlos. (2022). Fundamentos de la contaminación de aguas subterráneas. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/384868055_FUNDAMENTOS_DE_LA_CONTAMINACION_DE_AGUAS_SUBTERRANEAS#pf2c
- Bruker. (s.f.). How does XRF work? Bruker Corporation. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/elemental-analyzers/xrf-spectrometers/how-does-xrf-work.html>
- C. Gerhardt GmbH & Co. KG. (s.f.). El método Dumas para la determinación de nitrógeno y proteínas. Recuperado el 3 de abril de 2025, de <https://www.gerhardt.de/es/know-how/metodos-analiticos/el-metodo-dumas/>

- Calvo García, S. (2011). Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno. Universidad de Salamanca. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/>
- Caretta et all. (2023). Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 551 – 712. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>[Opens in a new window]
- Castronuovo et all. (2023). Effects of Zeolite and Deficit Irrigation on Sweet Pepper Growth. Horticulturae, 9(11), 1230. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111230>
- Cataldo, et all. (2021). Application of Zeolites in Agriculture and Other Potential Uses: A Review. Agronomy, 11(8), 1547. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081547>
- Cisternas Fierro, A. (2024). Eficacia e implicancias fisiológicas de la aplicación de amonio con un inhibidor de la nitrificación de origen natural en el desarrollo de la vid. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200585>
- Daraio, M.Y., Melaj, M.A., Daraio, M.E., (2012). Matrices poliméricas sólidas basadas en quitosano y xantano para liberación controlada de fertilizantes solid polymeric matrix based on chitosan and xanthan for controlled release of fertilizers. ACI 3, 1–9. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627685001.pdf>
- de, C. (2004, October). ciclo biogeoquímico. Wikipedia.org; Wikimedia Foundation, Inc. https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_del_nitr%C3%B3geno
- Del Campo, N.(2004). Aplicaciones de Zeolitas en la descontaminación del medio ambiente. MINERA FORMAS. Recuperado de https://www.mineraformas.cl/docs/zeolitas_medio_ambiente.pdf.
- Dietrich, J. (2023). Hidrogeles de origen natural para remoción de amonio de aguas residuales Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales. Retrieved March 18, 2025, from <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/784/JDietrich-TFG-IM-2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gamboa Rodas, Y. O., & Rojas Campuzano, L. E. (2024). Desarrollo de fertilizantes de liberación lenta basados en zeolitas para mejorar la eficiencia agronómica [Proyecto integrador, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Digital ESPOL.

- González Camarillo, M., Gómez Montiel, N. O., Muñiz Espíritu, J., Valencia Espinosa, F., Gutiérrez Guillermo, D., & Figueroa López, H. O. (2012). Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizantes en el estado de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(6), 1129-1144. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n6/v3n6a6.pdf>
- Heredia, I., & Daiana, Y. (2023). Evaluación de compost como sustituto de insumos utilizados en la agricultura intensiva para la producción hortícola y florícola (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias).
- Hernández, M.A., Rojas, F., Lara, V.H., Portillo, R., Pérez, G., Salas, R., (2010). Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/942/94248264011.pdf>
- Hétier, J.-M., López-Hernández, D., 2015. Aspectos biogeoquímicos de los ciclos de nutrientes en agro-ecosistemas.
- Horiba LA-950 Laser Particle Size Analyzer. (2025, January 15). The Lab World Group. <https://www.thelabworldgroup.com/product/horiba-particle-size-analyzer/>
- IAUSA. <https://iausa.com.mx/pages/productos/>
- ICL. (2025). Nutrición precisa con fertilizantes de liberación controlada. https://iclsf.com/uploads/IBERIA/General_Downloads/Spec%20Ag/CATALOGUES/Catalogo_Generico_Agromaster_2018.pdf
- Khamkure, S., Reyes, A., Zermeño, A., Samaniego, L., Gamero, P. (2025). A sustainable approach to fertilizer management: Microwave-assisted synthesis of slow-release ammonium-natural clinoptilolite. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. Volume 45.2025. 102004 .ISSN 2352-5541. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.102004>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352554125001020>
- Marrero, C., Jorge, V. R., & Bobadilla, M. (2019). Optimización de la remoción simultánea de nitrato, nitrito, amonio y fosfato de aguas residuales municipales. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 85(1), 85–96. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2019000100009&script=sci_arttext&tlng=en

