

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Respuesta Fisiológica de Ejote (*Phaseolus vulgaris*), Espinaca (*Spinacea oleracea*) y Rábano (*Raphanus sativus*) Sembrados con Esquilmo de Ajo y Biochar en Condiciones Controladas

Por:

LUIS ÁNGEL LEMUS CHÁVEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Respuesta Fisiológica de Ejote (*Phaseolus vulgaris*), Espinaca (*Spinacea oleracea*) y Rábano (*Raphanus sativus*) Sembrados con Esquilmo de Ajo y Biochar en Condiciones Controladas

Por:

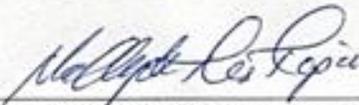
LUIS ÁNGEL LEMUS CHÁVEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



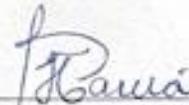
Dra. María Alejandra Torres Tapia

Asesor Principal



Dra. Ana Luisa Gómez Espejo

Coasesor



Dra. Hermila Trinidad García Osuna

Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2025.

Derechos de autor y 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 prestado los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo reproducción, edición o modificación, será 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 otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Luis Ángel Lemus Chávez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, que son lo más importante y valioso que tengo, siendo un ejemplo de vida, especialmente a mis padres, Ileana Chávez Palacios y José Lemus Acosta, quienes son mi base y mi impulso en este camino de la vida, que, con esfuerzo y dedicación, me han formado con buenos hábitos, valores y principios, también me han brindado todo su amor incondicional ante todas las cosas y son mi mayor ejemplo de vida.

Gracias por su amor, afecto, apoyo, tanto moral, emocional y económico, por estar presentes en cada momento de mi camino con su ejemplo, palabras de aliento, su sabiduría, y los sacrificios que han hecho por mí, gracias a todo esto, hemos llegado lejos y lo seguiremos haciendo, todo esto ha sido sin duda lo que me ha permitido llegar a culminar en esta etapa de mi vida como estudiante.

También quiero dedicarles este logro a mis hermanos, Omar, Everardo, Eloelia y Alejandro Lemus Chávez, quienes son un pilar fundamental en mi vida, brindándome su compañía, apoyo moral y emocional en todo momento, gracias a todos por estar siempre pendiente de mí, por amarme y por enseñarme todo lo que es estar bien en esta vida, dándome siempre su bendición y encomendándome a Dios cada paso que doy, este logro no es solo mío sino de ustedes también porque cada paso que doy está acompañado de todo lo que me han enseñado junto con mis padres, los amo.

De la misma forma a las personas que han llegado a esta familia, respetándola y queriéndonos a todos de alguna manera, Arely González, Ma. Del Rosario Rodríguez y Javier Dueñas, que del mismo modo han estado pendiente de mi camino, y más que nada por haberme regalado la dicha de ser tío con mis sobrinos a quienes amo con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este día, dándome experiencias, aprendizaje, sabiduría y salud para cada momento vivido, porque con fe y perseverancia he superado los obstáculos puestos en el camino, siendo Él quien con a través de mis padres me han llevado por el camino correcto ayudándome a aprender de mis errores y siempre siguiendo adelante.

A la vida, porque nunca terminamos de aprender lo bella que es, y que poco valoramos lo que pasa día a día, por permitir y enseñarnos que un día nuevo es una oportunidad de volver a empezar y seguir aprendiendo.

También a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi alma mater, que siempre la recordaré, respetaré y la tendré presente ya que me dio una casa de estudios y la oportunidad de desarrollarme como estudiante y profesional, ¡Una vez buitre, siempre buitre!, ¡Buitres por siempre!

A la Dra. María Alejandra Torres Tapia por haberme apoyado en este proyecto, por su tiempo, paciencia y dedicación, que fue clave para terminar este trabajo, gracias por la disposición, el conocimiento y las herramientas para llevarlo a cabo, siendo un ejemplo para mí como profesional, por su compromiso y pasión por enseñar, estoy muy agradecido por haber trabajado con usted y por todo el apoyo durante este proceso.

He tenido la fortuna de rodearme de personas increíbles, quienes me han enseñado el valor de la amistad, dicen que uno mismo va eligiendo lo que se convierte en su segunda familia, gracias, Omar de Jesús López, Elizabeth Lechuga, Darieli Mendoza, Yoloxóchitl Guerrero, Víctor Adrián, Diana Vizcarra, Yadira Villegas, Fernanda Pérez, Daniela Castañeda, Kruz Tejeda, Jimena Vargas, Rebeca Gómez, por siempre estar, escucharme, animarme, apoyarme y quererme, tengan en cuenta que siempre contarán conmigo.

Gracias a mis amigos con quienes coincidí durante esta etapa que, de igual manera, aunque fue poco el tiempo que estuvimos, se convirtieron en personas muy

importantes en mi camino, Fernando García, Eliel Mares, Caín Moreno, Miguel Ángel Ayala, Alondra González, Melissa Huizar, Jordan Ramos.

Agradezco a Agustín Chan, por haber estado apoyándome durante esta etapa, aconsejándome, dándome la confianza, agradezco que hayas sido parte de esto, muchas gracias por todo lo vivido, gracias por siempre estar y por ser parte del camino, siempre tendrás un espacio en mi corazón, tq.

Asimismo, expreso mis agradecimientos a mis amigos que, a pesar de la distancia me han dado esa motivación y brindado su apoyo en este proceso, Karina Saucedo, Monserrat Arellano, Tania Medina, Armando Jaramillo, Claudio Acosta, Mariana Franco, Ximena y Vanessa González, Gerardo Mendoza, Karol Jiménez, aunque a la distancia, fue un impulso importante para llegar a esta meta, espero siempre ver todas sus metas y logros cumplirse.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos.....	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Producción de hortalizas.....	4
Producción orgánica de hortalizas	5
Residuos orgánicos utilizados en la producción	5
Extracto de ajo	7
Extracto de maíz ensilado (Biochar)	8
Germinación y vigor de semillas	9
Fases de la germinación	9
Vigor.....	10
Factores que influyen en la fisiología de las semillas.....	10
Esquilmos	11
MATERIALES Y MÉTODOS	12
Ubicación del experimento.....	12
Material genético.....	12
Tratamientos	12
Preparación de esquilmo molido de ajo	12
Producto Biochar.....	15
Preparación de tratamientos	15
Establecimiento del experimento	16
Variables evaluadas.....	17

Capacidad de germinación	17
Primer conteo de plántulas normales.....	19
Índice de velocidad de emergencia.....	20
Índice de velocidad de germinación	21
Longitud media de hipocótilo	21
Longitud media de radícula.....	21
Análisis estadístico.....	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
Especie ejote (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	23
Análisis de varianza.	23
Prueba de medias.....	27
Especie espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	34
Análisis de varianza.	34
Pruebas de medias.	39
Especie rábano (<i>Raphanus sativus</i>).....	46
Análisis de varianza	46
Prueba de medias.....	51
CONCLUSIÓN	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1 descripción de tratamientos aplicados en el estudio.....	15
Cuadro 4.1 Cuadrados medios y nivel de significancia en la capacidad de germinación aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de ejote.	24
Cuadro 4.2 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de ejote.	25
Cuadro 4.3 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de ejote en las variables de capacidad de germinación.	28
Cuadro 4.4 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de ejote en las variables de vigor.	31
Cuadro 4.5 Cuadrados medios y nivel de significancia en la capacidad de germinación aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca.	35
Cuadro 4.6 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca.	37
Cuadro 4.7 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de espinaca en las variables de capacidad de germinación.....	39
Cuadro 4.8 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de espinaca en las variables de vigor.....	43
Cuadro 4.9 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor y germinación de rábano con diferentes aplicaciones de extracto de ajo y biochar.	47
Cuadro 4.10 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor y germinación de rábano con diferentes aplicaciones de extracto de ajo y biochar.	49

Cuadro 4.11 Resultados de comparación estadística de medias entre tratamientos en semillas de rábano en las variables de germinación.	52
Cuadro 4.12 Resultados del análisis estadístico de las pruebas de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de rábano en las variables de vigor.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Producción de ajo en Tierra Blanca, Loreto, Zacatecas. 2023.	13
Figura 3.2 Bastidor de metal para secado de esquilmo de ajo.	14
Figura 3.3 Molino mecánico para triturar esquilmo.	14
Figura 3.4 Producto biochar.	15
Figura 3.5 Establecimiento del experimento. a) Material genético y de laboratorio utilizado	16
Figura 3.6 Siembra de semillas de tres especies (espinaca, rábano y ejote).	17
Figura 3.7 Condiciones después de la siembra en una cámara de germinación, de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, con 8 horas luz y 16 horas oscuridad.	17
Figura 3.8 Clasificación de plántulas normales de ejote a los 7 días después de la siembra.	18
Figura 3.9 Clasificación de plántulas anormales de ejote a los 7 días después de la siembra.	19
Figura 3.10 Clasificación de semillas sin germinar de ejote a los 7 días después de la siembra.	19
Figura 3.11 Prueba de primer conteo de plántulas normales a los cuatro días después de la siembra en la especie de ejote.	20
Figura 3.12 Prueba de índice de velocidad de emergencia, en conteo diario hasta los 7 días después de la siembra en la especie de ejote.	20
Figura 3.13 Prueba de índice de velocidad de germinación, en conteo de plántulas normales diario hasta los 7 días después de la siembra en la especie de ejote. ...	21
Figura 3.14 Prueba de longitud media de hipocótilo (a) y radícula (b) de plántulas normales a los 7 días después de la siembra en la especie de ejote.	22
Figura 4.1 Comportamiento de las semillas sin germinar, blandas, intactas con testa rota.	24
Figura 4.2 Muestra de comportamiento de la variable plántulas de emergencia. ...	26

Figura 4.3 Índice de velocidad de germinación en ejote.	27
Figura 4.4 Longitud media de hipocótilo y de radícula.	27
Figura 4.5 Semillas sin germinar en ejote	30
Figura 4.6 Plántulas anormales en ejote	30
Figura 4.7 Evaluación de ejote en la prueba de vigor índice de velocidad de emergencia con tratamientos de esquilmo de ajo y biochar.....	32
Figura 4.8 Respuesta de las pruebas de vigor longitud media de hipocótilo y radícula en ejote.	33
Figura 4.9 Evaluación de la variable de germinación a los 7 dds de semillas de espinaca.....	34
Figura 4.10 Respuesta de plántulas anormales de semillas de espinaca.	36
Figura 4.11 Semillas sin germinar de espinaca.....	36
Figura 4.12 Respuesta de vigor en la prueba índice de velocidad de emergencia en espinaca.....	36
Figura 4.13 Respuesta de las pruebas de vigor índice de velocidad de germinación en plántulas normales, longitud media de hipocótilo y radícula en semillas de espinaca.....	38
Figura 4.14 Respuesta de plántulas normales de la variable germinación en semillas de espinaca.....	38
Figura 4.15 Respuesta de plántulas anormales en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca.....	41
Figura 4.16 Respuesta de semillas sin germinar en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca en espinaca.	42
Figura 4.17 Respuesta de las pruebas de vigor en longitud media de hipocótilo y radícula en semillas de espinaca.	45
Figura 4.18 Plántulas normales en variables de germinación.	46

Figura 4.19 Respuesta de plántulas anormales en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.....	47
Figura 4.20 Respuesta de semillas sin germinar en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.....	48
Figura 4.21 Respuesta del índice de velocidad de emergencia en semillas de rábano.....	49
Figura 4.22 Respuesta de las variables de Longitud media de hipocótilo y radícula en semillas de rábano.....	50
Figura 4.23 Respuesta de plántulas normales de la variable germinación en semillas de rábano.....	52
Figura 4.24 Respuesta de plántulas anormales en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.....	53
Figura 4.25 Respuesta de semillas sin germinar en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.....	53
Figura 4.25 Respuesta de índice de velocidad de emergencia en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.....	55

RESUMEN

Las hortalizas son esenciales para el consumo humano y la economía agrícola; sin embargo, el cambio climático, el uso excesivo de productos químicos y diferentes factores, están afectando su sostenibilidad. La producción orgánica basada en el uso de extractos de ajo y maíz ensillado (biochar) ofrecen alternativas más sustentables de producción. Estos materiales pueden mejorar la germinación y el vigor de las semillas, favoreciendo el crecimiento de las plántulas. El objetivo de la investigación fue determinar el efecto fisiológico en semillas de tres especies de hortalizas: ejote (*Phaseolus vulgaris*), espinaca (*Spinacea oleracea*) y rábano (*Raphanus sativus*) con la aplicación de esquilmo de ajo y biochar. El experimento se desarrolló en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en el laboratorio del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS). Se aplicaron 11 tratamientos en las semillas de tres especies: ajo al 0.1, 0.2 y 0.3%; biochar al 5, 10 y 15%; las mezclas de ajo más biochar al 2.5, 5, 10%; ajo 20% más biochar al 30%; ajo al 1% más biochar al 2.3% y un Testigo absoluto. Se sembraron 25 semillas en tres repeticiones en cajas plásticas de 30 x 30 cm, se colocaron en una cámara de germinación por 7 días bajo condiciones óptimas. Se evaluó la capacidad de germinación y vigor mediante las variables: porcentaje de plántulas normales a los cuatro días (PC) y siete días (GER), plántulas anormales (PA) y semillas sin germinar (SSG); así como el índice de velocidad de emergencia (IVE) y de germinación (IVG), longitud media de hipocótilo (LMH) y de radícula (LMR). Los datos obtenidos se analizaron bajo un diseño factorial completo AxB, y una prueba de comparación de medias con DMS al 0.05%. Los resultados indicaron que existieron diferencias altamente significativas al $P \geq 0.1\%$ entre especies, tratamientos y en la interacción especies por tratamiento. El estudio encontró que las especies ejote y rábano mostraron una mejor respuesta fisiológica en PC (24.4 y 55.6 respectivamente), en menor porcentaje de PA y SSG (2.2, 4.4 % y 2.2, 2.2 %, cada una de las variables), al igual que en el IVE (26.6 y 21.8, plántulas respectivamente), y LMH (15.8 y 9.0 cm, cada una de las especies). Con respecto a la aplicación de los tratamientos, se presentaron diferentes efectos, positivos al aplicar biochar al 5, 10 y 15%, teniendo porcentajes de PC entre 24.4 y 55.6 %.

