

¿La nueva terapia para las plantas? – Los aceites esenciales para control de enfermedades en agricultura

Maricela Santiago-Santiago¹, Gabriela Sánchez-Viveros^{1,*}, Nicolaza Pariona², Luis Guillermo Hernández-Montiel³ y Roberto Gregorio Chiquito-Contreras^{1,*}

¹ Posgrado en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agrícolas-Campus Xalapa, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. CP. 91090.

² Red de Estudios Moleculares Avanzados, Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México. CP. 91073.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. La Paz, Baja California Sur, México. CP. 23096.

Resumen

Las enfermedades de las plantas generan considerables pérdidas económicas en el sector agrícola a nivel mundial y son una latente amenaza a la seguridad alimentaria. El uso de agroquímicos sintéticos representa la estrategia más común para el control de fitopatógenos. El uso excesivo actual de plaguicidas sintéticos, causan efectos negativos en el medio ambiente, salud humana y otros organismos. Debido a estas limitaciones surge la necesidad de generar nuevas “terapias” ecológicas y sostenibles para el control de enfermedades en plantas. Algunos estudios proponen el uso de aceites esenciales por su bioactividad como agentes de biocontrol contra plagas en la agricultura. Pero a pesar de sus amplias aplicaciones en otras áreas, su baja solubilidad acuosa, alta volatilidad y sensibilidad a la luz, temperatura y oxígeno, limitan su uso en aplicaciones agrícolas. Por ello, el objetivo de la presente revisión es presentar un marco actualizado del uso de aceites esenciales para el control de enfermedades y su impacto en la agricultura.

Palabras clave: Encapsulación, mecanismos de acción, metabolitos secundarios, nanotecnología agrícola, quimiotipos.

The new therapy for plants? – Essential oils for disease control in agriculture

Abstract

Plant diseases generate considerable economic losses in the agricultural sector worldwide and are a latent threat to food security. The use of synthetic agrochemicals represents the most common strategy for the control of phytopathogens. The current excessive use of synthetic pesticides cause negative effects on the environment, human health and other organisms. Due to these limitations, the need arises to generate new ecological and sustainable therapies for the control of diseases in plants. Some studies propose the use of essential oils for their bioactivity as biocontrol agents against pests in agriculture. But despite its wide applications in other areas, its low aqueous solubility, high volatility, and sensitivity to light, temperature, and oxygen limit its use in agricultural applications. Therefore, the objective of this review is to present an updated framework for the use of essential oils for disease control and its impact on agriculture.

Keywords: Agricultural nanotechnology, chemotypes, encapsulation, mechanisms of action, secondary metabolites.

* Autor para correspondencia: gabsanchez@uv.mx; rchiquito@uv.mx

Cita del artículo: Santiago-Santiago M., Sánchez-Viveros G., Pariona N., Hernández-Montiel L.G., Chiquito-Contreras R.G. (en prensa). ¿La nueva terapia para las plantas? – Los aceites esenciales para control de enfermedades en agricultura. ITEA-Información Técnica Económica Agraria. Vol. xx: 1-17. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.005>



Introducción

El uso irracional de los recursos naturales renovables ha generado graves alteraciones a los ecosistemas. Por su parte la expansión de técnicas agrícolas convencionales, como el monocultivo y el uso de agroquímicos, están provocando una gran crisis ecológica a escala mundial, así como la pérdida de diversos recursos fitogenéticos (Devi et al., 2022). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2002), cerca de la tercera parte del suelo agrícola está degradada; y el 75 por ciento de la diversidad genética de los cultivos se ha perdido. Por esto, estrategias como "Farm to Fork" de la Unión Europea, buscan acelerar nuestra transición hacia un sistema alimentario sostenible. De acuerdo con esta estrategia "De la granja a la mesa" existe una urgente necesidad de reducir la dependencia de pesticidas y fertilizantes químicos (Chrapčienė et al., 2021).