- Martínez-Nevárez, Laura Elena, Prieto-Ruiz, José Ángel, Sigala-Rodríguez, José Ángel, García-Rodríguez, José Leonardo, Martínez-Reyes, Magdalena, Carrillo-Parra, Artemio, & Domínguez-Calleros, Pedro Antonio. (2023). Crecimiento y Eficiencia en el Uso de Nutrientes de Plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco Producidas en Vivero con un Fertilizante de Liberación Controlada. *Terra Latinoamericana*, 41, e1707. Epub 16 de febrero de 2024. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1707>
- Méndez Argüello, B., Vera Reyes, I., Cárdenas Flores, A., Santos Villarreal, G. De los, Ibarra Jiménez, L., & Lira Saldivar, R.H. (2018). Water holding capacity of substrates containing zeolite and its effect on growth, biomass production and chlorophyll content of *Solanum lycopersicum* Mill. *Nova scientia*, 10(21), 45-60. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1413>
- Méndez-Argüello, B., & Lira-Saldivar, R. H. (2019). Uso potencial de la zeolita en la agricultura sustentable de la nueva revolución verde. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 6(17), 191-193.
- Miranda-Rojas, J. A., Pedroza-Sandoval, A., Gramillo-Ávila, I., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I., & Yáñez-Chávez, L. G. (2025). Algae Extracts and Zeolite Modulate Plant Growth and Enhance the Yield of Tomato *Solanum lycopersicum* L. Under Suboptimum and Deficient Soil Water Content. *Horticulturae*, 11(8), 902. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11080902>
- Mondal, M., Biswas, B., Garai, S., Sarkar, S., Banerjee, H., Brahmachari, K., Bandyopadhyay, P. K., Maitra, S., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., & Hossain, A. (2021). Zeolites Enhance Soil Health, Crop Productivity and Environmental Safety. *Agronomy*, 11(3), 448. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030448>
- Morales-Arredondo, Ivan, Flores-Ocampo, Itzamna Zaknite, Armienta, María Aurora, Morán-Ramírez, Janete, Hernández-Hernández, Mario Alberto, & Landa-Arreguin, Jorge Federico. (2020). Identificación de las fuentes de nitratos mediante métodos hidrogeoquímicos e isotópicos en el agua subterránea del Bajío Guanajuatense. *Geofísica internacional*, 59(3), 169-194. Epub 22 de diciembre de 2020. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2020.59.3.2093>

- Muttashar, H. L. et al. (2018). Microstructures and physical properties of waste garnets as a promising construction material. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.12.001>
- Nitrificación | AEFA - Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes. (2017). Aefa-Agronutrientes.org. <https://aefa-agronutrientes.org/nitrificacion>
- Nitrificación: proceso clave del nitrógeno en el suelo. (2025). Basf.es. https://www.agro.basf.es/es/Camposcopio/Secciones/Protecci%C3%B3n-y-sanidad/Nitrificaci%C3%B3n-proceso/?utm_source=chatgpt.com
- NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
- Purwono, P., Hadiyanto, H., Budihardjo, M. (2013). Equilibrium of Ammonia (NH_3) and Ammonium (NH_4^+) during Microalgae Harvesting using Electrocoagulation. *VL - 36. DO - 10.5829/IJE.2023.36.03C.17. International Journal of Engineering*
- Rahmani R., Khalesro S., Heidari G and Monkhatssi – Bidgoli A (2023) Vermicompost and zeolite improve yield, nutrient uptake, essential and fixed oil production, and composition of *Nigella sativa* L.. *Front. Sustain. Food Syst.* 7:1214691. Doi 10.3389/fsufs.2023.1214691
- Ramos, R. L., Castillo, M. A. S., Sánchez, M. V. H., & Coronado, R. M. G. (2001). Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 17(3), 129-136. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37017302.pdf>
- Renau Piqueras, J., & Faura, M. (1994). Principios básicos del microscopio electrónico de barrido. En J. Méndez, A. M. Rodríguez Torres, & M. E. Cerdán (Eds.), *Técnicas de microscopía, micromanipulación y análisis de imagen. II Reunión científica en biología celular y molecular* (pp. 73-92). Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións. Recuperado de <https://studylib.es/doc/6434109/principios-básicos-del-microscopio-electrónico-de-barrido>
- Reyes-Rosas, A.; Lara-Viveros, F.; Laureano-Ricardo, J.; Gamero-Melo, P.; Zermeño-González, A.; Khamkure, S. Effect of ammonium-clinoptilolite zeolite as a slow-release fertilizer on

the growth of bell pepper seedlings (*Capsicum annuum* L.), in Proceedings of the 4th International Electronic Conference on Agronomy, 2–5 December 2024, MDPI: Basel, Switzerland, doi: [Sciforum : Event management platform](#)