Mientras que en la interacción especie por tratamiento, sobresalieron T5, T6 y T7 al aplicar biochar al 5, 10 y 15%. En conclusión, existe una diferente respuesta en la fisiología de la semilla de las especies estudiadas con la aplicación de tratamientos (esquilmo de ajo y biochar). Sobresaliendo T5 (biochar al 5%), T6 (biochar al 10%), T7 (biochar al 15%), y T12 (ajo al 1% más biochar al 2.3%), al producir mayor PC, menor en PA y SSG, así como un mayor IVE y LMH, sobre todo en ejote y rábano. Sin embargo, el Testigo obtuvo respuestas similares o superiores a estos tratamientos en las mismas variables.

Palabras clave: *esquilmo, semillas, hortalizas, germinación y vigor*

INTRODUCCIÓN

Las hortalizas tienen una gran importancia en la dieta humana, ya que aportan una considerable cantidad de nutrientes, vitaminas y proteínas al cuerpo. Así mismo, su comercialización en mercados nacionales e internacionales sustentan la economía agrícola. Sin embargo, el aumento de la población, el cambio climático, el uso indiscriminado de fertilizantes y el control químico en su producción han generado un impacto negativo en la calidad del suelo y el medio ambiente, lo que ha afectado la sostenibilidad a largo plazo de estos cultivos.

Ante estos desafíos, una de las alternativas más prometedoras es la producción de hortalizas orgánicas, que busca reducir el uso de productos químicos y promover prácticas más sostenibles, como el uso de residuos orgánicos para enriquecer el suelo. Este tipo de agricultura no solo mejora la salud del suelo, sino que también reduce el impacto ambiental negativo asociado con los métodos convencionales de cultivo (FAO, 2025).

Dentro de los sistemas de producción orgánica, destacan las especies de la familia Amaryllidaceae, específicamente del género *Allium*, como el ajo, que es ampliamente cultivado tanto para consumo interno como para exportación. En la producción de ajo, el principal producto aprovechado es la cabeza, que se compone de ocho a diez dientes de buen tamaño, saludables y bien formados. Por el contrario, los dientes mal formados, sumidos, podridos o pequeños, así como las hojas y raíces, son considerados residuos que no tienen valor comercial y, lamentablemente, son desechados, generalmente llevados a los basureros municipales, lo que significa un desaprovechamiento de grandes cantidades de residuos orgánicos que podrían ser reutilizados (Guerena, 2023).

La aplicación de biochar a los suelos se está considerando como un medio para secuestrar carbono (C) y, al mismo tiempo, mejorar las funciones del suelo. (Verheijen *et al.*, 2010). El biocarbón puede mejorar la calidad del suelo y favorecer el desarrollo de las plantas, lo que se traduce en un mayor rendimiento de los cultivos. Sin embargo, su efectividad puede variar según factores como el tipo de

biocarbón utilizado, el proceso de producción, las características del suelo y el cultivo que se siembra (Oni *et al.*, 2019).

En la producción de hortalizas a partir de semillas, la germinación es el primer y fundamental eslabón en la cadena del sistema de producción agrícola. Sin embargo, la tasa de germinación puede verse influenciada por factores como la calidad del sustrato, las condiciones ambientales y los tratamientos aplicados a las semillas (De la Cuadra, 1992). En este contexto, explorar el uso de residuos orgánicos como el extracto de ajo y el biochar (esquilmo de maíz) se presenta como una alternativa interesante para mejorar la germinación y el vigor de las semillas. Se busca entender cómo estos materiales, al aplicarse en concentraciones adecuadas, podrían influir en la emergencia de semillas y en el crecimiento inicial de las plántulas.

El experimento se enfocó en tres especies hortícolas de gran importancia, como el ejote, la espinaca y el rábano, para evaluar el impacto de estos tratamientos en el proceso de germinación y la calidad de las plántulas mediante pruebas de vigor. Por ello, en el presente estudio se plantearon el objetivo general y específicos, así como la hipótesis siguiente.

Objetivo General

Determinar el efecto fisiológico de la aplicación de extractos de ajo y maíz en semillas de tres especies de hortalizas.

Objetivos Específicos

- Comparar el efecto de once tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar mediante pruebas de germinación y vigor de semillas de ejote (*Phaseolus vulgaris*).
- Comparar el efecto de once tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar mediante pruebas de germinación y vigor de semillas de espinaca (*Spinacea oleracea*).
- Comparar el efecto de once tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar mediante pruebas de germinación y vigor de semillas de rábano (*Raphanus sativus*).

Hipótesis

- Al menos uno de los tratamientos aplicados a base de esquilmo de ajo y biochar tiene un efecto positivo en las pruebas de germinación y vigor en semillas de ejote (*Phaseolus vulgaris*) bajo condiciones controladas de laboratorio.
- Al menos uno de los tratamientos aplicados a base de esquilmo de ajo y biochar tiene un efecto positivo en las pruebas de germinación y vigor en semillas de espinaca (*Spinacea oleracea*) bajo condiciones controladas de laboratorio.
- Al menos uno de los tratamientos aplicados a base de esquilmo de ajo y biochar tiene un efecto positivo en las pruebas de germinación y vigor en semillas de rábano (*Raphanus sativus*) bajo condiciones controladas de laboratorio.

REVISIÓN DE LITERATURA

Producción de hortalizas

Las hortalizas se definen como plantas herbáceas que se cultivan con el fin de satisfacer el consumo y la comercialización en mercados nacionales e internacionales para sustentar la economía. Los principales países productores de hortalizas en el mundo son China con 709 millones de toneladas (MDT), India con 208 MDT y EE. UU con 66,5 MDT (E-commerce Agrario, 2023). También son de mucha importancia en la dieta de la población, ya que aportan los nutrientes, vitaminas y proteínas necesarios (Silva *et al.*, 2017).

El aumento de la población en el mundo incrementa la demanda de comida, por lo que la producción de frutas y hortalizas empieza a ser ineficiente (Zapata *et al.*, 2020; FAO, 2011). Por otro lado, los efectos del cambio climático también han contribuido a la disminución en los recursos de la tierra y el agua. Lo anterior, ha provocado una dependencia en el uso de productos químicos para compensar la falta de nutrientes del suelo; así como para controlar plagas y enfermedades, generando un impacto negativo en los productos hortícolas (Zapata *et al.*, 2020).

En México, la producción de hortalizas se realiza en todo el territorio nacional con aproximadamente 15,481.25 hectáreas sembradas. En el cultivo de ejote se estiman siembras anuales en 10,202.41 hectáreas, mientras que de espinaca son 2,789.75 hectáreas, 2,489.09 hectáreas de rábano, generando una derrama económica de 1,651,218.47 millones de pesos (SIAP, 2023).

La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) ha diseñado un sistema de producción de hortalizas basado en la seguridad alimentaria teniendo como objetivo mejorar la calidad de las hortalizas, proporcionando información, y capacitación sobre las buenas prácticas agrícolas (Panichi, 2018).

Producción orgánica de hortalizas

La producción de frutas y hortalizas orgánicas en México está liderada principalmente por pequeños productores, cuyo objetivo es la exportación. Sin embargo, mantener esta posición es cada vez más difícil debido a la necesidad de garantizar la calidad e inocuidad alimentaria. Lo anterior, debido a la deficiente adopción de estándares de inocuidad alimentaria por parte de los pequeños productores (Arroyo *et al.*, 2020).

La agricultura orgánica nacional es un sistema que busca producir alimentos de manera sostenible, priorizando la salud ambiental, social y económica. Se basa en la fertilidad del suelo para garantizar una buena producción, reduciendo significativamente la necesidad de insumos externos al evitar el uso de fertilizantes químicos, plaguicidas (Schwentenius *et al.*, 2010). Este tipo de agricultura se ha desarrollado de manera integral en la producción de mango y aguacate basada principalmente en el uso de sustratos.

Residuos orgánicos utilizados en la producción

El aumento acelerado de la urbanización a nivel global ha generado una creciente preocupación por la gestión de los residuos. De acuerdo con el Banco Mundial, se estima que la producción de desechos sólidos pasará de 2,010 millones de toneladas en 2016 a aproximadamente 3,400 millones de toneladas para el año 2050 (Kaza *et al.*, 2018). Este incremento representa un desafío ambiental significativo que requiere estrategias sostenibles de manejo y reducción de residuos (Kaza *et al.*, 2018).

En América Latina y el Caribe, cada habitante genera aproximadamente un kilogramo de residuos al día, y se estima que esta cifra aumentará en al menos un 25% para el año 2050, impulsada por el crecimiento urbano y poblacional (ONU Medio Ambiente, 2018, citado en Contreras Ortiz, 2021). A pesar de esta tendencia, cerca de 40 millones de personas en la región no cuentan con acceso a servicios adecuados de recolección de residuos. Además, sólo alrededor del 10% de los desechos generados son reciclados o reutilizados, lo que evidencia la falta de una

cultura sólida de separación y aprovechamiento de residuos en gran parte de la población (ONU Medio Ambiente, 2018).

En México, los residuos sólidos urbanos (RSU) de la SEMARNAT (2017), representan una importante fuente de contaminación. En el mismo año 2017, se generaron más de 102 mil toneladas diarias, de las cuales el 9.63 % eran residuos orgánicos, en su mayoría provenientes del sector agropecuario, una alternativa para su manejo es la descomposición aerobia, que no solo reduce los desechos, sino que también produce un abono orgánico fermentado de origen japonés, elaborado con materiales vegetales y animales. Este abono enriquece el suelo con nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y hierro, además de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. También aporta humus, estimula la actividad microbiana y favorece las cadenas tróficas del suelo.

Su uso combinado con sustratos comerciales ha mostrado resultados positivos en viveros, promoviendo el desarrollo de plantas frutales (Mendivil-Lugo *et al.*, 2020).

Los abonos orgánicos se elaboran con desechos de origen animal, vegetal o una mezcla de ambos, cuya función principal es mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como enriquecer con nutrientes (Rodríguez, 2022). La mejora del suelo se promueve principalmente por el aumento en la retención de humedad y la síntesis de nutrientes esenciales, lo que reduce la erosión del suelo (Neciosup *et al.*, 2022 citado por Chugchilan y Quishpe 2024).

Los abonos orgánicos favorecen el metabolismo de las plantas y estimulan sus procesos naturales, lo que incrementa su rendimiento. A diferencia de los fertilizantes convencionales, mejoran la absorción de nutrientes y aumentan la resistencia al estrés, haciendo a las plantas más fuertes. Su popularidad crece en la agricultura y la horticultura como una alternativa sostenible que mejora la productividad de los cultivos y la calidad del suelo, promoviendo la biodiversidad (Bioscience, 2017 citado por Chugchilan y Quishpe 2024).

La reutilización de residuos ofrece beneficios económicos, sociales y ambientales. Económicamente, convierte los residuos en productos con valor añadido, generando empleo e ingresos, especialmente en áreas rurales.

Socialmente, mejora la salud al producir alimentos de alto valor nutricional y reducir residuos. Ambientalmente, promueve un uso más eficiente de los desechos, disminuyendo la dependencia de vertederos e incineradores, lo que reduce gases de efecto invernadero y contaminación producida (Holguin, 2021).

Extracto de ajo

Según el SIAP, el ajo es uno de los cultivos más rentables en la producción nacional con 8,618.33 hectáreas sembradas, siendo Zacatecas con 3,977.34 Ha, Nuevo León 647 Ha, Guanajuato 1,056.50 Ha y Sonora 667.50 Ha, posicionándose como unos de los más importantes en la producción de este cultivo (SIAP, 2023).

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria, durante 2023, Zacatecas aportó 61 mil 188 toneladas de las 104 mil 526 producidas en todo el país. A nivel agroindustrial, en México tanto la cebolla como el ajo generan residuos, que ascienden a más de 550,000 toneladas anuales de cáscara de cebolla y 3,7 millones de toneladas de cáscara de ajo generadas por diversas causas (Méndez-Trujillo *et al.*, 2021).

Los residuos de ajo incluyen diversos componentes como las hojas, tallos, raíces y cáscaras que se generan en diferentes etapas, desde la cosecha hasta el procesamiento y consumo. Estos residuos representan entre el 15% y el 25% del peso total de la planta, dependiendo de las prácticas agrícolas y los métodos de procesamiento utilizados. El ajo aporta fósforo (P), un macronutriente de suma importancia ya que en la nutrición crea raíces y potencializa la floración (Pinzón-Sandoval *et al.*, 2019).

Los extractos vegetales han sido evaluados como herbicidas en distintas especies hortícolas, tal es el caso de los trabajos realizados por Anza *et al.* (2023) quienes evaluaron extractos de romero (*Rosmarinus officinalis*), rábano (*Raphanus sativus*), orégano (*Origanum vulgare*), chile o pimiento (*Capsicum annuum*) y ajo (*Allium*

sativum), los cuales fueron relevantes en el control de malezas comunes de cultivos hortícolas al mostrar efectos alelopáticos que inhibieron la germinación de las malezas sin afectar los cultivos como lechuga y tomate.

Los extractos son una alternativa sustentable por ser económicos, renovables y seguros para el ambiente. Sus compuestos bioactivos, extraídos de diferentes órganos de las plantas, tienen potencial fitotóxico, lo que los convierte en candidatos a bioherbicidas. Sin embargo, en México, la investigación sobre plantas con propiedades fitotóxicas y alelopáticas es limitada debido a la poca exploración de su gran diversidad vegetal (Díaz-Mota *et al.*, 2017)

Extracto de maíz ensilado (Biochar)

El biocarbón es un material sólido rico en carbono, elaborado a partir de biomasa de maíz mediante un proceso similar al utilizado para producir carbón vegetal. Su principal aplicación es como enmienda del suelo, con el propósito de mejorar sus funciones y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero que se generarían con la descomposición natural de la biomasa (Golisano Institute for Sustainability, 2021). El biocarbón puede contribuir a mejorar el suelo, conservar agua, generar energía renovable, capturar carbono, reducir insumos y aumentar el rendimiento en suelos menos productivos (Oni, Oziegbe & Olawole, 2019). Aunque no es efectivo en todas partes, tiene el potencial de ser una herramienta útil para agricultores y terratenientes (Bergman, 2022).