En la agricultura, el desarrollo sostenible busca minimizar la degradación del suelo agrícola, maximizando a su vez la producción. Por lo que es necesario desarrollar nuevas estrategias para el control de enfermedades de los cultivos, que afectan el rendimiento y la calidad de la cosecha, causando pérdidas significativas en la producción mundial de alimentos. Investigaciones proponen el uso de productos naturales, que pueden ser sustancias químicas y biológicas aisladas de organismos vivos, de origen microbiano, vegetal o animal, sintetizados a través de vías metabólicas. Los metabolitos de origen vegetal que tienen grandes aplicaciones en productos agrícolas, farmacéuticos y alimentos, se dividen en dos grupos principales: primarios y secundarios (Kumar et al., 2022; Elshafie et al., 2023).

A pesar de la intensa investigación sobre los productos naturales de plantas, sólo dos tipos de insecticidas botánicos se han comerciali-

zados con éxito en los últimos 15 años, los basados en extractos de semillas de neem (*Azadiractina*) y los basados en aceites esenciales de plantas (Isman et al., 2011). Las catastróficas enfermedades de las plantas agravan el actual déficit de suministros de alimentos en el que cerca de 800 millones de personas no están alimentadas adecuadamente. Y las pérdidas a nivel mundial son casi un tercio de la producción de alimentos agrícolas, cerca de 1300 millones de toneladas anuales con un valor de un billón de dólares aproximadamente.

Las propiedades de los aceites esenciales como actividades antioxidantes, antimicrobianas y bactericidas, se han reportado desde hace mucho tiempo, por ello se utilizan ampliamente en medicina tradicional, cosmética y la industria de alimentos (Figura 1). Aunque se conocen los efectos contra diversos hongos fitopatógenos, oomicetes, bacterias, y malas hierbas (malezas), su uso en agricultura aún es muy escaso. Por la mayor demanda de los consumidores hacia el desarrollo de productos naturales, seguros y efectivos, los aceites esenciales han sido el foco central de la comunidad científica (Jugreet et al., 2020). Esta revisión tiene como objetivo describir la aplicación y actividad biológica de los aceites esenciales para el control de enfermedades en agricultura.

Enfermedades en la agricultura

Las enfermedades de las plantas ponen en peligro la agricultura y silvicultura de manera significativa en todo el mundo (Strange y Scott, 2005). Cada año se pierden entre el 20 y 40 % de los cultivos debido a esta situación (Worrall et al., 2018). Las enfermedades son el resultado de interacciones entre bacterias, hongos, virus, su huésped (planta) y el medio ambiente. El término enfermedad en fitopatología se puede aplicar a "una condición desordenada en las plantas". Patógenos

