

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Caracterización química de aceite esencial de *Tagetes linifolia*: pruebas *in vitro* e *in vivo* en frutos de *Fragaria* × *ananassa***Chemical characterization of *Tagetes linifolia* essential oil: *in vitro* and *in vivo* tests on *Fragaria* × *ananassa* fruits**

Authors/Autores: Ruíz González, M. A., Serrato Cruz, M. A., Valadez Moctezuma, E., Solano Vidal, R., González Tepale, R. M.

ID: e1767

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1767>Received/Fecha de recepción: September 30th 2024Accepted /Fecha de aceptación: November 12th 2025Available online/Fecha de publicación: December 15th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Ruíz González, M. A., Serrato Cruz, M. A., Valadez Moctezuma, E., Solano Vidal, R., González Tepale, R. M. (2025). Chemical characterization of *Tagetes linifolia* essential oil: *in vitro* and *in vivo* tests on *Fragaria* × *ananassa* fruits. *Revista Bio Ciencias*, 13, e1767. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1767>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Caracterización química de aceite esencial de *Tagetes linifolia*: pruebas *in vitro* e *in vivo* en frutos de *Fragaria* × *ananassa*

Chemical characterization of *Tagetes linifolia* essential oil: *in vitro* and *in vivo* tests on *Fragaria* × *ananassa* fruits

Inhibición de *Botrytis cinerea* Inhibition of *Botrytis cinerea*

Ruíz González, M. A.^{1*} (<https://orcid.org/0000-0002-1703-5651>), Serrato Cruz, M. A.^{1*} (<https://orcid.org/0000-0002-0029-733X>), Valadez Moctezuma, E.¹ (<https://orcid.org/0000-0002-8765-6613>), Solano Vidal, R.³ (<https://orcid.org/0000-0003-4452-1425>), González Tepale, R. M.² (<https://orcid.org/0000-0003-2022-0943>)

¹Dpto. de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Carr. Federal México-Texcoco, km 38.5. C.P. 56230, Texcoco, Estado de México.

²Laboratorio de Naturales. Preparatoria agrícola Chapingo. Carr. Federal México-Texcoco, km 38.5. C.P. 56230, Texcoco, Estado de México.

³Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Carr. Federal México-Texcoco, km 38.5. C.P. 56230, Texcoco, Estado de México.

*Corresponding Author:

Miguel Angel Ruíz-González. Dpto. de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Carr. Federal México-Texcoco, 38.5. C.P. 56230 Texcoco, México. Teléfono: (786) 129 4571. E-mail: miguelruiz93@live.com.mx

RESUMEN

Los aceites esenciales son eficaces para controlar patógenos, además, son reconocidos como seguros para el humano y el ambiente. El objetivo fue caracterizar los compuestos químicos en el aceite esencial de *Tagetes linifolia* y evaluar su efecto *in vitro* e *in vivo* contra *Botrytis cinerea*. El aceite esencial se analizó mediante cromatografía de gases-masas (GC-MS). Se evaluaron *in vitro* seis concentraciones de aceite (1, 0.5, 0.1, 0.01, 0.001 y 0.0001 %), un testigo y fungicida Cabrio C contra *B. cinerea*. Mediante análisis Probit se estimó la concentración letal LC₉₀ y LC₅₀. Posteriormente, LC₉₀, LC₅₀, Tween 80 al 0.01 % y un testigo se evaluaron en la germinación *in vitro* de conidios. LC₉₀ y LC₅₀ fueron retomados para su evaluación en frutos de fresa. En el aceite esencial se identificaron veinticinco compuestos químicos. Las concentraciones de 1 y 0.5 % inhibieron a *B. cinerea* sin diferencias estadísticas con respecto al fungicida comercial. Tween 80 promovió la germinación de conidios (89 %) y con la concentración letal LC₉₀ (1.6 %) no hubo germinación. Los frutos tratados con LC₉₀ mostraron menor incidencia y severidad. El aceite esencial tuvo efecto fungistático contra *B. cinerea* y efecto protector en los frutos de fresa.

PALABRAS CLAVE:

Incidencia, moho gris, severidad, *Tagetes linifolia*.

ABSTRACT

Essential oils are effective in controlling pathogens and are recognized as safe for humans and the environment. The objective was to characterize the chemical compounds in the essential oil of *Tagetes linifolia* and to evaluate the *in vitro* and *in vivo* effects against *Botrytis cinerea*. The essential oil was analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). *In vitro* assays included six concentrations of oil (1, 0.5, 0.1, 0.01, 0.001, and 0.0001 %), a control, and the fungicide Cabrio® C against *B. cinerea*. Probit analysis was used to estimate the lethal concentration LC₉₀ and LC₅₀. Subsequently, LC₉₀, LC₅₀, Tween 80 0.01 % and a control were evaluated on conidial germination *in vitro*. LC₉₀ and LC₅₀ were also evaluated on strawberry fruits. Twenty-five chemical compounds were identified in the essential oil. The 1 and 0.5 % concentrations inhibited *B. cinerea* with no statistical difference compared to the commercial fungicide. Tween 80 promoted conidial germination (89 %) while the lethal concentration LC₉₀ (1.6 %) completely inhibited germination. Fruit treated with LC₉₀ showed lower incidence and severity. The essential oil exhibited fungistatic effect against *B. cinerea* and a protective effect on strawberry fruits.

KEY WORDS:

Incidence, gray mold, severity, *Tagetes linifolia*.

Introducción

La fresa (*Fragaria × ananassa*) es un cultivo de importancia mundial, en el 2023 a nivel mundial se cultivaron alrededor de 434,977 ha con una producción de 10,485,454.06 t (FAOSTAT, 2025). México es de los principales productores, durante el 2024 la superficie nacional sembrada fue de 15,936.46 ha con un rendimiento de 696,112.63 t (SIAP, 2024). Sus frutos son fuente de vitaminas y diversos compuestos bioactivos (Padmanabhan *et al.*, 2016). Sin embargo, son muy susceptibles a daños mecánicos, deshidratación, pudriciones en campo, almacenamiento, transporte y comercialización (Petrash *et al.*, 2019). Se han reportado pérdidas entre el 25 % y el 55 % durante la precosecha y hasta el 89 % durante la postcosecha (Vanti *et al.*, 2021). *Botrytis cinerea*, causa la enfermedad del moho gris con alta incidencia sobre los frutos de fresa. Este patógeno afecta aproximadamente a 1,400 especies de plantas, y esto repercute en pérdidas económicas (Elad *et al.*, 2016).