El biocarbón puede tener diferentes niveles de efectividad, dependiendo de los materiales de origen, el método de producción y las cantidades aplicadas (Escalante Rebolledo *et al.*, 2016). No todos los tipos de suelo son aptos para su uso. Los suelos arenosos, con buen drenaje, son los más receptivos, mientras que los suelos arcillosos y con drenaje moderado no siempre presentan buenos resultados.

Germinación y vigor de semillas

La germinación es el proceso mediante el cual una semilla en estado de latencia reinicia su crecimiento y desarrolla una nueva planta. Este proceso se inicia con la absorción de agua por la semilla, lo que activa su metabolismo y culmina con la emergencia de la radícula, la primera raíz de la plántula. Para que la germinación ocurra de manera óptima, es esencial que se den ciertas condiciones ambientales y que la semilla esté en un estado fisiológico adecuado (De la Cuadra, 1992) .

Fases de la germinación

Imbibición: Es la primera etapa, donde la semilla absorbe agua rápidamente, lo que provoca su hinchazón y la reactivación de procesos metabólicos que estaban inactivos durante la latencia. Este proceso es puramente físico y depende de la disponibilidad de agua en el medio (Pita, 1998).

Activación metabólica: Tras la imbibición, se incrementa la actividad enzimática y la respiración celular. Las enzimas comienzan a descomponer las reservas almacenadas en la semilla (como almidones, proteínas y lípidos) para proporcionar energía y materiales necesarios para el crecimiento del embrión (Matilla, 2008).

Activación metabólica: Tras la imbibición, se incrementa la actividad enzimática y la respiración celular. Las enzimas comienzan a descomponer las reservas almacenadas en la semilla (como almidones, proteínas y lípidos) para proporcionar energía y materiales necesarios para el crecimiento del embrión (Matilla, 2008).

Crecimiento y emergencia: Finalmente, el embrión crece, y la radícula emerge rompiendo las cubiertas seminales. Este evento marca el fin de la germinación y el inicio del desarrollo de la plántula.

Vigor

El vigor es el potencial que tiene la semilla para germinar y emerger rápidamente, generando plántulas normales en una amplia gama de condiciones ambientales.

Por lo tanto, semillas con alto vigor pueden, incluso en condiciones no consideradas adecuadas de agua, luz y temperatura, tolerar estos estreses y germinar y emerger formando una plántula normal (BoosterAgro, 2022).

El vigor de la semilla es un parámetro muy importante puesto que permite identificar las diferencias entre la germinación y la emergencia en campo, principalmente cuando las condiciones del campo pueden ocasionar estrés (García-López *et al.*, 2016).

El vigor se mide mediante pruebas que evalúan la velocidad de germinación, la emergencia de la plántula y la resistencia a condiciones adversas. Este factor es crucial para determinar el rendimiento y la uniformidad de los cultivos en la agricultura (Manfrini, 2004).

Factores que influyen en la fisiología de las semillas

La fisiología de las semillas puede ser afectada por algunos factores ambientales que influyen en la germinación de una semilla y la velocidad con que ello ocurre, se puede mencionar, humedad del sustrato, temperatura, luz, oxígeno, y dióxido de carbono, entre otros (Caroca *et al.*, 2016).

De los factores antes mencionados, la humedad y temperatura son los más determinantes en el proceso de germinación, y cuando la humedad no es limitante, la tasa y el porcentaje de germinación dependen de la temperatura (Caroca *et al.*, 2016).

Agua: Es esencial para la imbibición y para activar las reacciones bioquímicas necesarias para el crecimiento del embrión. Sin una adecuada hidratación, la semilla no puede iniciar el proceso germinativo (Pita, 1998).

La temperatura y la luz son factores clave para la germinación de las semillas. Cada especie tiene un rango óptimo de temperatura; valores demasiado bajos o altos

pueden inhibir o retrasar el proceso. Muchas semillas, por ejemplo, germinan mejor bajo temperaturas alternas como 20-30 °C. Asimismo, algunas especies requieren luz para germinar (fotoblásticas positivas), mientras que otras lo hacen mejor en oscuridad (fotoblásticas negativas). Estas condiciones varían según la especie (Courtis, 2013).

Oxígeno: Es necesario para la respiración celular. En suelos anegados o compactados, la falta de oxígeno puede inhibir la germinación (Pita, 1998).

Sustrato: El sustrato desempeña un papel fundamental en la composición del suelo, ya que modifica su textura, estructura, pH, disponibilidad de nutrientes, actividad microbiana e interacciones minerales, lo que repercute directamente en su fertilidad y sostenibilidad. En particular, la estructura del sustrato determina el tamaño de las partículas del suelo, lo cual influye en su capacidad de retención de agua y en su porosidad: los sustratos con partículas más finas tienden a retener mayor cantidad de agua, mientras que aquellos con partículas más gruesas favorecen la aireación (Chen, 2018).

Los sustratos orgánicos, como el compost, aportan nutrientes esenciales y mejoran la actividad biológica del suelo, promoviendo un entorno favorable para el crecimiento de las plantas. También contribuyen a mejorar la estructura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y nutrientes (Navarro *et al.*, 2022).

Esquilmos

La gestión adecuada de los esquilmos agrícolas, restos vegetales y subproductos generados durante la producción de cultivos es esencial para promover prácticas agrícolas sostenibles y minimizar el impacto ambiental. Estos residuos, que incluyen paja, rastrojos y restos de poda, pueden ser aprovechados de diversas maneras para beneficiar tanto al medio ambiente como a la productividad agrícola.

Compostaje: La descomposición controlada de los esquilmos produce compost, un fertilizante orgánico que mejora la estructura y fertilidad del suelo. Este proceso reduce la necesidad de fertilizantes químicos y contribuye a la retención de humedad en el suelo (Diacono *et al.*, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El estudio se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en diciembre de 2023, en el Laboratorio de Ensayos de Semillas, en el Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS), ubicado en el Departamento de Fitomejoramiento.

Material genético

Se utilizaron muestras de semillas de especies hortícolas de ejote (C1), espinaca (C2) y rábano (C3) de reciente cosecha (junio, 2023), proporcionadas por el CCDTS de la universidad.

Tratamientos

Preparación de esquilmo molido de ajo

Para la obtención de esquilmo, se partió de un sistema de producción de ajo de septiembre 2022 a abril 2023, en la comunidad de Tierra Blanca, del municipio de Loreto, Zacatecas, ubicado en las coordenadas Longitud 102°09'43.20" W a 101°46'51.60" W, Latitud 22°09'57.60" N a 22°22'53.04" N.

Una vez realizada la cosecha de bulbo comercial en abril 2023, se llevó a cabo el proceso de limpieza con la finalidad de obtener el fruto de color morado listo para el empaque.

La limpieza consistió en quitar las hojas externas, sucias y manchadas, así como eliminar los ajos podridos, y todo residuo descartado del cultivo que no se desarrolló en el campo o no fue bien formado (Figura 3.1), obteniendo finalmente el esquilmo.



a) Etapa antes de la limpieza



b) Esquilmo de ajo

Figura 3.1 Producción de ajo en Tierra Blanca, Loreto, Zacatecas. 2023.

El esquilmo se colocó en bastidores de metal no corrosivo (Figura 3.2), dejando secar a medio ambiente, alcanzando temperaturas entre 35 a 40°C al sol, con humedad relativa baja en condiciones de semidesierto por un tiempo de 20 días.

Al obtener el deshidratado natural del esquilmo, se trituroó en un molino mecánico (Figura 3.3), y posteriormente se molió en una licuadora hasta obtener un polvo de esquilmo.



Figura 3.2 Bastidor de metal para secado de esquilmo de ajo.



Figura 3.3 Molino mecánico para triturar esquilmo.

Producto Biochar

Es un sustrato en polvo, hecho a base del silo de maíz obtenido a partir de pirólisis de alta temperatura sin químicos, con una presentación del producto en prueba, proporcionado por una casa comercial (Figura 3.4).



Figura 3.4 Producto biochar.

Preparación de tratamientos

Para el estudio se aplicaron doce tratamientos con base a esquilmo molido de ajo y un producto comercial biochar, a diferentes concentraciones y mezcla, teniendo como testigo absoluto agua destilada, descritos en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 descripción de tratamientos aplicados en el estudio.

Tratamiento	Descripción
1	Testigo – Agua destilada
2	Ajo 0.1%
3	Ajo 0.2%
4	Ajo 0.3%
5	Biochar 5%
6	Biochar 10%
7	Biochar 15%
8	Ajo 5% + Biochar 5%
9	Ajo 10% + Biochar 10%
10	Ajo 2.5% + Biochar 6%
11	Ajo 20% + Biochar 30%
12	Ajo 1% + Biochar 2.3%

Establecimiento del experimento

Para el establecimiento del experimento, se utilizaron charolas de plástico de 30 cm x 30 cm con sustrato Peat moss comercial saturado de tratamiento, con una proporción de 550 g de sustrato con 500 mL de tratamiento (Figura 3.5 a) y 3.6 b)).

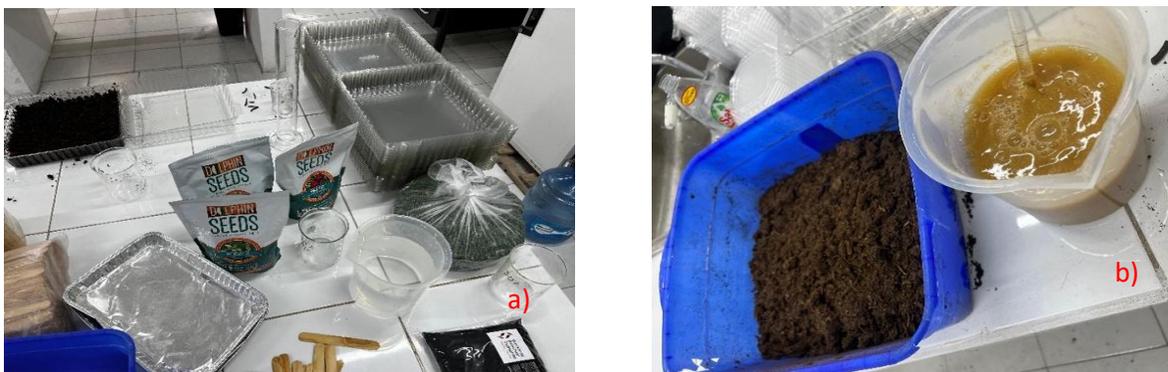


Figura 3.5 Establecimiento del experimento. a) Material genético y de laboratorio utilizado; **Figura 3.6 b)** Preparación de tratamientos.

Una vez preparada cada charola, se sembraron 30 semillas de cada cultivo en tres repeticiones, con un total de 75 semillas por especie y tratamiento (Figura 3.6); se etiquetaron las cajas y se colocaron en una cámara de germinación marca Hoffman Manufacturing a una temperatura de 25 ± 1 °C, con 16 horas luz y 8 oscuridad por un tiempo de 12 días (Figura 3.7).



Figura 3.6 Siembra de semillas de tres especies (espinaca, rábano y ejote).



Figura 3.7 Condiciones después de la siembra en una cámara de germinación, de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, con 8 horas luz y 16 horas oscuridad.

Variables evaluadas

En este estudio se evaluaron diferentes variables fisiológicas de las semillas, como la capacidad de germinación, un conteo de plántulas normales a los cuatro días después de la siembra, el índice de velocidad de emergencia y germinación, así como la longitud media de hipocótilo y radícula, descritas a continuación.

Capacidad de germinación

La capacidad de germinación se determinó mediante un conteo final de la germinación a los 7 días para determinar el porcentaje, contando el número de las

plántulas normales (PN), anormales (PA) y las semillas sin germinar (SSG) por cada especie, tratamiento y repetición.

Plántulas normales, son aquellas que tienen un sistema radicular bien desarrollado, incluyendo raíz primaria, hipocótilo bien desarrollado e intacto, en dicotiledóneas una plúmula normal (Figura 3.8).



Figura 3.8 Clasificación de plántulas normales de ejote a los 7 días después de la siembra.

Plántulas anormales, se identifican con base en plántulas con lesiones y malformaciones, con defectos en sus estructuras esenciales que les impediría desarrollarse satisfactoriamente en plantas, por ejemplo: raíz primaria gruesa y corta, ausente, rota, débil, atrofiada en la cubierta de la semilla (Figura 3.9).

Semillas sin germinar, se denominan así cuando las semillas no germinan aun cuando estén bajo condiciones que se especifican para dicha especie al igual que se especifican como semillas muertas y debemos de registrar el porcentaje. (Figura 3.10).



Figura 3.9 Clasificación de plántulas anormales de ejote a los 7 días después de la siembra.



Figura 3.10 Clasificación de semillas sin germinar de ejote a los 7 días después de la siembra.

Primer conteo de plántulas normales

Se realizó una evaluación de primer conteo de plántulas normales a los cuatro días de siembra, considerando aquellas plántulas con raíz y tallo, cada estructura con al menos dos veces el tamaño de la semilla en longitud (Figura 3.11), siendo como un indicador de vigor, expresado en porcentaje.



Figura 3.11 Prueba de primer conteo de plántulas normales a los cuatro días después de la siembra en la especie de ejote.

Índice de velocidad de emergencia

Se obtiene a través del conteo diario de las plántulas emergidas a partir de la siembra, tomando como plántulas emergidas a las que sobresalen del sustrato, registrando el número de emergidas por día (Figura 3.12).



Figura 3.12 Prueba de índice de velocidad de emergencia, en conteo diario hasta los 7 días después de la siembra en la especie de ejote.

Índice de velocidad de germinación

Se determina mediante el número de plántulas normales presentes al día, contabilizando todos los días desde la siembra hasta los siete días de la prueba (Figura 3.13).



Figura 3.13 Prueba de índice de velocidad de germinación, en conteo de plántulas normales diario hasta los 7 días después de la siembra en la especie de ejote.

Longitud media de hipocótilo

Se evaluó la longitud del hipocótilo de las plántulas normales con ayuda de un escalímetro (Figura 3.14), registrando el dato en centímetros.

Longitud media de radícula

Se determinó midiendo la raíz principal de cada plántula normal por especie, tratamiento y repetición, reportando en centímetros (Figura 3.14).