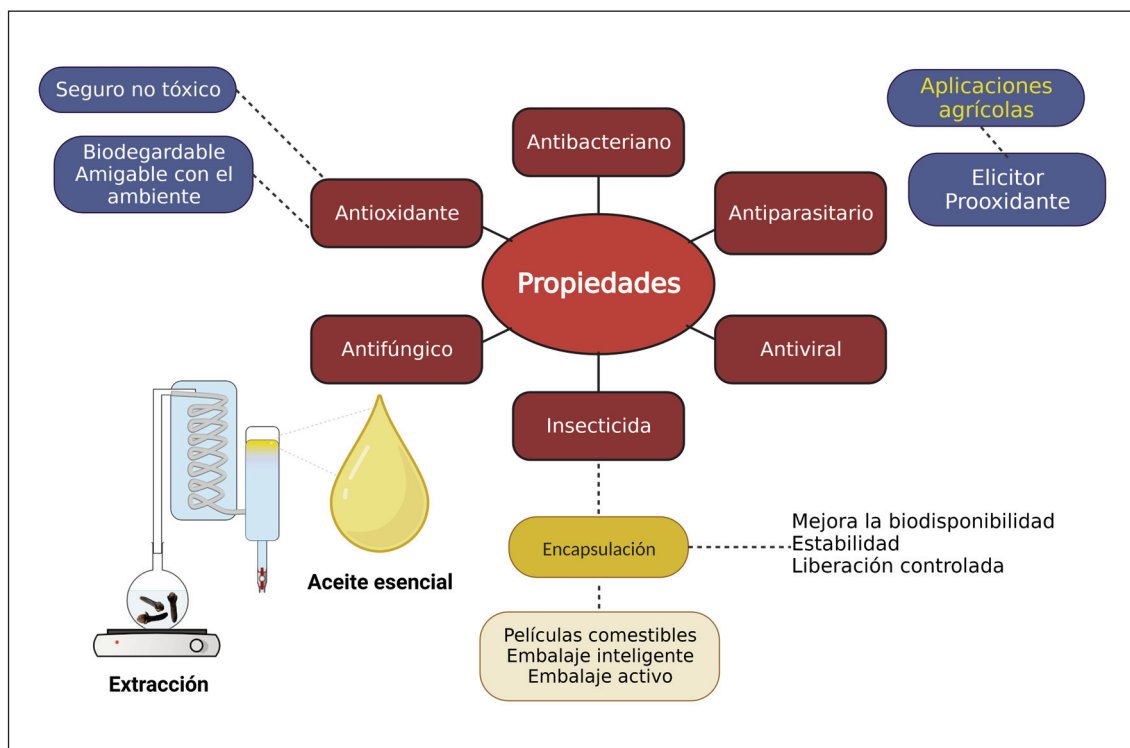


Figura 1. Propiedades de los aceites esenciales.
 Figure 1. Properties of essential oils.

fúngicos, bacteriano, virales y nemátodos son los principales causantes de enfermedades en las plantas. Algunos ejemplos de síntomas de las enfermedades (Tabla 1) incluyen el retraso en el crecimiento de las plantas, entrenudos más cortos, desarrollo inadecuado de raíces, malformación de hojas, producción inadecuada de clorofila y otros pigmentos, falta de desarrollo de frutos y flores (Riley *et al.*, 2002).

En los últimos años, los productos de síntesis química han sido utilizados ampliamente como fungicidas sintéticos para proteger los cultivos de forma efectiva. Pero, estos productos sintéticos con compuestos químicos muy poco biodegradables (benzimidazoles, hidrocarburos aromáticos e inhibidores de la biosíntesis de esteroides) son asociados con

un mayor impacto al medio ambiente y salud humana. Además de sus consecuencias ecológicas, son irritantes, tóxicos, mutagénicos teratogénicos y en algunos casos cancerígenos (Chacón *et al.*, 2021).

El desequilibrio mundial entre la creciente demanda de alimentos de la población y la producción agrícola nos lleva a un estado alarmante de la seguridad alimentaria. Para satisfacer la creciente demanda de calidad y cantidad de alimentos es necesaria una protección eficiente y eficaz de los cultivos agrícolas contra enfermedades. Se han reportado más de 19.000 hongos fitopatógenos que causan enfermedades en cultivos agrícolas y hortícolas en todo el mundo (Jain *et al.*, 2019). Estos hongos juegan un papel fundamental en la rentabilidad, calidad y cantidad

Tabla 1. Síntomas y signos de algunas enfermedades.
Table 1. Symptoms and signs of some diseases.

Planta	Enfermedad	Agente causal	Síntomas / Signos	Referencias
Zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.)	Tizón foliar	<i>Alternaria</i> spp.	Pudrición negra / Conidios	Chrapačiené et al., 2021
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Marchitez del tomate	<i>Phytophthora capsici</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> y <i>Fusarium oxysporum</i>	Marchitez y clorosis del follaje; pudrición del sistema de raíces / Macroconidios, esporas	Fernández-Herrera et al., 2013
Café (<i>Coffea arabica</i> L.)	Roya del café	<i>Hemileia vastatrix</i> Berk. & Br.	Manchas cloróticas, lesiones con el centro color café / Urediniosporas color naranja en el envés de las hojas	Talhinhas et al., 2017
Papaya (<i>Carica papaya</i> L.)	Antracnosis en fruto	<i>Colletotrichum</i> spp.	Lesiones hundidas y oscuras / Masas compactas de colonias de esporas color naranja, rosadas o salmon; hifas	Ruiz-Campos et al., 2022