Las estrategias actuales de control contra este y otros patógenos incluyen fungicidas sintéticos como carbendazima, dicarboximidas, anilino pirimidinas, fenilpirroles, inhibidores externos de quinona e inhibidores de la succinato deshidrogenasa (Shao *et al.*, 2020). Por ejemplo, Cabrio C® (boscalid y piraclostrobina) es un fungicida eficaz, ya que inhibe la respiración mitocondrial en *Botrytis cinerea* (Gül *et al.*, 2024). Sin embargo, varias cepas de *B. cinerea* ya han generado resistencia al boscalid y piraclostrobina (Gül *et al.*, 2024). También, se ha demostrado que los fungicidas sintéticos son altamente tóxicos para una amplia gama de microorganismos funcionales para el suelo, contaminan el agua, los alimentos y son un riesgo para la biota acuática (Zubrod *et al.*, 2019; Edward, 2021). Además, los casos de intoxicación por fungicidas en las regiones agrícolas son un aspecto importante para mediar su uso continuo, ya que se asocian con neurotoxicidad, mutaciones genéticas, aparición de tumores cancerígenos, malformaciones congénitas y alteración endocrina (Ahmad *et al.*, 2024).

Por lo anterior, se han buscado otras alternativas que sean eficaces, y los aceites esenciales de plantas se han propuesto como una opción para minimizar el uso de estos productos sintéticos. Estos generan menor preocupación por la salud humana y sobre la

contaminación ambiental (Zulu *et al.*, 2023). Varios aceites esenciales han mostrado actividad antifúngica tanto *in vitro* como *in vivo* contra diferentes especies de hongos fitopatógenos (Abdi-Moghadam *et al.*, 2023). Debido a su alta volatilidad, naturaleza efímera y porque son biodegradables (Falleh *et al.*, 2020) poseen el estatus GRAS por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) (Jackson-Davis *et al.*, 2023). Por ello, se usan como conservantes de frutas, ya que ralentizan o inhiben el crecimiento de hongos (Freche *et al.*, 2022). Por ejemplo, el aceite de aceite de *Echinophora platyloba* (0.5 %), *Citrus×limon* (0.01 %) y *Cinnamomum cassia* (0.01 %) mostraron potencial para la conservación de frutos de fresa (Freche *et al.*, 2023; Kebriti *et al.*, 2025).

El género *Tagetes* se considera endémico del continente americano (Serrato, 2014^a). Por ello, ha sido objeto de estudio para diversos fines. El efecto fungicida y fungistático *in vitro* contra *B. cinerea* ya se ha documentado con los aceites esenciales de *T. lucida* y *T. remotiflora* (Ruíz-González *et al.*, 2025^a; Ruíz-González *et al.*, 2025^b). Sus abundantes compuestos químicos, en su mayoría monoterpenos, sesquiterpenos y fenilpropanoides (Salehi *et al.*, 2018; Serrato, 2014^a) son los responsables de disminuir el crecimiento micelial y la esporulación en algunos hongos (Achimón *et al.*, 2021).

Aunque se dispone de información sobre los usos de varias especies de *Tagetes* en la industria cosmética, alimenticia, en medicina tradicional, como bactericida y plaguicida (Salehi *et al.*, 2018; Serrato *et al.*, 2014^b), las propiedades biológicas de algunas especies aún se desconocen, tal es el caso de *Tagetes linifolia* Seaton, de distribución regional en México (Turner, 1996). Es una planta perenne arbustiva de 20-40 cm de alto (Turner, 1996) y de la cual hasta ahora no se dispone información sobre su composición química ni de sus efectos biológicos y posibles usos (Serrato *et al.*, 2014^b). Debido a la destrucción y alteración de los hábitats naturales, el estudio y conocimiento de las especies endémicas es una opción para su aprovechamiento y conservación (Coelho *et al.*, 2020). Además, el cultivo de *T. linifolia* representa ventajas para su aprovechamiento ya que se trata de una especie arbustiva con capacidad de rebrote. El objetivo fue caracterizar los compuestos químicos en el aceite esencial de *T. linifolia* y evaluar su efecto *in vitro* e *in vivo* contra *B. cinerea*.

Material y Métodos

Extracción y análisis químico del aceite esencial

En Tezontepec, Puebla, México (19.505131, -97.503948) en el mes de octubre de 2022 se recolectaron plantas en floración de *T. linifolia* (Figura 1). El tejido fresco conformado por flores, tallos y hojas se trituró y una muestra de 4 kg fue sometida a hidrodestilación en un destilador tipo italiano, se obtuvo un rendimiento de 0.87 mL kg⁻¹. El aceite esencial se vertió en frascos de vidrio ámbar y se conservaron en refrigeración (4 °C). Tres muestras herborizadas se depositaron en el “Herbario-Hortorio JES” de la Universidad Autónoma Chapingo (voucher 35885).



Figura 1. *Tagetes linifolia* en floración en Tezontepec, Puebla, México. Fuente: Miguel Angel Ruíz González.

El análisis químico del aceite esencial se hizo en el Laboratorio de Productos Naturales de Preparatoria Agrícola Chapingo con la técnica de microextracción en fase sólida (SPME) (Xu & Ouyang, 2018). La fibra fue expuesta a la fase de vapor de la muestra (1 μ L) e inyectada en un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas de trampa de iones (GC-MS Agilent Technologies 7890 Agilent 240, Agilent Technologies). Se utilizó una columna capilar GC column VF-5ms, de 30 $\times$ 0.25 (0.25). La temperatura del inyector se mantuvo a 250 °C, con un modo de inyección split/splitless (1:20), se utilizó una columna VF-5 MS (30 m $\times$ 250 μ m $\times$ 0.25 μ m) con helio como gas acarreador y flujo de 0.5 mL min⁻¹ y una presión de 0.5 atm. El horno trabajó con una rampa de calentamiento de 70 °C a 120 °C, con velocidad de 2 °C min⁻¹ y de 120 °C a 230 °C a 15 °C min⁻¹. La muestra se analizó por duplicado.

La identificación de los compuestos químicos se hizo al comparar el tiempo de retención y el espectro de masas con la biblioteca espectral de masas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) y se confirmó mediante el cálculo del índice de Kovats comparado con la literatura (NIST: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>). Se usaron n-alcanos (C8-C20) para calcular dicho índice y una variación de $\pm$ 40 unidades para identificar los compuestos. La abundancia relativa de cada compuesto se estimó con base en el área de los picos.

Evaluación *in vitro*

El experimento se realizó en el Laboratorio de Resistencia Genética en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. *B. cinerea* (registro GenBank: PP401673.1) se reactivó en medio de cultivo Agar Papa Dextrosa (PDA) (BD Bioxon®) con incubación en estufa de cultivo (Ecoshel, 91210) en condiciones de oscuridad a 18 $\pm$ 2 °C durante cinco días.