Figura 3.14 Prueba de longitud media de hipocótilo (a) y radícula (b) de plántulas normales a los 7 días después de la siembra en la especie de ejote.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de cada variable se agruparon mediante el programa Microsoft Excel por cada especie y se analizaron estadísticamente mediante el paquete estadístico SAS institute inc. 2009 base SAS ® 9.1.3, usando el diseño factorial completo AxB, bajo el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Efecto de la variable en el i-ésimo tratamiento j-ésima repetición.

μ = Efecto de la media general de cada especie

τ_i = Efecto del i-ésimo tratamiento, $i= 1 \dots 12$ tratamiento

β_j = Efecto del j-ésimo repetición, $j= 1, 2, 3$ repeticiones

E_{ijk} = Error experimental, $k= 1 \dots n$

La comparación de medias se realizó con la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) al 0.05 de probabilidad. Con los promedios de las variables de

cada genotipo se realizó un análisis de componentes principales con el fin de analizar las relaciones entre variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez registrados y analizados los datos de las diferentes pruebas fisiológicas evaluadas en cada una de las especies, se diseñaron cuadros y figuras para una mejor comprensión de los efectos de los tratamientos en cada especie, a continuación, se describen los resultados.

Especie ejote (*Phaseolus vulgaris*)

Análisis de varianza.

En el análisis estadístico en la especie ejote (Cuadro 4.1) mostró diferentes respuestas en la germinación, la presencia de plántulas anormales y el porcentaje de semillas sin germinar con respecto a la aplicación de los tratamientos, al tener un efecto altamente significativo ($<.01$). El promedio de germinación fue de 34.16%, lo que refleja que una tercera parte de las semillas germinaron, esto principalmente a que los tratamientos 3 (Ajo 0.2%), 4 (Ajo 0.3%), 9 (Ajo 10% + Biochar 10%) y 11 (Ajo 20% + Biochar 30%) inhibieron en su totalidad la germinación de la semillas, posiblemente por efectos de fitotoxicidad del ajo.

Cuadro 4.1 Cuadrados medios y nivel de significancia en la capacidad de germinación aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de ejote.

Fuente de Variación	GL	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
Tratamientos	11	3031.38 **	1914.81 **	4142.47 **
Repetición	2	3.63	46.35	30.48
Error Experimental		53.86	41.49	46.82
Media		34.16%	25.17%	32.31%
R ²		0.96	0.95	0.97
CV (%)		21.47	25.58	21.17
Desv. Est.		±7.33	±6.44	±6.84

*Significativo, ** altamente significativo, ^{NS} No significativo, P: 0.05, 0.01; GL= grados de Libertad; GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; R²= Índice de determinación; CV= Coeficiente de variación; Desv. Est. = Desviación estándar.

Con respecto a plántulas anormales (PA), se obtuvo un promedio de 25.17%, que indica que la cuarta parte de las semillas se vieron afectadas por los tratamientos, En la variable semillas sin germinar se observaron daños en la testa, desarrollo radicular escaso, así como semillas blandas e intactas (Figura 4.1). Dichos daños fueron cuantificados en promedio en 32.31%.



Figura 4.1 Comportamiento de las semillas sin germinar, blandas, intactas con testa rota.

Las pruebas de vigor (Cuadro 4.2) mostraron diferencias altamente significativas (<0.01) en todas las variables evaluadas. En el primer conteo los tratamientos presentaron una media de 5.18 %, siendo un valor bajo, esto pudo deberse a algún efecto negativo de los tratamientos y el estado inicial de la semilla.

Cuadro 4.2 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de ejote.

Fuente de variación	GL	PC (%)	IVE (Plántulas/día)	IVG (Plántulas normales/día)	LMH (Cm/plántula)	LMR (Cm/plántula)
Tratamientos	11	272.06**	314.37**	5.72 **	152.69 **	145.03 **
Repetición	2	29.95	4.32	0.23	0.52	0.62
Error Exp.		29.25	3.01	0.13	0.95	2.05
Media		5.18	12.70	2.13	7.10	6.98
R ²		0.82	0.98	0.95	0.98	0.97
CV (%)		100.00	13.66	16.93	13.76	20.52
Desv. Est.		±5.40	±1.73	±0.36	±0.97	±1.43

*Significativo, ** altamente significativo, ^{NS} No significativo, P: 0.05, 0.01; gL= grados de Libertad; PC= primer conteo de plántulas normales; IVE= Índice de velocidad emergencia; IVG= Índice de velocidad de germinación; LMH= Longitud media de hipocótilo; LMR= Longitud media de radícula; R²= Índice de determinación; CV= Coeficiente de variación; Desv. Est. = Desviación estándar.

Así mismo, el índice de velocidad de emergencia se observó 12.70 plántulas por día (Figura 4.2). Lo que indica una emergencia moderadamente rápida.



Figura 4.2 Muestra de comportamiento de la variable plántulas de emergencia.

En la variable índice de velocidad de germinación los tratamientos influyeron significativamente en la velocidad con un promedio bajo de 2.13 plántulas normales por día, confirmando que las emergencias de las plántulas no llegaron a desarrollar correctamente las estructuras esenciales en plántulas normales.

Las variables de longitud media de hipocótilo y de radícula, se observaron longitudes similares con un promedio de 7.10 cm por plántula en hipocótilo y 6.98 cm por plántula en radícula, lo que indica que las plántulas crecieron de forma equilibrada.



Figura 4.3 Índice de velocidad de germinación en ejote.



Figura 4.4 Longitud media de hipocótilo y de radícula.

Los resultados muestran que los tratamientos si influyeron de manera significativa en las pruebas fisiológicas de la semilla de ejote, siendo de manera lenta y baja su germinación a los 7 días después de la siembra; sin embargo, la emergencia los primeros días, fue más rápida y uniforme, pero no llegaron estas a desarrollar plántulas normales.

Prueba de medias.

En la comparación de medias el tratamiento testigo fue superior al resto de los tratamientos con un valor de 75.6%; sin embargo, este valor es bajo dentro de los parámetros de calidad de semillas, el cual debe superar el 80%, según las reglas de calificación de semillas del (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, 2020).

Cuadro 4.3 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de ejote en las variables de capacidad de germinación.

Tratamientos	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
1. Testigo – agua destilada	75.56 A	16.66 E	7.76 DEF
2. Ajo 0.1%	5.56 E	82.20 A	12.23 DE
3. Ajo 0.2%	0.00 E	60.00 B	40.00 C
4. Ajo 0.3%	0.00 E	2.20 F	92.23 AB
5. Biochar 5%	67.76 AB	13.33 E	13.33 DE
6. Biochar 10%	63.33 AB	21.10 DE	10.03 DEF
7. Biochar 15%	56.66 BC	15.56 E	11.10 DEF
8. Ajo 5% + Biochar 5%	23.36 D	44.44 C	15.56 D
9. Ajo 10% + Biochar 10%	0.00 E	0.00 F	83.30 B
10. Ajo 2.5% + Biochar 6%	52.20 C	28.86 D	2.23 E
11. Ajo 20% + Biochar 30%	0.00 E	0.00 F	100.00 A
12. Ajo 1% + Biochar 2.3%	65.56 AB	17.76 E	0.00 F

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (DMS al 0.05 de probabilidad). GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar

Los tratamientos 5 (biochar 5 %), 6 (biochar 10%) y 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) mostraron germinaciones de 63.33 % (6), 65.56 % (12) y 67.76 % (5), clasificados en el grupo AB, lo que indica que son similares entre sí y significativamente mejores que el resto de los tratamientos, sin alcanzar los valores del tratamiento 1 (testigo). El tratamiento 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) con una germinación más baja de 52.20 %, formando en el grupo estadístico C, y finalmente los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.3%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), y 11(ajo 20% + biochar 30%), que presentaron una nula germinación (0.00%), formando el último grupo estadístico (E), mostrando un efecto negativo en la respuesta de estos tratamientos.

Esta respuesta es probable que se deba a diferentes causas fisiológicas o algún tipo de toxicidad, esto coincide con lo reportado por Pérez *et al.* (2023), donde se evaluó la fitotoxicidad de extractos vegetales en semillas de maíz y frijol, utilizando extractos de ajo resultando una alta fitotoxicidad, inhibiendo completamente el crecimiento de las plántulas, lo que se atribuye a compuestos como la alicina, el

cual es un compuesto sulfurado del ajo, encargado de darle olor y sabor, además de otros compuestos azufrados que interfieren con procesos fisiológicos esenciales para la germinación.

Asimismo, Pérez *et al.* (2023) mencionan que la fitotoxicidad depende fuertemente de la concentración y la especie vegetal, lo cual se refleja también en nuestro estudio, donde bajas concentraciones o combinaciones con biochar parecen ser menos dañinas o incluso neutras, mientras que altas concentraciones resultan en toxicidad.

En la variable plántulas anormales, el tratamiento 2 (ajo 0.1%) presentó un mayor porcentaje de plántulas anormales con un 82.20% clasificándose en el grupo A, mientras que el tratamiento 3 (ajo 0.2%) obtuvo un porcentaje de 60 % formando el grupo B y el tratamiento 8 (ajo 5% + biochar 5%) con 44.44% colocándose en el grupo C. Los tratamientos 4 (ajo 0.3%), 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%) presentaron los valores más bajos formando el grupo estadístico F.

Estos resultados muestran evidencia de que los tratamientos tuvieron un efecto diferente en las semillas de ejote, al producir altos porcentajes de plántulas anormales en los tratamientos de ajo más el biochar, coincidiendo con algunos estudios que demostraron que el biochar, derivado de residuos agrícolas como maíz puede llegar a modificar el pH y la disponibilidad de nutrientes, además de adsorber compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, como es el caso del esquilmado de ajo (Lehmann y Joseph, 2015).

Por consiguiente, en la variable semillas sin germinar, los tratamientos con menores afectaciones fueron, el tratamiento 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) con 0%, seguido del tratamiento 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) con 2.23%, ambos pertenecientes a los grupos estadísticos E y F, respectivamente.

Por otro lado, los tratamientos con mayor cantidad de semillas sin germinar fueron: 11 (ajo 20% + biochar 30%) con 100.00%, 4 (ajo 0.3%) con 92.23% y 9 (ajo 10% + biochar 10%) con 83.30%, pudiendo haber sido afectadas por la concentración de los ingredientes de los tratamientos, ya que algunos estudios han demostrado que, aunque el extracto de ajo puede tener efectos benéficos contra patógenos, en concentraciones elevadas causa estrés en las semillas (Martínez-Téllez *et al.*, 2018).



Figura 4.5 Semillas sin germinar en ejote



Figura 4.6 Plántulas anormales en ejote

En los resultados de la comparación para el primer conteo (Cuadro 4.4), indica que, en la germinación temprana, los tratamientos 6 (biochar 10%), 7 (biochar 15%) y 8 (ajo 5% + biochar 5%) presentaron valores de 21.10, 16.66 y 24.43% cada uno, agrupados en el grupo A, siendo los más altos porcentajes en esta prueba; sin embargo, el resto de los tratamientos no mostraron respuesta (0 %); lo que confirma el efecto de fitotoxicidad del ajo en la germinación de las semillas de ejote.

Cuadro 4.4 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de ejote en las variables de vigor.

Tratamientos	PC (%)	IVE (pl/día) *	IVG (PN/día) **	LMH (cm/pl)	LMR (cm/pl)
1. Testigo – agua destilada	0.00 B	24.83 A	3.86 A	14.90 A	17.33 A
2. Ajo 0.1%	0.00 B	20.56 BC	2.86 BC	0.83 E	1.26 E
3. Ajo 0.2%	0.00 B	2.60 F	2.60 C	0.00 E	0.00 E
4. Ajo 0.3%	0.00 B	0.06 F	0.06 E	0.00 E	0.00 E
5. Biochar 5%	0.00 B	26.60 A	3.13 BC	15.53 A	14.86 B
6. Biochar 10%	21.10 A	21.73 B	3.36 AB	15.83 A	12.53 C
7. Biochar 15%	16.66 A	17.86 C	2.86 BC	15.13 A	13.16 C
8. Ajo 5% + Biochar 5%	24.43 A	7.13 E	2.56 C	3.03 D	2.56 D
9. Ajo 10% + Biochar 10%	0.00 B	0.00 F	0.00 E	0.00 E	0.00 E
10. Ajo 2.5% + Biochar 6%	0.00 B	17.86 C	2.70 C	7.50 C	8.40 C
11. Ajo 20% + Biochar 30%	0.00 B	0.00 F	0.00 E	0.00 E	0.00 E
12. Ajo 1% + Biochar 2.3%	0.00 B	13.16 D	1.60 D	12.53 B	13.63 C

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (DMS al 0.05 de probabilidad).

*Plántulas emergidas por día (pl/día); Plántulas normales por día (PN/día). PC= Primer Conteo (%); IVE= índice de velocidad de emergencia (pl/día), IVG= índice de velocidad de germinación (PN/día), LMH= longitud media de hipocótilo (cm/pl), LMR= Longitud media de radícula (cm/pl).

En la variable de índice de velocidad de emergencia el grupo A formado por los tratamientos 5 (biochar 5 %) y 1 (testigo) tuvieron valores de 26.60 y 24.83 plántulas por día (Cuadro 4.4). El uso de biochar mejoró posiblemente la estructura del sustrato, favoreciendo el crecimiento radicular, el vigor, la actividad promotora y proporcionar de nutrientes a las plántulas, como lo reporta Llorach-Massana *et al.* (2017) en cultivos hortícolas, por tal motivo, los resultados en este estudio mostraron superar al testigo en la emergencia de estructuras vegetales; seguidos los tratamientos 6 (biochar 10%) y 2 (ajo 0.1%), al presentar de 21.73 y 20.56 plántulas por día, formando los grupos B y C.

Estos resultados reflejan una posible respuesta positiva en la velocidad de emisión de la estructura vegetal de la especie, siendo desde 13.2 hasta 26.6 estructuras emergida por día, como se muestra en la Figura 4.7. Lo anterior, puede deberse a que el ajo en concentraciones bajas puede actuar como bioestimulante induciendo

respuestas fisiológicas que favorecen la germinación y el crecimiento temprano de plántulas (Raskin, 1992)., como lo reflejó el tratamiento 2 (ajo 0.1%). En cambio, a concentraciones altas, existió un efecto negativo como fueron los tratamientos 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%) al no obtener emergencias.