Rimski-Korsakov, H., & Lavado, R. (n.d.). Uso de fertilizantes y abonos en agroecosistemas. Retrieved March 14, 2025, from <https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/248687/agroecosistemas-318-345.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Ríos, José-Nicolas.(2025) Remoción de amonio y de metales pesados de los lixiviados del relleno sanitario “la esmeralda” de la ciudad de manizales por electr ocoagulación. Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales Facultad De Ingeniería Y Arquitectura Departamento De Ingenieria Ingenieria Química.Recuperado el 18 de marzo, 2025, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2837/josenicolasrioscardona.2005.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

RISSO-CHEMICAL. GLOBAL-ORIENTED FERTILIZERS SUPPLIER. <https://es.risso-chemical.com/>

Rojas Mego, K. C., & Bonomelli de Pinaga, C. M. (2024). Efecto de la forma (NH_4^+ o NO_3^-) y momento de aplicación de fertilizantes nitrogenados en el establecimiento de arándano *Vaccinium corymbosum* L. en macetas en el Sur de Chile [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio UC

Romero, L., Espinosa, H., Ángel, M., Argueta, B., Román, C., Guerrero, M., Antonio, M., Roberto, R., & Fernando, R. (2010). Propiedades fisicoquímicas de la clinoptilolita tratada con fertilizantes a usar como aditivo en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Recuperado en marzo de 2025, de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n3/v28n3a7.pdf>

Romero, M. (2020). El proceso de Eutrofización: otra de las múltiples caras de la contaminación. MoleQla: Revista de Ciencias de La Universidad Pablo de Olavide, 36, 33-36. Recuperado de <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero36/Numero-36.pdf>

Sistema Nacional de Información del Agua. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=salud>

- Tiquia S.m., Tam N.F.Y. 2000. Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environment Pollution*. 110:535-541
- UNESCO. (2024). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz. UNESCO. Recuperado de <https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/documentos-internacionales/15-informe-mundial-2024-agua-para-la-paz-y-la-prosperidad.pdf>
- Van der Stelt B., Temminghoff E.J.M., Van Vliet P.C.J., Van Riemsdijk W.H. 2007. Volatilization of ammonia from manure as affected by manure additives, temperature and mixing. *Bioresource Technology*. 98:3449-3455
- Van Hooff, J. H. C., & Roelofsen, J. W. (1991). Chapter 7 Techniques of Zeolite Characterization. *Introduction to Zeolite Science and Practice*, 241– 283. doi:10.1016/s0167-2991(08)63605-8
- VELP Scientifica Srl. (2020, February 4). Análisis elemental, método Dumas. Velp.com; VELP Scientifica Srl. <https://www.velp.com/es-sa/analisis-elemental-metodo-dumas-1.aspx>
- Vista de Difracción de rayos X: un mundo de aplicaciones por descubrir. (2025). Ucentral.edu.co. <https://revistas.ucentral.edu.co/index.php/Ingeciencia/article/view/2685/2655>
- Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H. and Tilman, D.G. (1997), HUMAN ALTERATION OF THE GLOBAL NITROGEN CYCLE: SOURCES AND CONSEQUENCES. *Ecological Applications*, 7: 737-750. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2)
- Widiastuti, N., Hongwei, W., Ming, A., & Zhang, D.-k. (2008). The potential application of natural zeolite for greywater treatment. *Desalination*, 271–280.

ANEXOS.

Los anexos que se presentan a continuación contienen la caracterización completa de los materiales ECC, ICC e ICP en su estado inicial, es decir, antes de su aplicación como sustrato en las pruebas experimentales. Estas caracterizaciones incluyen análisis morfológicos, estructurales, químicos texturales y granulométricos, obtenidos mediante técnicas como SEM, XRD, EDX y BET y forman parte del artículo científico elaborado por Khamkure, S. et al. (2025). Dichas imágenes y resultados se reproducen en los anexos A- D con permiso de la autora, se incluyen con fines académicos, ya que constituyen la caracterización base del material empleado en el presente estudio y con el propósito de complementar la comprensión de las propiedades físico- químicas de los materiales utilizados en esta investigación.

Cada anexo presenta la técnica correspondiente y la información necesaria para comprender las propiedades iniciales del material antes de su adaptación como sustrato experimental.

ANEXO I. Micrografías de los materiales ECC, ICC e ICP

En este anexo se presentan las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) correspondientes a los materiales ECC, ICC e ICP previos a su aplicación como sustrato. Estas imágenes permiten observar la morfología superficial, presencia de poros y efectos derivados de los diferentes métodos de impregnación.