de productos frescos. *Fusarium* se encuentra entre los géneros de hongos de mayor importancia económica mundial, y es de los agentes causales más estudiados. Otras enfermedades fúngicas de gran importancia son las causadas por *Aspergillus* y *Penicillium* spp., que causan descomposición, maduración acelerada y acumulación de micotoxinas (Chang et al., 2022). Otros patógenos de importancia económica durante la etapa de postcosecha y que afectan fácilmente frutas y hortalizas frescas son *Alternaria*, *Botrytis*, *Geotrichum* y *Sclerotinia* (Chen et al., 2014). *Magnaporthe oryzae* ha sido considerado por algunos fitopatólogos como el hongo patógeno de mayor importancia económica, con más de la mitad de la población mundial dependiendo del arroz como principal fuente de calorías. Este fitopatógeno puede tener efectos devastadores en ese cultivo. Otros organismos de importancia mundial son *Botrytis cinerea*, por su amplia gama de huéspedes, causando daños severos en todas las etapas de la cosecha. *Puccinia* spp., que afecta el cultivo de trigo causando las enfermedades de roya; *Colletotrichum* spp., su importancia radica en que prácticamente todos los cultivos son susceptibles a una o más especies de este hongo. Como patógeno postcosecha puede causar pérdidas de hasta el 100 % de la fruta almacenada (Dean et al., 2012). Los agentes causales descritos pueden generar enfermedades como: marchitez, tizón, podredumbre de frutos y tallos, antracnosis, moho gris en tallos y frutos.

Aceites esenciales: Fuentes y métodos de obtención

Los aceites esenciales (AE's) son metabolitos secundarios de las plantas y están compuestos de una mezcla lipofílica o compuestos volátiles producidos, principalmente, por plantas aromáticas y medicinales; presentando una alta actividad contra plagas, insectos y

hongos fitopatógenos (Assadpour et al., 2023). Químicamente, están constituidos por más de 200 compuestos de bajo peso molecular, terpenos o derivados fenilpropánicos. Clasificados en dos clases: fracción volátil y residuo no volátil. La fracción volátil constituye entre el 90 y 95 % del peso total del aceite: monoterpenos, sesquiterpenos y sus derivados oxigenados, en menor proporción alcoholes, ésteres y aldehídos alifáticos. El residuo no volátil está presente entre 1 y 10 % del peso total del aceite esencial, que generalmente son ácidos grasos, hidrocarburos, esteroides, ceras flavonoides y carotenoides (Hanif et al., 2019). Los AE's han demostrado actividad biológica, antimicrobiana, antioxidante, insecticida, bactericida, antiviral, antiinflamatorio, analgésico y anticancerígenos; y son muy utilizados en la conservación de alimentos. Estas mezclas de compuestos biosintetizados por las plantas, también son llamadas aceites volátiles naturales. Los fitoquímicos como alcaloides, flavonoides, ácidos fenólicos, monoterpenos, isoflavonas y aldehídos se reportan como los principales componentes de los aceites esenciales. Las plantas aromáticas más utilizadas son (Tabla 2): tomillo (*Thymus vulgaris*), canela (*Cinnamomum verum*), comino (*Cuminum cuminum*), clavo (*Syzygium aromaticum*), ajedrea (*Satureja hortensis*) y romero (*Salvia rosmarinus*) (Chang et al., 2022). Otras fuentes reportadas son eucalipto (*Eucalyptus globulus*), zacate limón (*Cymbopogon citratus*), ajeno (*Artemisia vulgaris*), alcanforero (*Cinnamomum camphora*), eucalipto (*Eucalyptus globulus*), menta (*Mentha*), orégano (*Origanum vulgare*) y pimienta negra (*Piper nigrum*).

Algunos reportes indican más de 3000 tipos diferentes de aceites esenciales, pero sólo 300 son utilizados ampliamente en la industria alimentaria. En 2021, el mercado global de AE's fue de 8,74 mil millones de dólares (USD). Con una proyección de 2021 al 2028, que el mercado aumentará de 9,62 a 18,25 mil millones de dólares (Rout et al., 2022).