Figura 4.7 Evaluación de ejote en la prueba de vigor índice de velocidad de emergencia con tratamientos de esquilmo de ajo y biochar.

En la comparación de medias en evaluación de la rapidez de germinación de esta especie, señalada como índice de velocidad en el Cuadro 4.4, mostró al tratamiento 1 (testigo) con mayor valor con 3.86 plántulas normales por día, formando el grupo A, seguidos los tratamientos 6 (biochar 10%) y 5 (biochar 5%) con 3.36 y 3.13 plántulas normales por día, dados en el grupo AB; lo que confirma nuevamente la actividad promotora de germinación como lo menciona Llorach-Massana *et al.* (2017), y como era de esperar, los tratamientos 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%) tuvieron un índice nulo de germinación, debido a la fitotoxicidad de las altas concentraciones de ajo.

Por último, en las variables de longitud media de hipocótilo y de radícula (Figura 4.8), los tratamientos 1 (testigo), 5 (biochar 5%), 6 (biochar 10%) y 7 (biochar 15%), fueron los más efectivos en ambas variables, formaron los grupos A, B y C, reafirmando lo reportado por Llorach-Massana *et al.* (2017), donde el biochar mejoró

significativamente la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo el crecimiento radicular y el vigor de las plántulas en cultivos hortícolas.

En cambio los tratamientos 2 (ajo 0.1%), 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.3%), 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%) no favorecieron el crecimiento de la plántula con nulo crecimiento, esto debido a factores como la calidad de las semillas, toxicidad del esquilmo de ajo, condiciones no favorables o hasta la combinación del esquilmo de ajo con el biochar, lo que juego un papel fundamental para el resultado final obtenido, al producir posiblemente un estrés en el crecimiento de la plántula como lo menciona Martínez-Téllez *et al.* (2018).



Figura 4.8 Respuesta de las pruebas de vigor longitud media de hipocótilo y radícula en ejote.

Especie espinaca (*Spinacia oleracea*)

Análisis de varianza.

En los resultados de la evaluación de la especie espinaca, el análisis estadístico encontró diferentes respuestas fisiológicas en la aplicación de los tratamientos de este estudio (Cuadro 4.5), teniendo en la diferencia altamente significativa ($<.01\%$) en las tres variables estudiadas. La velocidad de germinación se presentó con una media general baja de 23.52%, por este valor se puede señalar que los tratamientos provocaron efectos negativos para una buena germinación (Figura 4.9).



Figura 4.9 Evaluación de la variable de germinación a los 7 dds de semillas de espinaca.

Cuadro 4.5 Cuadrados medios y nivel de significancia en la capacidad de germinación aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca.

Fuente de variación	GL	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
Tratamientos	11	2472.95 **	431.39 **	3960.87 **
Repetición	2	87.47	16.21	43.19
Error Experimental		66.77	27.22	64.42
Media		23.52	12.31	55.37
R ²		0.94	0.88	0.96
CV (%)		34.73	42.36	14.49
Desv. Est.		±8.17	±5.21	±8.02

*Significativo, ** altamente significativo, ^{NS} No significativo, P: 0.05, 0.01; GL= grados de Libertad; GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; R²= Índice de determinación; CV= Coeficiente de variación; Desv. Est. = Desviación estándar.

En cuanto a la variable de plántulas anormales obtuvo un promedio de 12.31%, con un Coeficiente de Variación elevado de 42.36% y un Coeficiente de determinación de 94%, lo que indica una elevada dispersión de los datos registrados del experimento, sobre todo por las diferentes respuestas a los tratamientos, al causar en anomalías en las plántulas germinadas e inclusive reflejar un efecto nocivo de malformaciones en la germinación de esta especie.

Dado el efecto anterior en las plántulas anormales, era de esperar que en la variable semillas sin germinar (Cuadro 4.5), se tuvieran valores elevados en el daño, reportando hasta un promedio alto de 55.37 % en esta variable, siendo más de la mitad de las semillas sembradas en el estudio. Estos resultados posiblemente fueron causados por varios aspectos, los tratamientos causaron cierta toxicidad a la semilla, la baja calidad fisiológica de la misma o las condiciones de germinación no fueron las adecuadas Figura 4.10 y 4.11.



Figura 4.10 Respuesta de plántulas anormales de semillas de espinaca.



Figura 4.11 Semillas sin germinar de espinaca.

Con respecto a la variable de índice de velocidad de emergencia, se obtuvieron en promedio 3.88 plántulas por día, lo que quiere decir que se necesitan casi 25 días para obtener un 100% de emergencia de esta semilla, lo que indica una emergencia muy lenta, cabe señalar que la evaluación de esta variable, solo interpreta la emergencia de alguna estructura vegetal de la semilla y es inconsistente mencionar que se tuvieron efectos positivos en la aplicación de tratamientos Figura 4.12.



Figura 4.12 Respuesta de vigor en la prueba índice de velocidad de emergencia en espinaca.

Cuadro 4.6 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor aplicando tratamientos a base de esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca.

Fuente de variación	IVE (PI/día)	IVG (PN/día)	LMH (cm/pl)	LMR (cm/pl)
Tratamientos	55.21 **	4.59 **	11.89 **	20.62 **
Repetición	2.58	0.002	0.07	0.35
Error Experimental	0.92	0.08	0.15	0.10
Media	3.88	1.37	1.69	2.19
R ²	0.96	0.96	0.97	0.99
CV (%)	24.71	20.85	22.98	14.51
Desv. Est.	±0.95	±0.28	±0.38	±0.31

*Significativo, ** altamente significativo, ^{NS} No significativo, P: 0.05, 0.01; gL= grados de Libertad; PC= primer conteo de plántulas normales; IVE= Índice de velocidad emergencia; IVG= Índice de velocidad de germinación; LMH= Longitud media de hipocótilo; LMR= Longitud media de radícula; R²= Índice de determinación; CV= Coeficiente de variación; Desv. Est. = Desviación estándar.

Con respecto a las variables de vigor (Cuadro 4.6), se observaron diferencias altamente significativas (<.01%) en todas las variables medidas (IVE, IVG, LMH, LMR). El índice de velocidad de germinación presento una variación del 20.85% y una R² de 96%, siendo este un resultado confiable, teniendo una media general de 1.37 plántulas normales por día, siendo la mitad del valor de la variable anterior, lo que indica que el vigor de esta especie efectivamente es bajo; las semillas que lograron emerger (IVE) tuvieron un crecimiento general muy lento y no llegaron a ser plántulas normales, de tal forma que era de esperarse que ambas pruebas resultaran en la misma tendencia a la baja en velocidad.

La variable de longitud media de hipocótilo mostró una media de 1.69 cm/plántula (Cuadro 4.6 y Figura 4.13), la cual se debió al lento crecimiento de la plántula por efecto de los tratamientos, reportando un Coeficiente de determinación de 97% (R^2), lo que indica que se tiene una buena proporción de la variación de respuesta del LMH por la aplicación de los tratamientos; resultando una Desviación Estándar de ± 0.38 , marcando que las respuestas emitidas de los tratamientos reflejan una dispersión muy cercana a la media.

Asimismo, en la variable longitud media de radícula indica que hubo una media de 2.19 cm/ plántulas lo cual es bajo.

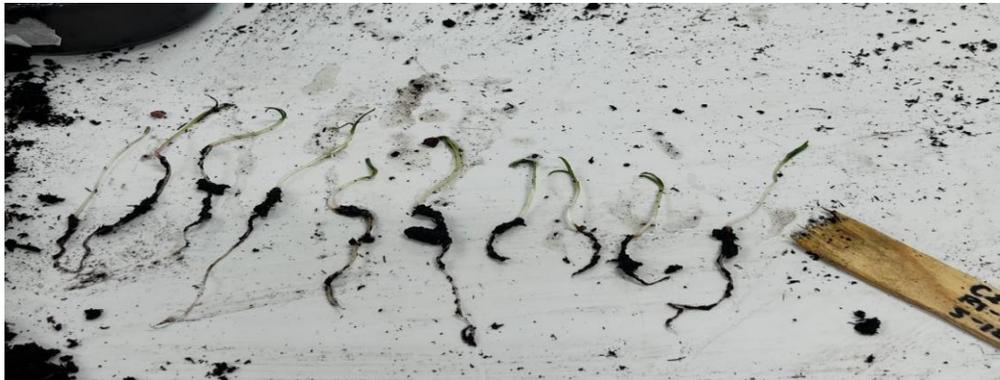


Figura 4.13 Respuesta de las pruebas de vigor índice de velocidad de germinación en plántulas normales, longitud media de hipocótilo y radícula en semillas de espinaca.



Figura 4.14 Respuesta de plántulas normales de la variable germinación en semillas de espinaca.

Pruebas de medias.

Con respecto a la prueba de comparación de medias la especie de espinaca se observa que en la variable de germinación, los mejores promedios fueron para el tratamiento 1(testigo) con 80% ubicándose en el grupo estadístico A; seguidos los tratamientos 12 (ajo 1% + biochar 2.3%), 6 (biochar 10%) y 7 (biochar 15%) con porcentajes de 56.67, 47.80 y 43.33, respectivamente, formando el grupo B; mientras que los tratamientos 2 (ajo 0.1%), 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.3%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%), presentaron los valores más bajos porcentajes formando el grupo estadístico D.

Cuadro 4.7 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de espinaca en las variables de capacidad de germinación.

Tratamientos	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
1. Testigo – agua destilada	80.00 A	6.66 EF	13.33 EF
2. Ajo 0.1%	12.23 D	38.90 A	48.90 C
3. Ajo 0.2%	0.00 D	12.20 CDE	87.80 AB
4. Ajo 0.3%	0.00 D	0.00 F	100.00 A
5. Biochar 5%	42.23 C	26.66 B	31.13 D
6. Biochar 10%	47.80 BC	13.33 CDE	38.90 DC
7. Biochar 15%	43.33 BC	20.00 BC	36.63 DC
8. Ajo 5% + Biochar 5%	0.00 D	16.66 CD	83.33 B
9. Ajo 10% + Biochar 10%	0.00 D	2.23 F	97.76 A
10. Ajo 2.5% + Biochar 6%	0.00 D	0.00 F	0.00 F
11. Ajo 20% + Biochar 30%	0.00 D	0.00 F	100.00 A
12. Ajo 1% + Biochar 2.3%	56.66 B	11.10 DE	26.66 DE

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (DMS al 0.05 de probabilidad). GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar.

Este comportamiento puede explicarse por la posible fitotoxicidad de los compuestos sulfurados del ajo, que inhiben procesos metabólicos fundamentales durante la germinación. En este sentido, Juárez-Segovia *et al.* (2017) reportaron efectos similares al aplicar extractos de ajo, observando inhibición del desarrollo en varios cultivos debido a su acción alelopática, ya que la planta libera compuestos

químicos que afecta el crecimiento o desarrollo de plantas cercanas., Además, este mismo patrón se evidenció en el ejote, donde dichos tratamientos también provocaron germinación nula o muy baja, lo que confirma la respuesta negativa en distintas especies ante el extracto de ajo.

Del mismo modo, para la variable de plántulas anormales figura 4.15, indica que el tratamiento 2 (ajo 0.1%) presentó el porcentaje más alto con 38.90% de plántulas anormales, ubicándose en el grupo A, después el tratamiento 5 (biochar 5 %) con 26.67% y el 7 (biochar 15%) con 20.00% formando los grupos B y C mostraron un resultado moderado, resultados similares fueron reportados por Herrera *et al.* (2018), quienes observaron que concentraciones altas de biochar derivado de biomasa residual pueden limitar la emergencia y desarrollo de plántulas debido a la liberación de compuestos tóxicos o alteraciones en la disponibilidad de nutrientes.

Por su parte, los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 6 (biochar 10%), 8 (ajo 5% + biochar 5%) y 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) mostraron valores entre el 11.10% y 16.67% agrupándose en C D E y D E reflejando niveles bajos de plántulas anormales, tal como en los tratamientos 1 (testigo), 4 (ajo 0.3%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%) presentaron los valores más bajos con 0.00 y 6.67% ubicándose en los últimos grupos E F y F.

La combinación de extractos de ajo y biochar en ciertos tratamientos pareció potenciar el efecto fitotóxico, presentando incluso mayor incidencia de plántulas anormales, lo cual podría deberse a una sinergia entre compuestos bioactivos del ajo y elementos liberados por el biochar que afectan negativamente la fisiología de las semillas como lo menciona Urriola *et al.*, 2022.

La comparación de medias para la variable de semillas sin germinar mostró que los tratamientos 4 (ajo 0.3%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), y 11 (ajo 20% + biochar 30%) presentaron los valores más altos desde 97.99 % (tratamiento 9) hasta de 100.00% (tratamientos 4 y 11), agrupados en el grupo A, seguidos el tratamiento 3 (ajo 0.2%) y 8 (ajo 5% + biochar 5%) con 87.80 y 83.33%, respectivamente y formando los grupos AB y B. Mientras que los tratamientos 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) y 1 (testigo) obtuvieron 26.67 y 13.33%, cada uno agrupados en el D y por último el tratamiento

10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) resultó con 0% de semillas sin germinar, en el grupo F; siendo el tratamiento menormente afectado en esta variable, incluyéndose los tratamientos 1 y 12 que fueron de los menores porcentajes.

La respuesta de estos tratamientos reafirma que la aplicación de altas concentraciones de ajo puede resultar contraproducente, específicamente, al encontrar efectos fitotóxicos que inhiben tanto la germinación como el desarrollo radicular, afirmado por Ruíz de León (2008), quienes mencionan que estos efectos son atribuidos a la acumulación de compuestos alelopáticos que alteran el entorno químico del sustrato; inclusive que a pesar de que posee reconocidas propiedades antimicrobianas, en ocasiones al aplicarlo en dosis bajas se puede considerar como un bioestimulante, favoreciendo la emergencia de las plántulas, efecto que no se logró obtener en este estudio.



Figura 4.15 Respuesta de plántulas anormales en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca.