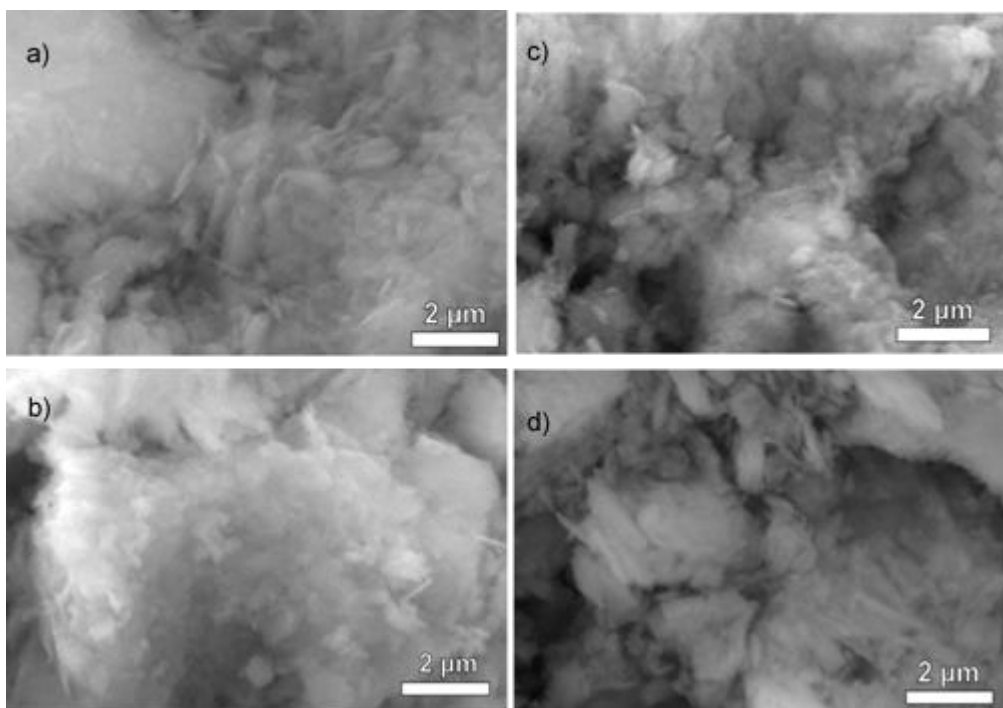


Figura 19 Micrografía SEM de los materiales a)ECC, b)ICC, c)ICP y d)Zeolita natural antes de su aplicación como sustrato

ANEXO II. Difracción de rayos X (XRD) de los materiales ECC, ICC, e ICP

Este anexo presenta los difractogramas obtenidos mediante XRD para identificar las fases cristalinas presentes en los materiales ECC, ICC e ICP en su estado inicial. Este análisis permite caracterizar su composición mineral y posibles cambios estructurales generados por cada tratamiento.

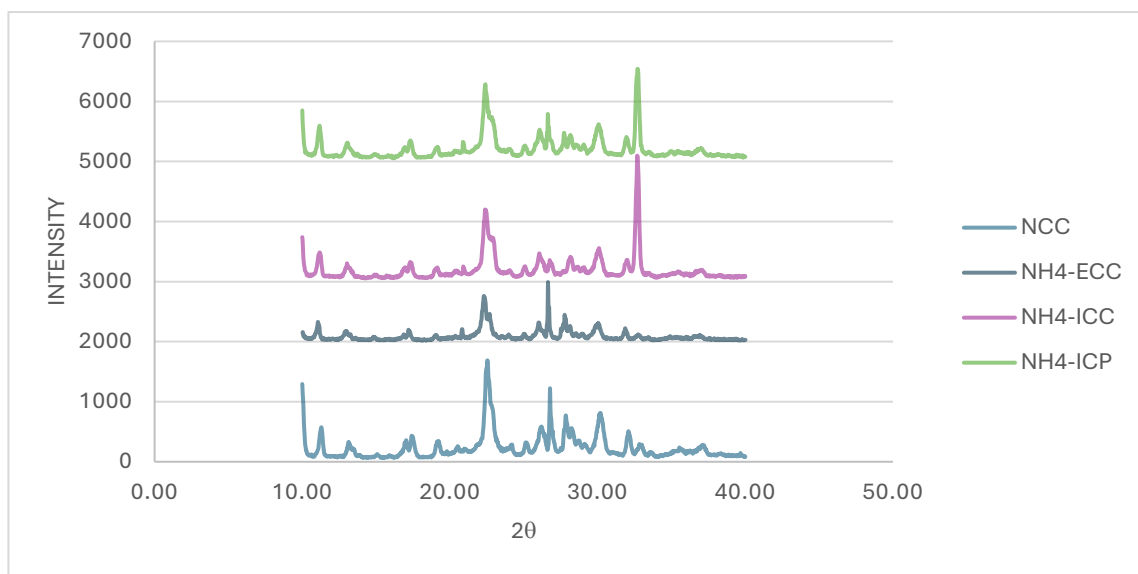


Figura 20 Difractograma de los materiales ECC, ICC, ICP y NCC (zeolita natural)