Los aceites esenciales se pueden obtener de diversas plantas, especialmente, de especies aromáticas (Ni et al., 2021). Se extraen de la materia prima (órgano de la planta) utilizando técnicas tradicionales, como el prensado en frío, hidrodestilación y la destilación por arrastre de vapor. También existen algunas innovadoras como la hidro y destilación asistida por microondas y extracción con fluido super crítico. Generalmente, se extraen por hidrodestilación, destilación con vapor y agua y extracción con solventes (da Costa Gonçalves et al., 2021; Ni et al., 2021). El rendimiento de la extracción varía de acuerdo a la fase fenológica de la planta de donde se extraerá (Kesraoui et al., 2022). Regularmente, un AE se constituye de 20 a 60 sustancias activas, pero se caracterizan por tres componentes principales con una concentración relativamente alta, que conforman cerca del 90 % del peso o volumen total del AE. La composición química cambia significativamente de una región de cultivo a otra de la planta; y dentro de un mismo territorio, depende de las diferentes condiciones ambientales, estos pueden redirigir la ruta de biosíntesis modificando la composición química y actividad biológica de estos fitoquímicos.

Quimiotipos de los aceites esenciales

La composición química es la propiedad más importante a considerar en la funcionalidad de un aceite esencial. Principalmente, varían según el órgano de la planta del que se extrae (Raveau et al., 2020). Otros factores que influyen en la composición cuantitativa y cualitativa son: genotipo, ubicación geográfica, estado vegetativo, condiciones del procesamiento de la materia prima (planta), condiciones edáficas y ambientales; y métodos de extracción. Estos factores generan composiciones químicas específicas de un AE, que determinan los "quimiotipos" y "ecotipos".

Tabla 2. Actividad biológica pre cosecha en agricultura de algunos aceites esenciales.
 Table 2. Preharvest biological activity in agriculture of some essential oils.

Fuente de aceite esencial	Compuestos químicos (bioactivos)	Aplicación	Referencias
Clavo (<i>Syzygium aromaticum</i> L. Myrtaceae)	Eugenol, β -cariofileno, α -humuleno	Repelencia y toxicidad contra áfidos	Haro-González et al., 2021
Tomillo común (<i>Thymus vulgaris</i>)	p-Cimeno, carvacrol, γ -terpineno	Control de tizón bacteriano (<i>Pseudomonas syringae</i>) en germinación de soja	Sotelo et al., 2021
Tomillo común (<i>Thymus vulgaris</i>)	Timol y citral	Inhibición del crecimiento del fitopatógeno <i>Fusarium oxysporum</i> en tomate de árbol	Alzate et al., 2009
Limoncillo (<i>Cymbopogon citratus</i>)	Timol y citral	Inhibición del crecimiento del fitopatógeno <i>Fusarium oxysporum</i> en tomate de árbol	Alzate et al., 2009
Pimienta gorda (<i>Pimenta dioica</i>)	Eugenol y metileugenol	Control de <i>Sitophilus zeamais</i> en maíz almacenado	dos Santos et al., 2022
Eucalipto (<i>eucalyptus citriodora</i> , <i>eucalyptus grandis</i> , <i>eucalyptus microcorys</i>)	1,8-Cineol, α -pineno, citronelal, terpineol, limoneno	Antagonismo contra el hongo causal de la roya del caféto (<i>H. vastatrix</i>)	Caetano et al., 2020
Citronela (<i>Cymbopogon</i>)	Citronelal, geraniol y citronelol	Efecto fungicida contra el fitopatógeno del cultivo de tomate <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. lycopersici	Peixoto et al., 2023
Árbol de té (<i>Melaleuca</i>)	Terpinen-4-ol y α -terpineno	Efecto fungicida contra el fitopatógeno del cultivo de tomate <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. lycopersici	Peixoto et al., 2023
Ajedrea (<i>Satureja hortensis</i>)	Carvacrol, γ -terpineno	Actividad herbicida contra malas hierbas <i>Amaranthus retroflexus</i> y <i>Chenopodium album</i>	Hazrati et al., 2017
Ajo (<i>Allium sativum</i>)	No reportado	Actividad antifúngica contra el moho gris (<i>Botrytis cinerea</i>) de la grosella negra (<i>Ribes nigrum</i> L.).	Sesan et al., 2015

Tabla 2. Actividad biológica pre cosecha en agricultura de algunos aceites esenciales (continuación).
 Table 2. Preharvest biological activity in agriculture of some essential oils (continuation).