La respuesta de estos tratamientos reafirma que la aplicación de altas concentraciones de ajo puede resultar contraproducente, específicamente, al encontrar efectos fitotóxicos que inhiben tanto la germinación como el desarrollo radicular, afirmado por Ruíz de León (2008), quienes mencionan que estos efectos son atribuidos a la acumulación de compuestos alelopáticos que alteran el entorno químico del sustrato; inclusive que a pesar de que posee reconocidas propiedades antimicrobianas, en ocasiones al aplicarlo en dosis bajas se puede considerar como

un bioestimulante, favoreciendo la emergencia de las plántulas, efecto que no se logró obtener en este estudio.



Figura 4.16 Respuesta de semillas sin germinar en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de espinaca en espinaca.

Este efecto se reflejó en las respuestas de las pruebas de vigor, en la variable índice de velocidad de emergencia, como muestra en el Cuadro 4.8, el tratamiento 1 (testigo) presentó el valor más alto con 13.03 plántulas emergidas por día, ubicándose en el grupo A, teniendo la mayor emergencia entre los tratamientos, seguido el tratamiento 5 (biochar 5 %) con 8.20 plántulas emergidas por día en el grupo B, y luego los tratamientos 6 (biochar 10%), 7 (biochar 15%) y 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) con 6.87, 7.2 y 6.0 plántulas emergidas por día, formando los grupos BC y C; en cambio, los tratamientos 2 (ajo 0.1%) y 8 (ajo 5% + biochar 5%) obtuvieron emergencias de 2.83 y 1.86 plántulas por día, siendo mucho más lenta su respuesta, ubicados en los grupos D y DE. Sin embargo, se logra evidenciar que el biochar puede llegar a funcionar como un apoyo en el desarrollo de las plántulas, como lo menciona Llorach-Massana *et al.* (2017).

Cuadro 4.8 Resultados de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de espinaca en las variables de vigor.

Tratamientos	IVE (Plántulas/día)	IVG (Plántulas normales/día)	LMH (Cm/plántula)	LMR (Cm/plántula)
1. Testigo – agua destilada	13.03 A	2.86 A	3.63 A	6.06 A
2. Ajo 0.1%	2.83 D	2.20 B	0.66 B	0.70 E
3. Ajo 0.2%	0.53 EF	0.53 DC	0.00 C	0.00 E
4. Ajo 0.3%	0.00 F	0.00 E	0.00 C	0.00 F
5. Biochar 5%	8.20 B	2.63 AB	4.03 A	5.30 B
6. Biochar 10%	6.86 BC	2.23 B	4.13 A	5.10 BC
7. Biochar 15%	7.16 BC	2.43 AB	4.20 A	4.50 D
8. Ajo 5% + Biochar 5%	1.86 DE	0.70 C	0.00 C	0.00 F
9. Ajo 10% + Biochar 10%	0.10 F	0.10 DE	0.00 C	0.00 F
10. Ajo 2.5% + Biochar 6%	0.00 F	0.00 E	0.00 C	0.00 F
11. Ajo 20% + Biochar 30%	0.00 F	0.00 E	0.00 C	0.00 F
12. Ajo 1% + Biochar 2.3%	6.00 C	2.89 A	3.66 A	4.66 CD

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (DMS al 0.05 de probabilidad).
*Plántulas emergidas por día (PI/día); Plántulas normales por día (PN/día).

Sin embargo, al ser combinados con el esquilmo de ajo como los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 4 (ajo 0.3%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%) pueden afectar la velocidad de emergencia, ya que obtuvieron valores desde 0.53 hasta 0 plántulas emergidas por día, estando en el grupo EF y F; lo que demuestra que a concentraciones altas de esquilmo de ajo, en combinación con biochar puede llegar a afectar la respuesta de emergencia; y por otro lado, el aplicar concentraciones altas de ajo llega ocasionar toxicidad en la semilla y presentar un efecto negativo en el desarrollo de las plántulas (Ruiz de León, 2008), como evidenciaron los tratamientos 9, 10 y 11 al ubicarse en los últimos grupos estadísticos (Cuadro 4.8).

Con respecto a la variable índice de velocidad de germinación, la prueba de comparación de medias entre los tratamientos indicaron diferencias estadísticas, posicionándose en el grupo A los tratamientos 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) y el

tratamiento 1 (testigo) valores de 2.89 y 2.86 plántulas normales al día, respectivamente; posiblemente al observar que el tratamiento 12 superó en poco al testigo, se pudiera decir que por aplicar en el tratamiento 12 una concentración de biochar mayor y menor de ajo, se logró tener un efecto positivo evitando algún efecto de toxicidad del esquilmo de ajo; siguiendo con este mismo efecto los tratamientos 5 (biochar 5 %), 6 (biochar 10%) y 2 (ajo 0.1%) obtuvieron valores desde 2.20 a 2.63 plántulas normales por día, agrupados en AB y B, con velocidades ligeramente menores a los tratamientos del grupo A (Cuadro 4.8); coincidiendo con Raskin (1992) y Ruiz de León (2008), a bajas dosis de ajo puede llegar a generar un buen desarrollo de las plántulas. Sin embargo, es de considerar la calidad fisiológica inicial de la semilla de espinaca, caso fue en este estudio donde se tuvo una baja germinación inicial de 76 %, lo que era de esperarse que la semilla presentará un bajo vigor.

Así mismo, el resto de los tratamientos obtuvieron valores muy bajos en esta variable desde 0 hasta 0.70 plántulas normales por día, agrupados desde CD hasta E, lo que representa los tratamientos causaron un efecto negativo y posiblemente fitotóxico a la semilla de espinaca sin lograr obtener una velocidad de germinación de plántulas normales; este efecto coincide con Urriola *et al.* (2022), que encontraron en tratamientos sin o con dosis bajas de extractos vegetales (biochar) lograron obtener efectos moderadamente positivos con una germinación más vigorosa y rápida en cultivos como lechuga y ejote; mientras que a concentraciones altas de extracto de ajo causaron inhibición por su fitotoxicidad de manera general.

Con respecto a la variable longitud media de hipocótilo se identificaron diferencias notables entre los tratamientos, teniendo los tratamientos 6 (biochar 10%), 7 (biochar 15%), 5 (biochar 5 %), 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) y 1 (testigo) con longitudes desde 3.63 a 4.20 cm por plántula, formando el grupo A, donde 7 resultó con el mayor valor; reafirmando lo que mencionó Llorach-Massana *et al.*, (2017), el biochar mejora la estructura del sustrato favoreciendo el crecimiento en plántulas hortícolas, indicando que estos tratamientos fueron altamente efectivos para promover el crecimiento del hipocótilo; en cambio el aumento del esquilmo de ajo

causó alta toxicidad hasta llegar a inhibir completamente el crecimiento de las plántulas (Pérez *et al.*, 2023), al no obtener respuesta de longitud del hipocótilo, aunado factores relacionados con la calidad fisiológica inicial de la semilla y posibles mecanismos de inhibición fisiológica, como resultó en los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%), y 11 (ajo 20% + biochar 30%) con un valor de 0 cm/plántula, agrupados en el grupo C.

Por último, en la comparación de medias de la variable longitud media de radícula (Figura 4.17), el tratamiento 1 (testigo) obtuvo el mayor valor con 6.06 cm/plántula, ubicado en el grupo estadístico A (Cuadro 4.8); lo que indica que presentaba un buen crecimiento radicular sin la aplicación de tratamientos, en seguida resultó el tratamiento 5 (biochar 5 %) alcanzando 5.30 cm/plántula en el grupo B, y luego el tratamiento 6 (biochar 10%) con 5.10 cm/plántula.



Figura 4.17 Respuesta de las pruebas de vigor en longitud media de hipocótilo y radícula en semillas de espinaca.

En cambio, al aplicar concentraciones elevadas y combinadas con el esquileo de ajo, causa el efecto contrario, como fueron los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%), y 11 (ajo 20% + biochar 30%) con una nula respuesta de longitud de radícula por no tener plántulas normales en la prueba, no habiendo estímulo de desarrollo causado por compuestos sulfurados presentes en el ajo, como la alicina, que tiene un efecto fitotóxico que interfiere en el desarrollo de las raíces (Anaya *et al.*, 2018).

Especie rábano (*Raphanus sativus*)

Análisis de varianza

En los resultados del análisis de varianza en la especie de rábano se encontró en la prueba de germinación diferencias altamente significativas ($<.01$ %) entre los tratamientos aplicados en las variables Capacidad de germinación de plántulas normales y semillas sin germinar. La capacidad de germinación presentó un coeficiente de variación de 23.57% y un 96% de eficiencia en las respuestas de tratamientos, mostrados en el Cuadro 4.9, teniendo una media general de 35.18% considerado muy bajo (Figura 4.18).



Figura 4.18 Plántulas normales en variables de germinación.

Como se ha venido mencionando, los resultados bajos de germinación fueron evidencia en el efecto de los tratamientos en las especies hortícolas estudiadas, debido posiblemente a una mala calidad fisiológica inicial de las semillas ya efectos tóxicos de los tratamientos, por posibles problemas de absorción de agua o inhibidores en las semillas.

Cuadro 4.9 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor y germinación de rábano con diferentes aplicaciones de extracto de ajo y biochar.

Fuente de Variación	GL	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
Tratamientos	11	4083.08 **	254.23 ^{ns}	4081.00 **
Repetición	2	123.21	6.49	74.48
Error Experimental		68.78	55.65	106.75
Media		35.18	11.66	53.14
R ²		0.96	0.69	0.95
CV (%)		23.57	63.94	19.44
Desv. Est.		±8.29	±7.46	±10.33

*Significativo, ** altamente significativo, ^{NS} No significativo, P: 0.05, 0.01; GL= grados de Libertad; GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; R²= Índice de determinación; CV= Coeficiente de variación; Desv. Est. = Desviación estándar.

Los resultados anteriores se confirman por la respuesta emitida en la variable plántulas anormales, al no presentar diferencias significativas con una media general de 11.66%, siendo un elevado nivel de anomalías y por tener bajo porcentaje de germinación(Cuadro 4.9 y Figura 4.19); lo que permite detectar el efecto negativo de los tratamientos, ya que se buscaba que la mayoría de las plántulas fueran normales y por ende con alta germinación, sin embargo, los datos registrados en la prueba mostraron una alta dispersión de 63.94% (CV) y una R² de 69%.



Figura 4.19 Respuesta de plántulas anormales en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.

En cuanto a la variable de semillas sin germinar (Cuadro 4.9), se observó un promedio de 53.14%, más de la mitad de las semillas sembradas no llegaron a generar estructuras vegetales, ni evidencia metabólica, teniendo un Coeficiente de Variación de 19.4%; se reafirma la respuesta toxica de los tratamientos en las semillas de rábano de este estudio (Figura 4.20).



Figura 4.20 Respuesta de semillas sin germinar en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.

Sin embargo, los tratamientos presentaron diferente respuesta en la variable de vigor en primer conteo (Cuadro 4.10), siendo altamente significativo ($<.01\%$), con promedio general de 11.30% de plántulas normales a los cuatro días, indicando que las semillas de rábano, al inicio de la germinación tuvieron un efecto positivo, pero con el tiempo de exposición a la alicina del ajo, tuvo un evidente efecto fitotóxico en las semillas, lo que representó una variabilidad de respuesta muy similar entre los tratamientos al tener un Coeficiente de Variación baja de 3.99% y una R^2 de 97%. (Cuadro 4.10)

Cuadro 4.10 Cuadrados medios y nivel de significancia en las diferentes pruebas de vigor y germinación de rábano con diferentes aplicaciones de extracto de ajo y biochar.

Fuente de variación	GL	Primer conteo (%)	IVE (Plántulas /día)	IVG (PN /día)	LMH (cm/pl)	LMR (cm/pl)
Tratamientos	11	1379.05**	232.16**	5.31 **	46.10 **	30.48**
Repetición	2	45.54	5.24	0.45	0.64	1.65
Error Experimental		15.99	13.18	0.19	0.28	1.02
Media		11.30	9.35	1.69	3.66	2.95
R ²		0.97	0.89	0.93	0.98	0.93
CV		35.38	38.80	25.88	14.65	34.25
Desv. Est.		±3.99	±3.63	±0.43	±0.53	±1.01

*Significativo, ** altamente significativo, ^{NS} No significativo, P: 0.05, 0.01; GL= grados de Libertad; GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; R²= Índice de determinación; CV= Coeficiente de variación; Desv. Est. = Desviación estándar.

La variable de índice de velocidad de emergencia obtuvo diferencias altamente significativas de <.01%, con un promedio de 9.35 plántulas por día (Cuadro 4.10), siendo relativamente bajo, pero mayor en comparación de las especies de ejote y espinaca anteriormente mencionadas en este estudio, ya que se tiene la posibilidad de establecer este cultivo en menor tiempo. Lo que refleja que posiblemente los efectos de toxicidad fueron menos agresivos en esta especie.



Figura 4.21 Respuesta del índice de velocidad de emergencia en semillas de rábano.

Con respecto a la variable índice de velocidad de germinación, mostrada en el Cuadro 4.10, se encontraron diferencias altamente significativas (<.01%) en los tratamientos, teniendo una media general baja de 1.69 plántulas normales por día, señalando que, la posible respuesta que se obtuvo del IVE, no llegó a consolidarse como plántulas normales, siendo un factor determinante en el establecimiento de un cultivo, debido probablemente al efecto de los tratamientos, así como de la calidad fisiológica de las semillas de rábano.

Por otro lado, en la variable de longitud media de hipocótilo, el análisis de varianza también resultó con una diferencia altamente significativa, lo que indica que al menos uno de los tratamientos generó una respuesta diferente al resto de ellos, teniendo una media de 3.66 cm/plántula (Cuadro 4.10 y Figura 4.22); además de presentar un Coeficiente de Variación de 14.65% y una Desviación Estándar de ± 0.53 mostrando una baja variabilidad de los datos con respecto a la media.

Igualmente, el análisis estadístico para la longitud media de radícula encontró diferencias altamente significativas, con un promedio de 2.95 cm por día, como se observa en el Cuadro 4.10 y Figura 4.22, siendo un desarrollo limitado en la radícula de esta especie; como se ha venido observando, existieron factores influyentes en las respuestas del estudio, desde la calidad de la semilla, el tipo y concentración del tratamiento aplicado, hasta las condiciones para la especie como la humedad del sustrato, la aireación o incluso la manipulación.



Figura 4.22 Respuesta de las variables de Longitud media de hipocótilo y radícula en semillas de rábano.

Prueba de medias.