ANEXO III. Espectros EDX de los materiales ECC, ICC e ICP

La espectroscopía de energía dispersa (EDX) se empleó para determinar la composición elemental de los materiales antes de aplicación como sustrato. Este análisis permitió cuantificar la proporción de elementos y evaluar cambios en la composición superficial derivados del método de impregnación.

Tabla 9 Porcentaje en peso y átomos de los elementos detectados

Muestras	Composición química (%wt)										
	N	NH ₄ ⁺	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Cl
NCC	2.6	3.45	44.03	0.5	0.6	8.1	37.60	3.0	2.2	1.0	ND
	8			2	5	8		4	0	9	
NH4-ECC	4.7	6.04	45.91	0.1	0.2	8.8	37.79	1.1	0.2	1.1	0.38
	0			3	1	6		7	1	5	
NH4-ICC	3.2	4.13	38.46	0.2	0.4	7.6	32.94	2.7	2.0	1.2	11.00
	1			5	8	4		0	4	7	
NH4-ICP	3.2	4.13	39.38	0.3	0.5	7.3	33.32	2.6	1.9	1.1	10.10
	1			4	0	6		5	6	8	

ANEXO IV. Análisis BET del material ECC, ICC, e ICP

En este anexo se muestran los resultados del análisis BET para la determinación del área superficial específica, volumen de poro y diámetro promedio de poro en los materiales ECC, ICC e ICP. Los valores presentados corresponden al estado original del material, antes de su interacción con plántulas.

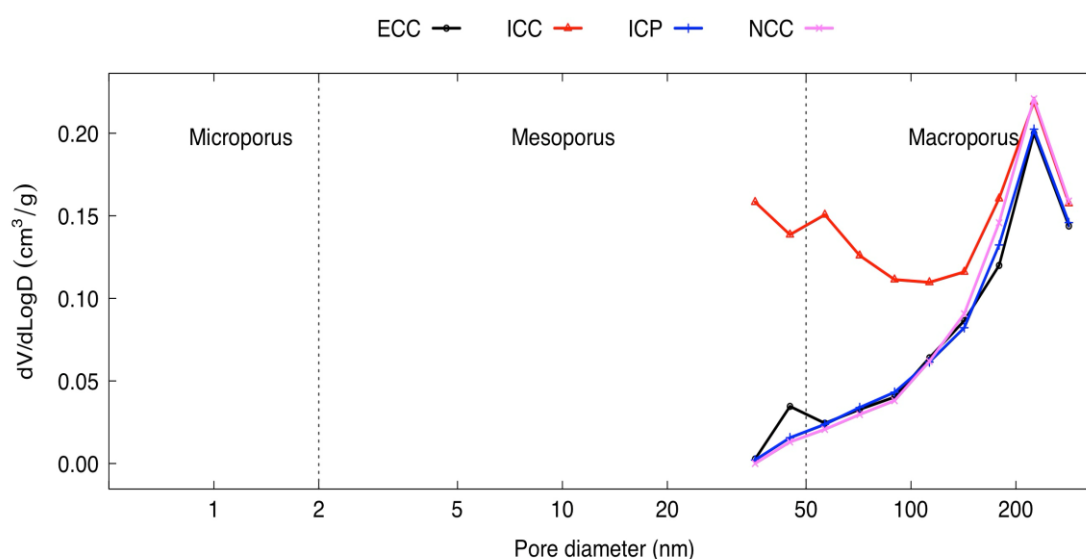


Figura 21 Isoterma de adsorción- desorción de los materiales ECC, ICC, ICP y NCC(zeolita natural)

Tabla 10 Parámetros BET y propiedades texturales del material ECC, ICC, ICP y NCC (zeolita natural)

Muestras	S_{BET} (m^2/g)	Volumen total del poro (cm^3/g)	Diámetro promedio del poro (nm)
NCC	20.20	0.15	59
NH4-ECC	194.50	0.24	34
NH4-ICC	88.79	0.22	35
NH4-ICP	22.58	0.16	29