Fuente de aceite esencial	Compuestos químicos (bioactivos)	Aplicación	Referencias
Clavo de olor (<i>Syzygium aromaticum</i>)	Eugenol, acetato de eugenol, isocariofileno	Pudrición negra de la vaina del cacao causada por especies de <i>Phytophthora</i>	Nana et al., 2015
Menta silvestre (<i>Mentha arvensis</i> L.)	Mentol, mentona, isomentona, metilacetato	Actividad antifúngica contra el agente causal de tizón (<i>Alternaria alternataes</i>) en tomate	Perveen y Bokahri, 2020
Acuyo o hierba santa (<i>Piper auritum</i>)	Timol, eugenol, cimeno	Actividad antifúngica <i>in vitro</i> contra <i>F. oxysporum</i> FCHJ-T6, <i>F. oxysporum</i> FCHA-T7 y <i>F. equiseti</i> FCHE-T8, aislados de raíz de chile habanero (<i>Capsicum chinense</i>)	Chacón et al., 2021
Orégano griego (<i>Origanum vulgare</i> subsp. <i>hirtum</i>)	Carvacrol	Inhibición del crecimiento de <i>Alternaria</i> spp en zanahoria	Chrapaćienė et al., 2021
Orégano (<i>Origanum vulgare</i> subsp. <i>vulgare</i> L)	Sabineno, β-cariofileno y germacreno	Inhibición del crecimiento de <i>Alternaria</i> spp en zanahoria	Chrapaćienė et al., 2021
Ajo (<i>Allium sativum</i>)	Trisulfuro de alilo, disulfuro de dialilo, sulfuro de dialilo	Reducción de síntomas de antracnosis en plantas de fresa causado por <i>Colletotrichum nymphaeae</i> en invernadero	Hosseini et al., 2020
Cúrcuma (<i>Curcuma longa</i> L.)	Curcumina Fracción de hexano	Añublo del arroz (<i>Pyricularia grisea</i>), tizón tardío del tomate (<i>Phytophthora infestans</i>) y tizón de la vaina del arroz (<i>Rhizoctonia solani</i>)	Kim et al., 2003
Cúrcuma (<i>Curcuma longa</i> L.)	Curcumina Fracción de acetato de etilo	Moho gris del pepino (<i>Botrytis cineria</i>), tizón tardío del tomate (<i>Phytophthora infestans</i>), roya de la hoja del trigo (<i>Puccinia recondita</i>) y tizón de la vaina del arroz (<i>Rhizoctonia solani</i>)	Kim et al., 2003

Cuando las variaciones en la composición se deben a las condiciones ambientales se denomina "ecotipos". Pero cuando la composición está bajo el control de la genética de la planta, el perfil químico permanece constante en el tiempo en diferentes ambientes, en este caso se denominan "quimiotipos" (Marcial et al., 2016). Este término es para denominar la molécula aromática que tiene mayor presencia en los AE's. Una de las especies más estudiadas es el *Thymus vulgaris* L. (tomillo silvestre) y es conocida por sus seis quimiotipos que se denominan de acuerdo al monoterpeno dominante presente en el AE: carvacrol, geraniol, thuyanol-4, linalool, α -terpineol y timol (Najar et al., 2021). Los quimiotipos también son plantas morfológicamente similares que tienen diferente composición de metabolitos secundarios.

En especies vegetales ampliamente estudiadas se han identificado diferentes perfiles químicos, estos compuestos (Tabla 2 y 3) son los quimiotipos responsables de la capacidad biológica (antimicrobiana y pesticida) de los aceites esenciales reportados con actividad contra diversas enfermedades vegetales de gran importancia económica. Por ejemplo, en las especies *Eucalyptus globulus* se tiene eucalipto quimiotipo cineol y eucalipto quimiotipo peperitona. En *Mentha piperita* se han identificado menta quimiotipos mentol y mentona. Para *Origanum vulgare* se tiene aceite esencial de orégano quimiotipos cavacrol y timol.