En el Cuadro 4.11, se muestran los resultados de la prueba de comparación de medias, indicando la formación de los grupos estadísticos entre los tratamientos estudiados, para la variable de germinación Figura 4.23, el tratamiento 1 (testigo) mostró el porcentaje más alto con 83.33%, ubicado en el grupo A, indicando que la calidad fisiológica inicial de la semilla de rábano fue superior a las otras especies del estudio, además los resultados fueron coherentes al no aplicar tratamientos de extractos vegetales, se logró obtener buena germinación, coincidiendo con Ali *et al.* (2023), al demostrar que sin estrés por biochar, ni extractos se alcanzan alta germinación en semillas de maíz y trigo.

La prueba mostró que los tratamientos 2 (ajo 0.1%) y 12 (ajo 1% + biochar 2.3%), presentaron porcentajes de 74.43 y 78.90 %, respectivamente, ubicados en el grupo AB, los resultados confirman que extractos de ajo a concentraciones bajas ayuda a mejorar el porcentaje de germinación (Solaiman *et al.*, 2012).

El mismo biochar a dosis bajas puede actuar como acondicionador del sustrato, retención de agua, aireación (Lehmann y Joseph, 2015) y promotor de la germinación (Solaiman *et al.*, 2012), así como el ajo puede causar estrés en las plántulas y el biochar tiene la capacidad de adsorber y reducir la toxicidad de ciertos compuestos, por lo que puede mejorar la calidad del sustrato y favorecer a las plántulas en ciertas especies de hortalizas como en este caso el rábano, pudiendo probarse en brassicas (Jeffery *et al.*, 2011).

En cambio, los tratamientos del grupo E, resultaron con germinaciones cercana del 0 % (Cuadro 4.11), como fueron el tratamiento 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11 (ajo 20% + biochar 30%); afirmando la respuesta de toxicidad de los tratamientos por la

acumulación de sales o compuestos fenológicos (Solaiman *et al.*, 2012) y llegar a inhibir la germinación.



Figura 4.23 Respuesta de plántulas normales de la variable germinación en semillas de rábano.

Cuadro 4.11 Resultados de comparación estadística de medias entre tratamientos en semillas de rábano en las variables de germinación.

Tratamientos	GER (%)	PA (%)	SSG (%)
1. Testigo – agua destilada	83.33 A	6.66 CDE	10.00 DE
2. Ajo 0.1%	74.43 AB	7.76 CDE	17.80 DE
3. Ajo 0.2%	0.00 E	25.56 A	74.43 B
4. Ajo 0.3%	0.00 E	4.46 DE	95.53 A
5. Biochar 5%	67.76 BC	5.53 DE	26.66 CD
6. Biochar 10%	63.33 CD	10.00 BCDE	26.66 CD
7. Biochar 15%	50.00 D	14.46 ABCD	35.53 C
8. Ajo 5% + Biochar 5%	1.10 E	24.43 A	74.46 B
9. Ajo 10% + Biochar 10%	0.00 E	0.00 E	100.00 A
10. Ajo 2.5% + Biochar 6%	3.33 E	22.23 AB	74.43 B
11. Ajo 20% + Biochar 30%	0.00 E	0.00 E	100.00 A
12. Ajo 1% + Biochar 2.3%	78.90 AB	18.86 ABC	2.23 E

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (DMS al 0.05 de probabilidad). GER= Capacidad de germinación de plántulas normales; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar

Una evidencia del resultado anterior, como sea venido describiendo, es la variable de las plántulas anormales Figura 4.24, donde los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) obtuvieron valores desde 25.56 a 18.86% de anomalías, formando los grupos A y AB (Cuadro 4.11); reafirmando la fitotoxicidad de los tratamientos en las semillas de rábano y en la consecuencia de anomalías e inhibición en la germinación de

la aplicación y altas concentraciones de extractos vegetales, coincidiendo con diversos autores (Solaiman *et al.*, 2012; Llorach-Massana *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2023).

Por lo contrario, los tratamientos 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 10% + biochar 10%) no presentaron anomalías, clasificados en el grupo E y considerados los más efectivos en esta variable, tal respuesta posiblemente se debió a un comportamiento como lo reportan Jeffery *et al.* (2011), el biochar adsorbe y reduce la toxicidad y mejora el sustrato favoreciendo el crecimiento.

En la misma forma la variable de semillas sin germinar (Figura 4.25), como se observa en el Cuadro 4.11, los tratamientos 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 10% + biochar 10%) presentaron un efecto negativo de 100.00% de semillas sin germinar, lo cual indica que existió una total inhibición en la germinación, debido a las altas concentraciones de ajo y biochar causando el efecto fitotóxico (Solaiman *et al.*, 2012; Llorach-Massana *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2023). En cambio, el tratamiento 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) presentó un porcentaje de 2.23%, formando el último grupo estadístico E, lo cual indica que combinaciones equilibradas de ajo y biochar pueden favorecer la germinación (Asad *et al.*, 2020; Jeffery *et al.*, 2011).



Figura 4.24 Respuesta de plántulas anormales en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.



Figura 4.25 Respuesta de semillas sin germinar en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.

En cuanto a la prueba de comparación de medias entre tratamientos en las pruebas de vigor, la variable de primer conteo, Cuadro 4.12, mostró tres grupos estadísticos, donde los tratamientos 5 (biochar 5 %) y 6 (biochar 10%) obtuvieron los valores más altos de germinación temprana con 55.56 y 52.23%, reafirmando lo que ya varios autores han escrito sobre el biochar, a dosis moderadas existe mayor efecto en el crecimiento de plántulas (Lehmann y Joseph, 2015, Urriola *et al.*, 2022); seguido el tratamiento 7 (biochar 15%) que alcanzó un valor de 27.80% y se ubicó en el grupo B; en el último grupo se ubicaron el resto de los tratamientos sin valor en el primer conteo; reafirmando el efecto fitotóxico del esquilmo de ajo y la combinación del ajo más el biochar, como lo han reportado algunos autores en el uso de estos extractos (Ruíz de León 2008, Juárez-Segovia *et al.*, 2017, Pérez *et al.*, 2023).

Cuadro 4.12 Resultados del análisis estadístico de las pruebas de la prueba de comparación de medias entre tratamientos en semillas de rábano en las variables de vigor.

Tratamientos	PC (%)	IVE (pl/día) *	IVG (PN/día) **	LMH (cm/pl)	LMR (cm/pl)
1. Testigo – agua destilada	0.00 C	13.83 B	3.20 A	7.13 C	8.20 A
2. Ajo 0.1%	0.00 C	16.43 AB	2.90 A	4.96 D	5.10 BC
3. Ajo 0.2%	0.00 C	3.13 C	0.63 BCD	0.00 E	0.00 D
4. Ajo 0.3%	0.00 C	0.20 C	0.20 CD	0.00 E	0.00 D
5. Biochar 5%	55.56 A	20.60 A	2.83 A	9.06 A	6.23 B
6. Biochar 10%	52.23 A	21.80 A	3.10 A	8.63 AB	6.80 AB
7. Biochar 15%	27.80 B	16.13 AB	2.53 A	8.00 BC	4.23 C
8. Ajo 5% + Biochar 5%	0.00 C	1.36 C	1.03 B	0.10 E	0.06 D
9. Ajo 10% + Biochar 10%	0.00 C	0.00 C	0.00 D	0.00 E	0.00 D
10. Ajo 2.5% + Biochar 6%	0.00 C	2.60 C	0.90 BC	0.26 E	0.26 D
11. Ajo 20% + Biochar 30%	0.00 C	0.00 C	0.00 D	0.00 E	0.00 D
12. Ajo 1% + Biochar 2.3%	0.00 C	16.20 AB	2.96 A	5.83 D	5.50 C

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (DMS al 0.05 de probabilidad).

*Plántulas emergidas por día (pl/día); Plántulas normales por día (PN/día).

En la variable de índice de velocidad de emergencia como se muestra en el Cuadro 4.12 y Figura 4.25, la prueba de comparación reflejó tres grupos estadísticos, donde el grupo A resultó con la mejor emergencia en los tratamientos 5 (biochar 5 %) y 6 (biochar 10%) con 20.60 y 21.80 emergencia por día, respectivamente; seguidos en

alta emergencia fueron los tratamientos 2 (ajo 0.1%), 7 (biochar 15%), 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) y 1 (testigo) desde 16.43 a 16.13 emergencia por día. Estos resultados coinciden con un estudio de esquilmo de maíz al favorecer la germinación y crecimiento en lechuga y rábano (Luna, 2022).

En contraste, los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11 (ajo 10% + biochar 10%) obtuvieron emergencias muy bajas o nulas, ratificando el efecto de fitotoxicidad de concentraciones de ajo y biochar, así como la mezcla de ambos en semillas de especies hortícolas, tal como se ha descrito anteriormente.



Figura 4.25 Respuesta de índice de velocidad de emergencia en la aplicación de tratamientos esquilmo de ajo y biochar en semillas de rábano.

En el caso de la variable índice de velocidad de germinación, Cuadro 4.12, la mayor velocidad de germinación fueron los tratamientos 1 (testigo), 2 (ajo 0.1%) 5 (biochar 5 %), 6 (biochar 10%), 7 (biochar 15%) y 12 (ajo 1% + biochar 2.3%) mostraron desde 3.20 a 2.53 plántulas normales por día, formando el grupo A, siendo una velocidad relativamente baja, lo que puede indicar que a pesar de tener alta emergencia, no se logró obtener un establecimiento de plántulas normales de esta especie, ni aun en el testigo, lo que confirma que la semilla de rábano, utilizada en este estudio presentaba baja calidad fisiológica, aunado a la fitotoxicidad de los tratamientos sobre todo de biochar (Pérez *et al.*, 2023, Urriola *et al.*, 2022)

Sustentando estos efectos por el comportamiento de los tratamientos 4 (ajo 0.2%), 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 10% + biochar 10%) al no presentar un índice de velocidad de germinación, causado por las dosis elevadas de ajo que pueden ser fitotóxicas y en el caso del biochar, en dosis moderadas no alteran la velocidad de germinación, igualmente requieren un manejo cuidadoso para evitar efectos negativos en etapas tempranas y durante su desarrollo.

En el caso de la longitud media de hipocótilo, el tratamiento 5 (biochar 5 %) presento la mayor longitud con 9.06 cm/plántula, seguidos los tratamientos 6 (biochar 10%) y 7 (biochar 15%) con 8.63 y 8.00 cm/plántulas, respectivamente, ubicados en los grupos A y B, reflejando posiblemente un efecto positivo del biochar, al desarrollar un crecimiento en las plántulas, esto coincide con Luna (2022), quien encontró que el extracto de biocarbón (biochar) favorece la germinación y crecimiento en rábano y lechuga, mejorando la elongación de las plántulas por la retención de nutrientes y la estructura del sustrato; de igual manera, Palomino (2019), reportó que el biochar desarrolló plántulas vigorosas con mayor longitud de hipocótilo en rábano.

En contraste, los tratamientos 3 (ajo 0.2%) , 4 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% + biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11 (ajo 10% + biochar 10%) mostraron los valores de longitud más bajas hasta llegar a nulas, formando el grupo E, mostrando un desarrollo deficiente del hipocótilo, nuevamente confirmando el efecto fitotóxico como lo señala Mendivil-Lugo *et al.*, (2020), extractos vegetales en dosis elevadas actúan como agentes alelopáticos, agentes químicos que libera la planta y afecta el crecimiento de otras plantas cercanas.

Por último, en la variable de longitud media de radícula, el tratamiento 1 (testigo) alcanzó el mayor desarrollo de raíz con 8.20 cm/plántula, ubicado en el grupo A (Cuadro 4.12); seguidos el tratamiento 6 (biochar 10%), 5 (biochar 5 %) y 2 (ajo 0.1%) desde 6.80 a 5.10 cm/plántula, el biochar no solo mejora la estructura del sustrato, sino también estimula la actividad microbiológica benéfica y contribuye al desarrollo radicular (Fernandez-González *et al.*, 2019). Sin embargo, los tratamientos 2 (ajo 0.1%), 4 (ajo 0.2%), 8 (ajo 5% + biochar 5%), 9 (ajo 10% +

biochar 10%), 10 (ajo 2.5 % + biochar 2.5%) y 11(ajo 10% + biochar 10%) ubicados en el grupo D, presentaron un desarrollo muy lento o inexistente de radícula, por no tener germinación de plántulas; concordando con Rodríguez-López *et al.* (2020), al demostrar que extractos de compuestos fenológicos como los del ajo, pueden inhibir la elongación a altas dosis.

En general los tratamientos 5 (biochar 5 %) y 6 (biochar 10%) se destacaron como los más eficientes, ya que presentaron mejores valores en índice de velocidad de germinación, emergencia y desarrollo de plántulas en hipocótilo como en raíz, además tuvieron bajos porcentajes de semillas sin germinar y plántulas anormales, en contraste los tratamientos 3 (ajo 0.2%), 4 (ajo 0.2%), 9 (ajo 10% + biochar 10%) y 11 (ajo 10% + biochar 10%) registraron los peores resultados en casi todas las variables, indicando una germinación deficiente y escaso desarrollo de la plántula.

CONCLUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el estudio evidenció diferencias altamente significativas en la respuesta de extracto de ajo y biochar, en las especies de ejote, espinaca y rábano.

El ejote fue la especie más tolerante con buena germinación y vigor, especialmente con el tratamiento 6 (biochar al 10%), mostró buena respuesta a bajas concentraciones de ajo. Por otro lado, la espinaca presentó una respuesta intermedia a los tratamientos, tolerando combinaciones bajas, pero afectada por altas dosis de ajo; el biochar actuó como un adsorbente, mitigando la toxicidad del ajo.

El rábano fue la especie más sensible, ya que se presenta una inhibición casi total en los tratamientos con extracto de ajo respondiendo únicamente a los tratamientos 5 y 6 de biochar, se confirma que el biochar en concentraciones moderadas mejora el sustrato y favorece el desarrollo de las plántulas, mientras que el extracto de ajo en concentraciones superiores a 2.5%, tiene un efecto fitotóxico, reduciendo la germinación y el vigor.