Mediante diluciones, se prepararon emulsiones con Tween 80 (Sigma Aldrich Company, Darmstadt, Alemania) al 0.01 %, agua bidestilada y aceite esencial en seis concentraciones (1, 0.5, 0.1, 0.01, 0.001 y 0.0001 %), el testigo fue medio PDA esterilizado

en autoclave (AES, CV 300) a 120 °C durante 15 min. Se utilizó como referencia 1 g L⁻¹ del fungicida Cabrio C (boscalid y piraclostrobina). La actividad antifúngica se evaluó con la técnica del medio envenenado (Erhonyota *et al.*, 2023). A partir de una colonia de cuatro días de crecimiento, con un sacabocado estéril se obtuvo un disco de 3.5 mm con micelio y se colocó en el centro de las cajas Petri de 90 mm de diámetro. Las condiciones de incubación fueron las mismas. Durante cinco días y cada 24 h se midió el crecimiento micelial con un vernier digital (Truper, 14388). Con los datos obtenidos se estimó la inhibición del crecimiento micelial (Fokkema, 1973). Al finalizar la evaluación *in vitro* se determinó la concentración letal LC₅₀ y LC₉₀ mediante análisis Probit en el programa SAS académico (Castillo, 2007).

Evaluación de concentraciones Probit en conidios

Las concentraciones LC₅₀ y LC₉₀ se evaluaron sobre conidios de *B. cinerea*. En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se agregaron 100 mL de agua bidestilada estéril y 10 µL de Tween 80. A partir de una colonia de doce días de crecimiento y con esporulación se hizo un raspado para obtener conidios de *B. cinerea*. El matraz Erlenmeyer se agitó en vórtex (Cole-Parmer, Illinois, USA) durante 10 s y el conteo de conidios se hizo por triplicado en cámara de Neubauer (Marienfeld, CNLB01). Se obtuvo una suspensión de conidios 5×10⁵.

En medio PDA combinado con aceite esencial se prepararon los siguientes tratamientos: a) PDA+LC₅₀, b) PDA+LC₉₀, c) PDA+Tween 80 al 0.01 % y d) testigo con solo PDA. Previo al vaciado del medio de PDA, en el centro de cada caja Petri se agregaron 2 µL de la suspensión (100 conidios) y después se vació el medio PDA a temperatura ambiente. Las cajas se homogeneizaron con movimientos circulares para distribuir los conidios en el medio de cultivo y se incubaron en las condiciones anteriormente descritas. Cada 24 h se hizo el conteo de conidios germinados, hasta las 96 h.

Evaluación de concentraciones Probit en frutos

Se cosecharon frutos en madurez comercial de plantas de fresa var. “FESTIVAL” y se desinfectaron con hipoclorito de sodio (Clorox®) a 50 ppm durante 3 min. Los frutos se enjuagaron con agua bidestilada estéril y se colocaron en papel absorbente. Se evaluaron tratamientos con frutos inoculados y no inoculados. Los frutos fueron sumergidos durante 15 s en la emulsión de aceite esencial LC₅₀ y LC₉₀ preparada con Tween 80 (0.01 %) y agua bidestilada estéril.

En contenedores de poliestireno transparente tipo bisagra fueron colocados cinco frutos y transcurridas 6 h, solo los frutos del tratamiento con inoculación fueron inoculados mediante aspersión con 10 mL de una suspensión de conidios (1×10⁶) de *B. cinerea*. Los contenedores se refrigeraron a 4 °C y se evaluó el desarrollo de pudrición en los frutos mediante un análisis de incidencia (Ecuación 1) a los cinco, diez y quince días después de la inoculación. Transcurridos quince días, se registró el crecimiento superficial de micelio para estimar la severidad (Ecuación 2) (McKinney, 1923). Se utilizó la escala de Romanazzi *et al.* (2013): 0) fruto sano; 1) 1-20 % de la superficie del fruto infectada; 2) 21-40 % de la superficie del fruto infectada; 3) 41-60 % de la superficie del fruto infectada; 4) 61-80 % de la superficie del fruto infectada; 5) más del 80 % de la superficie del fruto infectada. Se utilizaron como testigo frutos sin inoculación y frutos con inoculación, sin aplicación de aceites esenciales.

Ecuación 1: estimación de incidencia en frutos

$$\text{Incidencia} = \frac{\text{Número de frutos enfermos}}{\text{Número total de frutos}} * 100$$

Ecuación 2: estimación de severidad en frutos con escala 0-5

$$\text{Severidad} = \frac{\sum(nixi)}{NZ} * 100$$

xi: puntuación de la escala de gravedad

ni: número de frutos con escala xi

N: número total de frutos observados

Z: puntuación más alta

Análisis de datos

En los experimentos se utilizó un Diseño Completamente al Azar. Los tratamientos *in vitro* con medio PDA tuvieron cinco repeticiones. En la evaluación sobre frutos se hicieron tres repeticiones con cinco frutos en cada repetición. Las variables inhibición, porcentaje de germinación, incidencia y severidad fueron analizadas en software SAS académico mediante análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$).

Resultados y Discusión

Compuestos químicos del aceite esencial

Se identificaron 25 compuestos químicos en el aceite esencial de *T. linifolia*, el 40 % fueron terpenoides, 32 % monoterpenos, 12 % sesquiterpenos y algunos ésteres (8 %), cetonas (4 %) y alcoholes (4 %) (Tabla 1), lo cual coincide con Salehi *et al.* (2018) quienes mencionan que los aceites esenciales de *Tagetes* son ricos en monoterpenos y cantidades bajas de sesquiterpenos. Los compuestos mayoritarios fueron: 1,5-heptadien-4-ol, 3,3,6-trimetil- (34.99 %), (E)-Tagetona (13.47 %) y β -Pineno (3.24 %). El primer compuesto mayoritario se reporta por primera vez en *Tagetes*, mientras que los demás compuestos son comunes en el género (Salehi *et al.*, 2018). El compuesto 1,5-heptadien-4-ol, 3,3,6-trimetil- también se reportó como compuesto mayoritario (7.36 %) en el aceite esencial de *Artemisia austro-yunnanensis* (Chen-Xing *et al.*, 2014), mientras que la (E)-Tagetona (6.24 %) se encuentra en *Tagetes minuta* (De Oliveira *et al.*, 2018). Los compuestos presentes en el aceite de *T. linifolia* podrían tener efectos relevantes y de uso diversificado.

Evaluación *in vitro*

Las concentraciones de 0.5 y 1 % inhibieron el crecimiento micelial en 83 y 86 %, respectivamente, y no hubo diferencias estadísticas con respecto al fungicida comercial (Figura 2). Aún con las bajas diluciones (0.01 y 0.001 %) la inhibición fue de 19 y 28 % con diferencias estadísticas con respecto al testigo (Figura 2). El efecto inhibitorio sobre *B. cinerea* ya se ha observado en otras especies de *Tagetes* (Ruíz-González *et al.*, 2025^a; Ruíz-González *et al.*, 2025^b) y su efecto se atribuye principalmente a los monoterpenos de una manera dependiente de la concentración usada (Pedroso *et al.*, 2024). La alta inhibición también podría atribuirse a la cantidad de terpenos presentes en el aceite esencial, ya se ha demostrado que estos disminuyen el contenido mitocondrial (Haque *et al.*, 2016).