Mecanismos de acción

Los aceites esenciales inhiben el crecimiento microbiano atacando la bicapa de fosfolípidos, alteración del mecanismo enzimático de producción y metabolismo de energía, y la disrupción de la fuerza motriz de protones. Los principales mecanismos de acción en aplicaciones agrícolas de los AE's se presentan en

la Figura 2. El mecanismo antibacteriano de los AE's se debe principalmente a los efectos sinérgicos de sus componentes principales (Ni et al., 2021). Debido a la lipofilia de los AE's, pueden pasar fácilmente a través de la bicapa de fosfolípidos de la membrana celular bacteriana, destruyendo la estructura de la pared celular aumentando la permeabilidad de las membranas celulares (Wang et al., 2019). Los terpenoides, principales componentes de muchos aceites esenciales vegetales, son neurotóxicos para insectos y ácaros (Isman et al., 2011). Algunos autores han reportado que los compuestos fenólicos de los aceites esenciales son capaces de inducir la lisis celular, como un mecanismo de acción fungicida de los aceites (Rhayour et al., 2003).

Debido a sus diversos perfiles químicos, los AE's poseen propiedades antioxidantes, así como efectos citotóxicos y elicitor; además de capacidades prooxidantes. Por su efecto antioxidante activan mecanismos inhibidores de las reacciones de oxidación e inhibición de la formación de lípidos oxidados, ambos por radicales libres o inhibidores de enzimas o moléculas prooxidantes. Sin embargo, estos también pueden tener un efecto prooxidante, lo que pudiera ser una limitante para algunas aplicaciones de protección a cultivos, debido a que un prooxidante puede inducir un estrés oxidativo mediante dos vías: la formación de especies reactivas de oxígeno o por la inhibición de los sistemas antioxidantes.

Aplicación de aceites esenciales en pre y postcosecha

Al igual que el ser humano, las plantas pueden presentar estrés debido a condiciones no favorables de tipo biótico y/o abiótico. Bajo condiciones de estrés, las plantas modifican sus funciones metabólicas y fisiológicas de manera normal, lo que influye negativamente en el crecimiento, desarrollo y pro-