En base a los resultados, se recomienda el uso de concentraciones moderadas de biochar y extracto de ajo para evitar efectos fitotóxicos y para promover un desarrollo eficiente en las plántulas. Del mismo modo, es necesario realizar investigaciones adicionales para determinar las dosis y combinaciones óptimas para cada especie, preferentemente en condiciones específicas para cada una de las especies.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, J., Mohammed, A. S., & Mekonnen, A. B. (2023). Biocarbón de *Prosopis juliflora* para mejorar la germinación y el crecimiento de los cultivos en suelos franco-arenosos. *Scientific World Journal*, 2023, Article 1483976. <https://doi.org/10.1155/2023/1483976>
- Anaya, M. L., Mejía-Ortiz, J., Ovando-Medina, I., Albores-Flores, V., & Salvador-Figueroa, M. (2018). Efecto de extractos alcohólicos de ajo (*Allium sativum*) y clavo (*Syzygium aromaticum*) en el desarrollo de *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(3), 379–393. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61257782002>
- Anza Cruz, H. G., Ramírez González, S. I., López Báez, O., & Espinoza Zaragoza, S. (2023). Fitotoxicidad de extractos vegetales en la germinación de semillas y desarrollo inicial de plantas mono y dicotiledóneas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 12(32), Artículo 338. <https://doi.org/10.31644/IMASD.32.2023.a07>
- Arroyo Cossio, J., Avendaño Ruiz, D., & González Rodríguez, Z. (2020). Probabilidad de adopción de inocuidad en la producción de frutas y hortalizas orgánicas de México. *ASyD*, 17, 57–70. Universidad Autónoma de Baja California.
- Asad, S., Aslam, M., Farooq, M., & Hussain, M. (2020). Allelopathic effects of aqueous extracts of different plants on seed germination and seedling growth of wheat. *Plants*, 9(9), 1211. <https://doi.org/10.3390/plants9091211>
- Bergman, K. (2022). *Biochar as a soil amendment offers multiple benefits for climate, soil health, and water quality*. Center for Rural Affairs (CFRA). <https://www.cfra.org/es/blog/biochar-soil-amendment-offers-multiple-benefits-climate-soil-health-and-water-quality>
- Bioscience. (2017). *Bioestimulantes orgánicos para la agricultura*. Recuperado el 25 de mayo de 2025, de Futureco Bioscience: <https://www.futurecobioscience.com/cp/bioestimulantes/>

- BoosterAgro. (2022). *Vigor de la semilla: ¿realmente es tan importante?* BoosterAgro. <https://boosteragro.com/blog-esp/vigor-de-semilla/>
- Caroca, R., Zapata, N., & Vargas, M. (2016). Entre los factores ambientales que afectan la germinación de semillas. *Ciencias e Investigación Agraria*, 43(2), 123–134. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902016000200002>
- Chen López, J. (2018). La estructura del sustrato influye en la capacidad de retención de agua. *PTHorticulture*. <https://www.pthorticulture.com/es-us/centro-de-formacion/la-estructura-del-sustrato-influye-en-la-capacidad-de-retencion-de-agua>
- Chugchilan Amores, B. R., & Quishpe Guanochanga, J. A. (2024). *Evaluación de la producción y calidad de rábano con la aplicación de diferentes abonos orgánicos* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11679>
- Contreras Ortiz, Y. (2021). *Gobierno urbano: Gestión de residuos sólidos en América Latina: ¿hacia una economía circular?* Instituto de Estudios Urbanos, Universidad Nacional de Colombia. <https://ieu.unal.edu.co/wp-content/uploads/2024/09/dgu-28-gestion-residuos-alta-070422.pdf>
- Courtis, A. C. (2013). *Guía de estudio: Germinación*. Universidad Nacional del Nordeste. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/GuiadeestudioGerminacion.pdf>
- De la Cuadra, C. (1992). *Germinación, latencia y dormición de las semillas* (Hoja divulgadora 03/1992). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_03.pdf
- Diacono, M., Persiani, A., Fiore, A., Di Bene, C., Trinchera, A., Farina, R., & Montemurro, F. (2022). Recycling agricultural residues in organic farming by on-farm compost production. *Orgprints*. [practice abstract n.1 BIO4FOOD.pdf](#)

Díaz-Mota, M. de los Ángeles, García-Mateos, M. R., Martínez-Solís, J., Acosta-Ramos, M., Serrato-Cruz, M. Á., Colinas-León, M. T., & Magdaleno-Villar, J. (2017). Fitotoxicidad de los extractos de *Dieffenbachia amoena*, *Nerium oleander*, *Raphanus sativus* y *Brassica napobrassica*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 49(2), 303–318.
<https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3087>

E-commerce Agrario. (2023). *Frutas y hortalizas: ¿Conoces a los principales países productores?* E-commerce Agrario. <https://ecomercioagrario.com/frutas-y-hortalizas-conoces-a-los-principales-paises-productores/>

Escalante Rebolledo, Ariadna, Pérez López, Guadalupe, Hidalgo Moreno, Claudia, López Collado, Jorge, Campo Alves, Julio, Valtierra Pacheco, Esteban, & Etchevers Barra, Jorge D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382. Recuperado en 13 de junio de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300367&lng=es&tlng=es

FAO. (2025). *Beneficios de la agricultura de conservación*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/impact/benefits-of-ca/es/>

Fernández-González, M., Ramírez-Castañeda, A., & López-Vargas, M. (2019). Biochar y su impacto en el crecimiento radicular y microbiota del suelo. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 15(3), 89–100.

García-López, J. I., Ruiz-Torres, N. A., Lira-Saldivar, R. H., Vera-Reyes, I., & Méndez-Argüello, B. (2016). Técnicas para evaluar germinación, vigor y calidad fisiológica de semillas sometidas a dosis de nanopartículas. Centro de Investigación en Química Aplicada.
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/7724688>

- Golisano Institute for Sustainability. (2021, 20 de enero). *What is biochar and how is it made?* Rochester Institute of Technology.
<https://www.rit.edu/sustainabilityinstitute/blog/what-biochar-and-how-it-made>
- Guerena, M. (2023). *Producción orgánica de ajo, cebolla y otros alliums*. ATTRA – Agricultura Sustentable. <https://attra.ncat.org/es/publication/produccion-organica-de-ajo-cebolla-y-otros-alliums/>
- Herrera, E. L., Feijoo, C. Y., Alfaro, R., Solís, J., Gómez, M. M., Keiski, R. L., & Cruz, G. J. F. (2018). Biochar based on residual biomasses and its influence over seedling emergence and growth in vivarium of *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.13>
- Holguin A., B. J. (2021). *Respuesta agronómica del cultivo de rábano (Raphanus sativus) con diferentes sustratos orgánicos, en el Centro de Apoyo Manglaralto, UPSE de la provincia de Santa Elena* (Tesis de ingeniería agropecuaria). Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador.
<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6392/1/UPSE-TIA-2021-0103.pdf>
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Juárez-Segovia, K. G., Díaz García, E. J., Pina Canseco, M. S., Méndez López, M. D., Pérez Santiago, A. D., & Sánchez Medina, M. A. (2017). Efecto de extractos crudos de ajo (*Allium sativum*) sobre el desarrollo de *Aspergillus parasiticus* y *Aspergillus niger* in vitro. *Polibotánica*, 47, 94–107.
<https://doi.org/10.18387/polibotanica.47.8>
- Kanza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Routledge.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203762264/biochar-environmental-management-johannes-lehmann-stephen-joseph>
- Llorach-Massana, P., Lopez-Capel, E., Peña, J., Rieradevall, J., Montero, J. I., & Puy, N. (2017). Viabilidad técnica y huella de carbono de la coproducción de biocarbón con residuos de tomate. *Waste Management*, 67, 121–130.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17303422>
- Luna Martínez, M. (2022). *Efecto de extracto acuoso de biocarbón en la germinación y crecimiento de lechuga (Lactuca sativa L.) y rábano (Raphanus sativus)* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco]. Repositorio Institucional de UAM-Xochimilco.
<https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/26983>
- Manfrini, D. (2004). Aspectos a tener en cuenta: Análisis de vigor en semillas. *Revista Plan Agropecuario*, 111, 57-58.
https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R111/R111_56.pdf
- Martínez-Téllez, M. A., Corrales-Maldonado, C., Rivera-Domínguez, M., Vargas-Arispuro, I., & Arellano-Gil, M. (2018). Inducción de respuesta de defensa en plantas de tomate contra *Fusarium oxysporum* por extracto de ajo. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(3), 217-227. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-mexicana-de-fitopatologia/articulo/induccin-de-respuesta-de-defensa-en-plantas-de-tomate-contra-forl-por-extracto-de-ajo>
- Matilla, P. (2008). *Desarrollo y germinación de semillas*. Universidad Veracruzana.
<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2016/08/matilla-2008.pdf>
- Méndez-Trujillo, V., Ramos-Romero, M., González-Mendoza, D., Navarro-Ibarra, M., & Reyes-Pavón, D. (2021). Aprovechamiento de residuos de la hortaliza de ajo (*Allium sativum* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), para el desarrollo de un sazónador

bajo en sodio. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 11(1), 23–31. <https://doi.org/10.23850/24220582.6224>

Mendivil-Lugo, C., Nava-Pérez, E., Armenta-Bojórquez, A. D., Ruelas-Ayala, R. D., & Félix-Herrán, J. A. (2020). Elaboración de un abono orgánico tipo bocashi y su evaluación en la germinación y crecimiento del rábano. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora*, 22(1), 23-36. <https://www.scielo.org.mx/pdf/biotecnia/v22n1/1665-1456-biotecnia-22-01-17.pdf>

Navarro, C., Urriola, L., & Rubatino, L. (2022). Influence of organic substrates on growth variables of *Phaseolus vulgaris* L. *Revista Científica Semilla del Este*, 3(1). <https://portal.amelica.org/ameli/journal/343/3433504006/>

Neciosup, A., Cruz, J., & Lindsay, L. (2022). Aprendizaje no supervisado en la segmentación de las variables agronómicas del cultivo de *Raphanus sativus* (rábano). *Revista de Investigación Estadística*, 4(1), 1-13.

Oni, B. A., Oziegbe, O., & Olawole, O. O. (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006>

ONU Medio Ambiente. (2018). Un tercio de los residuos de América Latina y el Caribe terminan en vertederos a cielo abierto. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/un-tercio-de-los-residuos-de-america-latina-y-el-caribe>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2025). Semillas. FAO. <https://www.fao.org/seeds/es/>

Palomino Soria, L. V. (2019). *La aplicación de biochar de residuos verdes y purín de cerdo y su efecto sobre el flujo de nitrógeno para el cultivo de tres cosechas de rábano (Raphanus sativus L.) en Lurín, Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Sur]. Repositorio Institucional de la Universidad Científica del Sur. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/850>

- Panichi Guachamín, E. E. (2018). *Análisis de peligros y puntos críticos (APPCC) de agentes biológicos en la producción de hortalizas en el Distrito Metropolitano de Quito* [Tesis de licenciatura, Universidad de Los Andes (UDLA)]. Repositorio Institucional UDLA. <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/10635/1/UDLA-EC-TIB-2018-37.pdf>
- Pérez, J., Ramírez, L., & López, M. (2023). Fitotoxicidad de extractos vegetales en la germinación de semillas y desarrollo inicial de plantas mono y dicotiledóneas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 12(1), 5-15. <https://espacioimasd.unach.mx/index.php/Inicio/article/view/338>
- Pinzón-Sandoval, E. H., Munevar-García, O. E., Torres-Hernández, D. F., & Cruz-Ruiz, E. F. (2019). Efecto de una fuente alterna de fósforo en la producción de cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) bajo condiciones de campo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(2), 51-61. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2545>
- Pita Villamil, J. M., & Pérez García, F. (1998). *Hoja técnica 2090*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1998_2090.pdf
- Raskin, I. (1992). Role of salicylic acid in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 43, 439–463. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.43.060192.002255>
- Rodríguez Brizuela, E. O., & García Guillén, M. E. (2022). Efecto de tres fertilizantes orgánicos y uno sintético sobre el crecimiento y rendimiento del rábano (*Raphanus sativus* L.), finca Santa Cruz, Muelle de los Bueyes, RACCS, Nicaragua, 2021 [Tesis de ingeniería]. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/4504/>

- Rodríguez-López, J., Morales-Fernández, J., & Sánchez-Rodríguez, A. (2020). Efectos alelopáticos de extractos vegetales en cultivos hortícolas. *Agroecología y Desarrollo Sostenible*, 12(1), 23-35.
- Ruíz de León, M. T. (2008). *Promotores de la germinación y desarrollo en la semilla de ajo (Allium sativum L.) variedad Taiwán* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6270>
- SAS Institute Inc. (2009). *Base SAS® 9.1.3 Procedures Guide* (2nd ed., Vol. 4). Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schwentenius Rindermann, R., Gómez Cruz, M. Á., Ortigoza Rufino, J., & Gómez Tovar, L. (2010). Situación y desafíos del sector orgánico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(4), 593–608. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v1n4/v1n4a11.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). *Residuos sólidos urbanos (RSU)*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Anuario estadístico de la producción agrícola 2023*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. (2020). *Regla para la calificación de semilla de haba (Vicia faba L.)*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/657710/Regla-HABA-202-NEW.pdf>
- Silva, V. M. (2017). *El cultivo de las hortalizas*. Oficinas de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). Recuperado el 4 de febrero de 2025, de https://www.unodc.org/documents/bolivia/DIM_Manual_de_cultivo_de_hortalizas.pdf

- Solaiman, Z. M., Murphy, D. V., & Abbott, L. K. (2012). Biochars influence seed germination and early growth of seedlings. *Plant and Soil*, 353(1–2), 273–287. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1031-4>
- Urriola, L., Montes Castillo, K., & Díaz Vergara, M. (2022). Efecto fitotóxico de extractos diluidos de abonos orgánicos en semillas de lechuga. *Revista Semilla del Este*, 3(1). Recuperado de <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2366>
- Verheijen, F., Jeffery, S. L., Bastos, A. C., Van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). *Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions* (EUR 24099 EN). Joint Research Centre, European Commission. <https://doi.org/10.2788/472>
- Zapata Urey, F. A., & Natali, M. (2020). Determinación del sistema de producción urbana y periurbana más eficiente para la producción de hortalizas y otras especies vegetales. *Revista Compás Empresarial*, 11(31), 32–74. <https://doi.org/10.52428/20758960.v10i31.79>