Tabla 1. Compuestos químicos y abundancia relativa (RA) en aceite esencial de *Tagetes linifolia*.

Compuesto	RA	KIC	Compuesto	RA	KIC
* 1,5-heptadien-4-ol, 3,3,6-trimetil-	34.99	1068 ± 12.8	- 3-careno	0.15	1005 ± 3.2
* (E)-Tagetona	13.47	1136 ± 11.8	* β-Linalool	0.12	1081 ± 14.3
- β-Pineno	3.24	970 ± 12.4	= 6-metil-5-hepten-2-ona	0.09	958 ± 17
- trans-β-Ocimeno	2.55	1034 ± 0.1	* 2-isopropilideno-5-metilhex-4-enal	0.09	1151 ± 9.5
= 1-Pentanol, 5-ciclopropilideno-	2.54	1085 ± 22.1	* Biciclo[3.1.1]Heptan-3-Ona, 2,6,6-Trimetil-, [1S-(1a,2ss,5a)]-	0.08	1151 ± 36.7
- (-)-α-tujeno	1.54	968 ± 24.9	/ Cariofileno	0.07	1424 ± 1.8
- Canfeno	0.70	943 ± 4.6	* Cetona de Elsholtzia	0.06	1167 ± 23.9
- o-cimeno	0.60	1025 ± 0.1	/ α-Bergamoteno	0.05	1407 ± 15.6
* Verbenona, (L)-	0.56	1191 ± 34.7	- α-Pineno	0.05	931 ± 4.9
- Limoneno	0.52	1014 ± 10.8	+ Acetato de cis-3-hexenol	0.04	983 ± 15
- β-Sabineno	0.31	964 ± 2.7	* Endo-Borneol	0.04	1148 ± 18.2
+ Éster de vinilo de ácido sórbico	0.30	990 ± 33.4	/ (-)-β-Bourboneno	0.01	1408 ± 12.2
* 3,6-dimetil-2,3,3a,4,5,7a-hexahidrobenzofurano	0.20	1178 ± 31.4			

KIC: Índice de Kovats calculado ± desviación estándar, C₁₀H₁₆ (-): monoterpenos, C₁₅H₂₄ (/): sesquiterpenos, (=): cetonas, (+): ésteres, terpenoides (*): terpenos que sufren modificaciones bioquímicas a través de enzimas que añaden moléculas de oxígeno y mueven o eliminan grupos metilo.

En el aceite esencial de *T. remotiflora* y *T. lucida* también se identificaron los compuestos β-Pineno, (-)-β-Bourboneno y trans-β-Ocimeno y la inhibición sobre *B. cinerea* fue sobresaliente (Ruíz-González *et al.*, 2025^a; Ruíz-González *et al.*, 2025^b). Por ello, el efecto de inhibición observado con *T. linifolia* también se atribuye a estos compuestos (Tabla 1) y a la capacidad de los aceites esenciales para absorberse en la superficie lipofílica del micelio (Kiran *et al.*, 2016), asimismo, al efecto sinérgico de todos los compuestos como lo indican Hleba *et al.* (2024). Por otra parte, se ha demostrado que el β-pineno sirve como compuesto principal para el desarrollo de nuevos fungicidas (Zhang *et al.*, 2025) ya que actúa a través de la interferencia con la pared celular (Andrade *et al.*, 2019). Este compuesto tuvo abundancia relativa de 3.24 % en *T. linifolia* (Tabla 1). También, el compuesto 1,5-heptadien-4-ol, 3,3,6-trimetil- previamente identificado en *Artemisia austro-yunnanensis* tiene actividad antioxidante (Chen-Xing *et al.*, 2014) y la (E)-Tagetona presente en *T. minuta* en conjunto con otros compuestos característicos de la especie tienen actividad antifúngica, antibacteriana, insecticida, nematicidas, antiviral y antimicrobiana (Bandana *et al.*, 2018). Por ello, los resultados de inhibición de *T. linifolia* sobre *B. cinerea* abren la posibilidad de explorar sus efectos sobre otros patógenos.

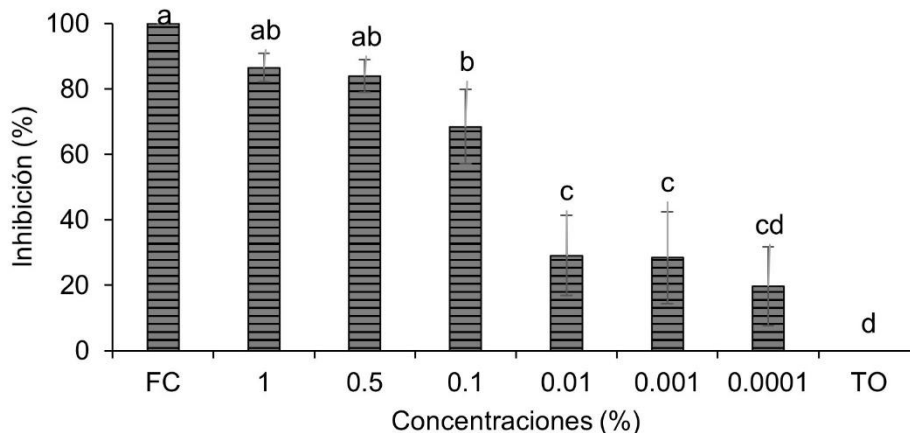


Figura 2. Inhibición del crecimiento micelial de *Botrytis cinerea* con el aceite esencial de *Tagetes linifolia*. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey ≤ 0.05). TO: testigo, FC: fungicida comercial Cabrio C. 1, 0.5, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001: concentración de aceite esencial usado (v/v).

Análisis Probit

Con el análisis Probit se obtuvieron las concentraciones letales del 50 % (LC_{50}) y 90 % (LC_{90}), para LC_{50} fue de 0.04 % (v/v) y para LC_{90} de 1.6 % (v/v) (Tabla 2). Estas concentraciones fueron retomadas para su evaluación sobre la germinación de conidios y su evaluación en frutos.

Tabla 2. Concentraciones letales LC_{50} y LC_{90} del aceite esencial de *Tagetes linifolia* obtenidas con análisis Probit.

Aceite esencial (v/v)	LC_{50}	LC_{90}	Valor p
<i>Tagetes linifolia</i>	0.04 %	1.6 %	<0.0001

LC_{50} : concentración letal que causa 50 % de mortalidad, LC_{90} : concentración letal que causa 90% de mortalidad, valor p : representa la heterogeneidad en la población analizada.

Evaluación de concentraciones Probit en conidios

Con LC_{90} (1.6 %) se inhibió totalmente la germinación de conidios con diferencias estadísticas con respecto al testigo, mientras que, con LC_{50} (0.04 %) la germinación fue del 17 % a las 96 h (Figura 3). En otros estudios, se han evaluado aceites esenciales de *Origanum vulgare* y *Thymus vulgaris* (0.08 %), estos inhibieron parcialmente la germinación de conidios de *Penicillium expansum* (83.14 - 98.34 %) y *Botrytis cinerea* (51.73 - 71.57 %) y al 0.1 % hubo inhibición total (Fincheira et al., 2023). Los aceites esenciales de *Curcuma longa*, *Pimenta dioica*, *Rosmarinus officinalis* y *Syzygium aromaticum* (0.1 %) contenían compuestos similares (α -pineno, endo-Borneol, canfeno, β -pineno, limoneno, β -Linalool, verbenona y cariofileno) a los encontrados en *T. linifolia* (Tabla 1) y se inhibió la germinación de conidios de *Fusarium verticillioides* de 24.2 hasta 87.2 % (Achimón et al., 2021). Esto

refuerza la idea de que los aceites esenciales tienen un efecto sinérgico y actúan de una manera dependiente de la concentración usada (Hleba *et al.*, 2024; Pedroso *et al.*, 2024).

Por otra parte, el surfactante Tween 80 promovió la germinación de conidios (89 %) incluso más que en el testigo (79 %). Sin embargo, cuando se usó para preparar la emulsión con el aceite esencial (LC₅₀ y LC₉₀) parece no tener efecto ya que se observó una fuerte inhibición sobre la germinación (Figura 3). Aunque el uso de surfactantes (Tween 20 y Tween 80) sirve para liberar los conidios de los conidióforos, este puede interferir en la germinación de algunos hongos. En *Pyrenophora tritici-repentis* Tween 20 al 0.02 % retrasó la germinación, sin embargo, en dos horas, todos los conidios germinaron (Jacques *et al.*, 2021). Mwamburi *et al.* (2015) observaron que Tween 80 inhibe la germinación de *Beauveria bassiana* a una concentración del 0.5 y 1 %, pero estimula la germinación a concentraciones de 0.1 %. Tu *et al.* (2014) observaron que las células de *Aureobasidium pullulans* parecían estar más sueltas y grandes después de la aplicación de Tween 80 al 0.02 %. Debido a los efectos observados con Tween 80, se sugiere estandarizar las concentraciones y hacer su evaluación con hongos benéficos ya que su efecto de favorecer la germinación de conidios podría tener ventajas.

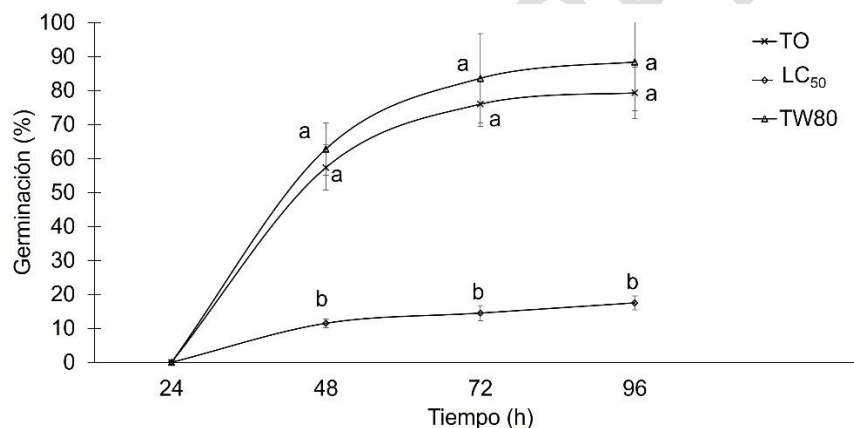


Figura 3. Germinación de conidios de *Botrytis cinerea* en medio PDA con concentración letal LC₅₀, Tween 80 (TW80) y testigo (TO). El tratamiento con concentración letal LC₉₀ no se incluye ya que no hubo germinación de conidios. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey ≤ 0.05).

Evaluación de concentraciones Probit en frutos

La incidencia del moho gris causado por *B. cinerea* fue menor en los frutos no inoculados y tratados con la concentración letal LC₉₀, mientras que, en los frutos con inoculación la incidencia fue mayor (Tabla 3). Durante cinco días de refrigeración, los frutos tratados con LC₉₀ no mostraron incidencia del patógeno, a los diez días la incidencia fue del 6.6 % y a los quince días mostraron incidencia del 50 % (Tabla 3). Con la aplicación de LC₉₀, la superficie del fruto infectada fue de 1-20 % (Figura 4), a diferencia de los tratamientos testigo inoculado y no inoculado, que mostraron la mayor incidencia a partir del día cinco hasta el día quince (80-90 %). Aunque los frutos de fresa son susceptibles a los daños físicos, fisiológicos o patológicos (Qaderi *et al.*, 2022). Israfi *et al.* (2022) y Da Costa *et al.* (2023) mencionan que los aceites esenciales pueden ralentizar la progresión de enfermedades fúngicas y bacterianas en frutos. Además, demostraron que el aceite

esencial de *Melaleuca alternifolia* (0.05 %) redujo hasta 98 % la severidad de *Colletotrichum musae* en plátanos (Da Costa *et al.*, 2023).

La severidad fue mayor (Tabla 3) en el tratamiento testigo inoculado y no inoculado (4.8 y 3.8) ya que la superficie del fruto infectada fue entre 61 y 81 % (Figura 4), aspecto que hace al fruto no apto para consumo. Los frutos tratados con la concentración media letal (LC₅₀ y LC₅₀I) mostraron incidencia menor al testigo a los cinco días, pero la severidad hace que sean ineficaces como conservantes de frutos de fresa (Tabla 3 y Figura 4). El efecto protector contra *B. cinerea* en frutos de fresa ya se ha demostrado con aceites esenciales de *Aloysia citriodora*, *Cymbopogon winterianus*, *Lippia alba*, *Ocimum americanum*, *Citrus×limon* y *Cinnamomum cassia* (Fontana *et al.*, 2021; Freche *et al.*, 2023). Por otra parte, Ji *et al.* (2024) demostraron que el aceite de *Origanum vulgare* (0.006 %) redujo la incidencia de *Botrytis cinerea* y *Alternaria alternata*, incluso se indujeron enzimas relacionadas con la defensa como la fenilalanina amonio liasa, polifenol oxidasa, peroxidasa, quitinasa y β-1,3-glucanasa en los frutos de arándano (*Vaccinium corymbosum* L. “O’Neal”). La aplicación de aceites esenciales es un campo promisorio en alimentos, y los resultados de este estudio aportan un antecedente importante sobre el uso del aceite esencial de *T. linifolia* como un posible insumo para contrarrestar efectos negativos causados por *B. cinerea*.

Tabla 3. Incidencia y severidad de *Botrytis cinerea* en frutos de fresa tratados con aceite esencial LC₉₀ y LC₅₀ y refrigerados durante 15 días.

Tratamientos	Incidencia			Severidad
	5 d	10 d	15 d	15 d
TO no inoculado	13.3 ± 11.5 ^{ab}	46.6 ± 11.5 ^{ab}	80 ± 20 ^a	3.8 ± 0.8 ^a
TO inoculado	40 ± 20 ^a	53.3 ± 11.5 ^a	90 ± 11.5 ^a	4.8 ± 0.4 ^a
LC ₉₀	0 ± 0 ^b	6.6 ± 11.5 ^c	50 ± 20 ^a	1 ± 0.7 ^c
LC ₉₀ I	6.6 ± 11.5 ^b	13.3 ± 11.5 ^{bc}	73.3 ± 23 ^a	1.8 ± 0.4 ^{bc}
LC ₅₀	6.6 ± 11.5 ^b	40 ± 20 ^{abc}	73.3 ± 11.5 ^a	3 ± 1.8 ^{ab}
LC ₅₀ I	0 ± 0 ^b	46.6 ± 11.5 ^{ab}	93.3 ± 11.5 ^a	4.8 ± 0.4 ^a
Valor p	0.0509	0.0040	0.1762	<.0001
DMS	31.6	36	51.2	1.9

TO: testigo, LC: concentración letal, I: inoculado, severidad: escala de daño 0-5. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey ≤ 0.05).

En este estudio, el tratamiento LC₉₀ de *T. linifolia* resultó efectivo para controlar la enfermedad en postcosecha hasta los cinco días (Tabla 3 y Figura 4), un antecedente importante para explorar su aplicación en fase de vapor (Tančinová *et al.*, 2022) o preparar biopelículas activas a base de polisacáridos cargadas de aceites esenciales para la conservación de alimentos (Khan *et al.*, 2023). Aún falta estandarizar concentraciones óptimas ya que los aceites esenciales pueden tener efectos organolépticos y alteración de múltiples propiedades fisicoquímicas relacionadas con la calidad de la fruta (Freche *et al.*, 2022).

Aunque la aplicación de aceites esenciales es una alternativa efectiva y segura para el humano (Taghavi *et al.*, 2018), es importante considerar que para obtener 1 L de aceite esencial de *T. linifolia* se requerirían 1149.43 kg de tejido fresco. Habrá que explorar otros métodos, como la extracción asistida por microondas que logra mayores rendimientos y tiempos de extracción más cortos (Souiy, 2023). También, el manejo agronómico de *T. linifolia* podría ser alternativa para incrementar el contenido de aceites esenciales como lo indican Georgieva *et al.* (2022). Asimismo, continuar con la investigación con otros frutos y experimentar la combinación de aceites esenciales para observar su efecto será una próxima actividad. La característica endémica, aromática, abundante y llamativa floración de *T. linifolia* la hace un recurso fitogenético valioso para futuras investigaciones. Incluso con potencial ornamental, un aspecto importante que aportará significativamente en su conservación.



Figura 4. Efecto protector del aceite esencial de *Tagetes linifolia* a los quince días después de incubación en frutos inoculados y no inoculados. LC₅₀ y LC₉₀: concentraciones Probit, TO: testigo, I: frutos inoculados.

Conclusiones

La característica endémica de *T. linifolia* hace importante su estudio y conservación. La caracterización química del aceite esencial de *T. linifolia* permitió la identificación de un nuevo compuesto mayoritario (1,5-heptadien-4-ol, 3,3,6-trimetil-) para el género *Tagetes*. Los antecedentes sobre este compuesto indican su actividad antioxidante y la alta abundancia relativa de este compuesto en conjunto con los monoterpenos, terpenoides y

sesquiterpenos de *T. linifolia* mostraron actividad biológica contra *B. cinerea* *in vitro* e *in vivo*. Se destaca el efecto inhibitor sobre la germinación de conidios. La disminución en la incidencia y severidad sobre los frutos de fresa es una de las propiedades evaluadas, no obstante, el aceite esencial de *T. linifolia* podría aplicarse en otros frutos con problemas asociados con *B. cinerea* o evaluar su efecto en otros microorganismos. Se requiere realizar análisis más detallados de la actividad biológica y en futuros estudios será importante considerar otros factores como diferentes rangos de temperatura, ya que es un elemento clave en la conservación de frutos.

Contribución de los autores

MARG y MASC diseñaron, realizaron la investigación y redacción del escrito; EVM y RSV facilitaron acceso a materiales de laboratorio, el material vegetal, apoyaron en la realización de experimentos y metodología; RMGT y MARG analizaron las muestras en el equipo de cromatografía y la identificación de compuestos químicos. Todos los autores revisaron y aprobaron el escrito.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada con fondos propios.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Laboratorio de Naturales ubicado en preparatoria agrícola Chapingo.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Abdi-Moghadam, Z., Mazaheri, Y., Rezagholizade-Shirvan, A., Mahmoudzadeh, M., Sarafraz, M., Mohtashami, M., Shokri, S., Ghasemi, A., Nickfar, F., Darroudi, M., Hossieni, H., Hadian, Z., Shamloo, E., & Rezaei, Z. (2023). The significance of essential oils and their antifungal properties in the food industry: A systematic review. *Heliyon*, 9(11), Article e21386. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21386>
- Achimón, F., Brito, V. D., Pizzolitto, R. P., Sánchez, A. R., Gómez, E. A., & Zygadlo, J. A. (2021). Chemical composition and antifungal properties of commercial essential oils against the maize phytopathogenic fungus *Fusarium verticillioides*. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.12.001>
- Ahmad, M. F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyauallah, M., AlShahrani, A. M., Muzammil, K., Saati, A. A., Wahab, S., Elbendary, E. Y., Kambal, N., Abdelrahman, M. H., & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*, 10(7), Article e29128. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128>
- Andrade, A. C., Rosalen, P. L., Freires, I. A., Scotti, M. T., De Aquino, S. G., & De Castro, R. D. (2019). Antifungal activity, mode of action, docking prediction and anti-biofilm effects of (+)- β -pinene enantiomers against *Candida* spp. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 18(29), 2481-2490. <https://doi.org/10.2174/1568026618666181115103104>

- Bandana, K., Raina, R., Kumari, M., & Rani, J. (2018). *Tagetes minuta*: An overview. *International Journal of Chemical Studies*, 6(2), 3711-3717. <https://www.chemijournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartAZ/6-2-452-241.pdf>
- Castillo Márquez. L. E. (2007). Introducción al SAS para Windows. Universidad Autónoma Chapingo. 3 edición. 295 p.
- Chen-Xing, Z., Mi, Z., Jing, H., Ya-Fang, D., & Bao-Cai, L. (2014). Chemical composition and antioxidant activity of the essential oil from the flowers of *Artemisia austro-yunnanensis*. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(7), 1583-1587. <https://jocpr.com/vol6-iss7-2014/JCPR-2014-6-7-1583-1587.pdf>
- Coelho, N., Gonçalves, S., & Romano, A. (2020). Endemic plant species conservation: Biotechnological approaches. *Plants*, 9(3), 345. <https://doi.org/10.3390/plants9030345>
- Da Costa, D. G., Ribeiro, W. R., Gonçalves, D. C., Dian, V. S., Da Silva Xavier, A., De Oliveira, Á. A., Menini, L., & Costa, H. (2023). Use of *Melaleuca alternifolia* essential oil as an efficient strategy to extend the shelf life of banana fruits. *Biochemical Systematics and Ecology*, 108, Article 104641. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104641>
- De Oliveira, D. H., Abib, P. B., Giacomini, R. X., Lenardão, E. J., Schiedeck, G., Wilhelm, E. A., Luchese, C., Savegnago, L., & Jacob, R. G. (2018). Antioxidant and antifungal activities of the flowers' essential oil of *Tagetes minuta*, (Z)-tagetone and thiotagetone. *Journal of Essential Oil Research*, 31(2), 160-169. <https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1519465>
- Edward, D. (2021). Impact of fungicide pesticides on human and environment. *Journal of Agricultural Science and Food Research*, 12(3), 1-2. <https://www.longdom.org/open-access/impact-of-fungicide-pesticides-on-human-and-environment.pdf>
- Elad, Y., Pertot, I., Cotes Prado, A. M., & Stewart, A. (2016). Plant hosts of *Botrytis* spp. In: *Botrytis the fungus, the pathogen and its management in agricultural systems*. Fillinger, S., & Elad, Y. (pp. 413-486). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23371-0_20
- Erhonyota, C., Edo, G. I., & Onoharigho, F. O. (2023). Comparison of poison plate and agar well diffusion method determining the antifungal activity of protein fractions. *Acta Ecológica Sinica*, 43(4), 684-689. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.08.006>
- Falleh, H., Jemaa, M. B., Saada, M., & Ksouri, R. (2020). Essential oils: A promising eco-friendly food preservative. *Food Chemistry*, 330, Article 127268. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127268>
- Food and Agriculture Organization Statistical database [FAOSTAT]. (2025, 30 de julio). Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- Fincheira, P., Jofré, I., Espinoza, J., Levío-Raimán, M., Tortella, G., Oliveira, H. C., Diez, M. C., Quiroz, A., & Rubilar, O. (2023). The efficient activity of plant essential oils for inhibiting *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum*: Mechanistic insights into antifungal activity. *Microbiological Research*, 277, Article 127486. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127486>
- Fokkema, N. J. (1973). The role of saprophytic fungi in antagonism against *Dreschlera sorokiniana* (*Helminthosporium sativum*) on agar plates and rye leaves with pollen. *Physiological Plant Pathology*, 3(2), 195-202. [https://doi.org/10.1016/0048-4059\(73\)90082-9](https://doi.org/10.1016/0048-4059(73)90082-9)
- Fontana, D. C., Neto, D. D., Pretto, M. M., Mariotto, A. B., Caron, B. O., Kulczynski, S. M., & Schmidt, D. (2021). Using essential oils to control diseases in strawberries and peaches. *International Journal of Food Microbiology*, 338, Article 108980. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108980>

- Freche, E., Gieng, J., Pignotti, G. A., Ibrahim, S. A., & Feng, X. (2022). Applications of lemon or Cinnamon essential oils in strawberry fruit preservation: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(9). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16526>
- Freche, E., Gieng, J., Pignotti, G. A., Ibrahim, S. A., Tran, H. T., Ahn, D. U., & Feng, X. (2023). Effects of lemon or cinnamon essential oil vapor on physicochemical properties of strawberries during storage. *Han-guksikpumjeojang-yutonghakoeji*, 30(4), 549-561. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2023.30.4.549>
- Georgieva, R., Delibaltova, V., & Chavdarov, P. (2022). Change in agronomic characteristics and essential oil composition of coriander after application of foliar fertilizers and biostimulators. *Industrial Crops and Products*, 181, Article 114819. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114819>
- Gül, E., Karakaya, A., & Ergül, A. (2024). Mutations associated with boscalid and pyraclostrobin resistance of *Botrytis cinerea* from vegetable fields in Turkey. *Tropical Plant Pathology*, 49(3), 429-435. <https://doi.org/10.1007/s40858-024-00646-4>
- Haque, E., Irfan, S., Kamil, M., Sheikh, S., Hasan, A., Ahmad, A., Lakshmi, V., Nazir, A., & Mir, S. S. (2016). Terpenoids with antifungal activity trigger mitochondrial dysfunction in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology*, 85(4), 436-443. <https://doi.org/10.1134/s0026261716040093>
- Hleba, L., Hlebová, M., & Charousová, I. (2024). *In vitro* evaluation of synergistic essential oils combination for enhanced antifungal activity against *Candida* spp. *Life*, 14(6), 693. <https://doi.org/10.3390/life14060693>
- Israfi, N. A. M., Ali, M. I. A. M., Manickam, S., Sun, X., Goh, B. H., Tang, S. Y., Ismail, N., Razis, A. F. A., Ch'ng, S. E., & Chan, K. W. (2022). Essential oils and plant extracts for tropical fruits protection: From farm to table. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.999270>
- Jackson-Davis, A., White, S., Kassama, L. S., Coleman, S., Shaw, A., Mendonça, A. F., Cooper, B., Thomas-Popo, E., Gordon, K. W., & London, L. (2023). A review of regulatory standards and advances in essential oils as antimicrobials in foods. *Journal of Food Protection*, 86(2), Article 100025. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2022.100025>
- Jacques, S., Lenzo, L., Stevens, K., Stevens, Lawrence, J., & Tan, K. C. (2021). An optimized sporulation method for the wheat fungal pathogen *Pyrenophora tritici-repentis*. *Plant Methods*, 17(52), 4-12. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00751-4>
- Ji, Y., Hu, W., Guan, Y., & Saren, G. (2024). Effects of plant essential oil treatment on the growth of pathogenic fungi and the activity of defense-related enzymes of fungi-inoculated blueberry. *Horticulturae*, 10(4), 318. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040318>
- Kebriti, I., Solgi, M., & Velashjerdi, M. (2025). Improving quality of strawberry by novel essential oil nanoemulsions of *Echinophora platyloba* combined with *Aloe vera* gel and gum arabic. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86259-6>
- Khan, S., Abdo, A. A. A., Shu, Y., Zhang, Z., & Liang, T. (2023). The extraction and impact of essential oils on bioactive films and food preservation, with emphasis on antioxidant and antibacterial activities a review. *Foods*, 12(22), Article 4169. <https://doi.org/10.3390/foods12224169>
- Kiran, S., Kujur, A., & Prakash, B. (2016). Assessment of preservative potential of *Cinnamomum zeylanicum* Blume essential oil against food borne molds, aflatoxin B1 synthesis, its functional properties and mode of action. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.018>
- McKinney, H. H. (1923). Influence of soil temperature and moisture on infection of wheat seedling by *Helminthosporium sativum*. *Journal Agricultural Research*, 26, 195-217.

- <https://eurekamag.com/research/013/404/013404640.php?srlftid=AfmBOoro6biNi4Y4u-fwvzS0faGqRaBlzcP-EFreUWagKnKBee2VGS6l>
- Mwamburi, L. A., Laing, M., & Miller, R. (2015). Effect of surfactants and temperature on germination and vegetative growth of *Beauveria bassiana*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46(1), 67-74. <https://doi.org/10.1590/s1517-838246120131077>
- Padmanabhan, P., Mizran, A., Sullivan, J. A., & Paliyath, G. (2016). Strawberries. En Elsevier eBooks (pp. 193-198). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384947-2.00667-X>
- Pedroso, M. B., Scariot, F. J., Rocha, R. K. M., Echeverrigaray, S., & Delamare, A. P. L. (2024). Antifungal activity and mechanism of action of monoterpenes against *Botrytis cinerea*. *Ciência e Agrotecnologia*, 48. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202448018823>
- Petrash, S., Knapp, S. J., Van Kan, J., & Blanco-Ulate, B. (2019). Gray mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea*. *Molecular Plant Pathology*, 20(6), 877-892. <https://doi.org/10.1111/mpp.12794>
- Qaderi, R., Mezzetti, B., Capocasa, F., & Mazzoni, L. (2022). Stability of strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.) nutritional quality at different storage conditions. *Applied Sciences*, 13(1), 313. <https://doi.org/10.3390/app13010313>
- Romanazzi, G., Feliziani, E., Santini, M., & Landi, L. (2013). Effectiveness of postharvest treatment with chitosan and other resistance inducers in the control of storage decay of strawberry. *Postharvest Biology and Technology*, 75, 24-27. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.07.007>
- Ruiz-González, M. Á., Solano-Vidal, R., Valadez-Moctezuma, E., & Serrato-Cruz, M. Á. (2025^a). Compuestos químicos del aceite esencial de *Tagetes lucida* y efecto contra *Botrytis cinerea*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(3), Article e3613. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3613>
- Ruiz-González, M. Á., Solano-Vidal, R., Valadez-Moctezuma, E., & Serrato-Cruz, M. Á. (2025^b). Destilados y aceite homeopático de *Tagetes remotiflora*: efecto en *Botrytis cinerea*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(2), Article e3494. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i2.3494>
- Salehi, B., Valussi, M., Morais-Braga, M. F. B., Carneiro, J. N. P., Leal, A. L. A. B., Coutinho, H. D. M., Vitalini, S., Kręgiel, D., Antolak, H., Sharifi-Rad, M., Silva, N. C. C., Yousaf, Z., Martorell, M., Iriti, M., Carradori, S., & Sharifi-Rad, J. (2018). *Tagetes* spp. essential oils and other extracts: chemical characterization and biological activity. *Molecules*, 23(11), Article 2847. <https://doi.org/10.3390/molecules23112847>
- Serrato, C. M. A. (2014^a). El recurso genético cempoalxóchitl (*Tagetes* spp.) de México (Diagnóstico). Chapingo, Estado de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/225091/El_recurso_gen_tico_del_cempoalxochitl_tagetes_spp_de_mexico_diagnostico.pdf
- Serrato, C. M. A., Bautista, R. F., & Monroy, S. A. S. (2014^b). Guía para conocer el Germoplasma Mexicano de Cempoalxóchitl (*Tagetes* spp.). México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/225099/Guia_para_conocer_el_germoplasma_mexicano_de_cempoalxochitl_tagetes_spp.pdf
- Shao, W., Zhao, Y., & Ma, Z. (2020). Advances in understanding fungicide resistance in *Botrytis cinerea* in China. *Phytopathology*, 111(3), 455-463. <https://doi.org/10.1094/phyto-07-20-0313-ia>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2024, 30 de julio). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

- Souiy, Z. (2023). Essential oil extraction process. En Biochemistry. <https://doi.org/10.5772/intechopen.113311>
- Taghavi, T., Kim, C., & Rahemi, A. (2018). Role of natural volatiles and essential oils in extending shelf life and controlling postharvest microorganisms of small fruits. *Microorganisms*, 6(4), Article 104. <https://doi.org/10.3390/microorganisms6040104>
- Tančinová, D., Mašková, Z., Mendelová, A., Foltinová, D., Barboráková, Z., & Medo, J. (2022). Antifungal activities of essential oils in vapor phase against *Botrytis cinerea* and their potential to control postharvest strawberry gray mold. *Foods*, 11(19), Article 2945. <https://doi.org/10.3390/foods11192945>
- Tu, G., Wang, Y., Ji, Y., & Zou, X. (2014). The effect of Tween 80 on the polymalic acid and pullulan production by *Aureobasidium pullulans* CCTCC M2012223. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 31(1), 219-226. <https://doi.org/10.1007/s11274-014-1779-9>
- Turner, B. L. (1996). Tageteae and Anthemideae. In Turner B. L. The comps of Mexico - A systematic account of the family Asteraceae (pp. 73-86). *Plant Resources Center, Department of Botany, the University of Texas*. https://books.google.com.mx/books/about/The Comps of Mexico Tageteae and Anthemi.html?id=6gZHAAAAYAAJ&redir_esc=y
- Vanti, G. L., Leshem, Y., & Masaphy S. (2021). Resistance response enhancement and reduction of *Botrytis cinerea* infection in strawberry fruit by *Morchella conica* mycelial extract. *Postharvest Biology and Technology*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111470>
- Xu, J., & Ouyang, G. (2018). Extraction: Solid-Phase microextraction. En *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14552-4>
- Zhang, L., Huang, Y., Xiao, Z., Feng, X., Zhang, J., Chen, S., He, H., Liao, S., Wang, Z., & Si, H. (2025). Antifungal action of β -pinene derivatives containing quaternary ammonium scaffold against *Rhizoctonia solani* with damaging cell membranes and affecting energy metabolism. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, Article 106586. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106586>
- Zubrod, J. P., Bundschuh, M., Arts, G., Brühl, C. A., Imfeld, G., Knäbel, A., Payraudeau, S., Rasmussen, J. J., Rohr, J. R., Scharmüller, A., Smalling, K. L., Stehle, S., Schulz, R., & Schäfer, R. B. (2019). Fungicides: an overlooked pesticide class?. *Environmental Science & Technology*, 53(7), 3347-3365. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04392>
- Zulu, L., Gao, H., Zhu, Y., Wu, H., Xie, Y., Liu, X., Yao, H., & Rao, Q. (2023). Antifungal effects of seven plant essential oils against *Penicillium digitatum*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00434-3>