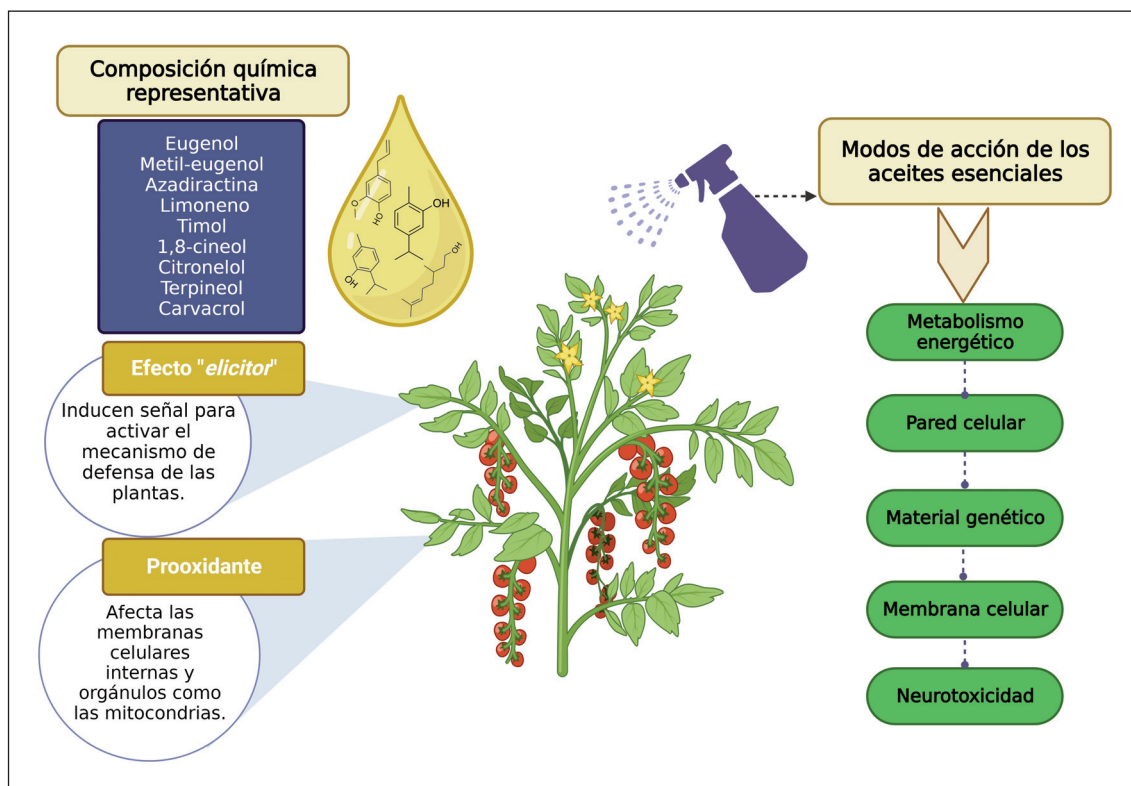


Figura 2. Principales mecanismos de acción de aceites esenciales en agricultura.
 Figure 2. Main mechanisms of action of essential oils in agriculture.

ductividad. Particularmente, el estrés causado por factores bióticos incluye, cierto tipo de microorganismos que infectan a las plantas y desencadenan una respuesta generalizada llamada estrés oxidativo. Aunque este tipo de estrés, con mucha frecuencia es causado por factores abióticos como el estrés hídrico, tanto por exceso de agua como por sequías, salinidad del suelo y toxicidad por metales pesados, entre otros. Las plantas que se someten a un estrés oxidativo podrían recibir una "terapia" a base de aceites esenciales, aprovechando dos propiedades importantes que son su capacidad "antioxidante" y de "elictor". El estrés oxidativo es un fenómeno complejo, químico y fisiológico, en plantas superiores y se desarrolla por la pro-

ducción excesiva y acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Demidchik, 2015). Esto puede contrarrestarse con la actividad antioxidante de los aceites esenciales, o aplicando una bioestimulación correcta para la prevención y contención de este estado de estrés. Sin embargo, su aplicación está limitada a su alta volatilidad, hidrofobicidad y facilidad de oxidación. Recientemente, se han utilizado nanoportadores biopoliméricos para la incorporación de aceites esenciales que se han utilizado como antioxidantes y antimicrobianos en envases de alimentos. El uso de la nanotecnología en la agricultura ha llevado al desarrollo de nuevos conceptos y productos agrícolas. Actualmente, se explora el suministro de hormonas vegetales, nanosen-

Tabla 3. Actividad biológica postcosecha en agricultura de algunos aceites esenciales.
 Table 3. Postharvest biological activity in agriculture of some essential oils.

Fuente de aceite esencial	Compuestos químicos (bioactivos)	Efecto	Referencias
Limoncillo o zacate limón (<i>Cymbopogon citratus</i> L.)	Geranial (citral), neral y limoneno	Actividad antifúngica <i>in vitro</i> contra patógenos poscosecha: <i>Colletotrichum coccodes</i> , <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> , <i>Rhizopus stolonifer</i> y <i>Aspergillus niger</i>	Tzortzakis y Economakis, 2007
Bergamota silvestre (<i>Monarda didyma</i> L.)	No reportado Aceite nanoemulsificado	Actividad antifúngica <i>in vitro</i> contra <i>Colletotrichum</i> sp. y <i>Alternaria</i> sp. Conservación poscosecha del arándano utilizando nanoemulsiones del AE	Zhang et al., 2023
Orégano (<i>Origanum vulgare</i> L.)	No reportado Recubrimiento de quitosano con aceite	Efecto antifúngico <i>in vitro</i> sobre la germinación de esporas de <i>R. stolonifer</i> y <i>Aspergillus niger</i> Retardo de la descomposición de frutos de tomate cherry, moho negro y podredumbre	Barreto et al., 2016
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i> L.)	No reportado Nanopartículas de quitosano-aceite	Reducción de la incidencia de <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> en frutos de aguacate cv. Hass	Correa-Pacheco et al., 2017
Aceites comerciales (X2 y X5, Xeda International SA, Francia)	X2: R-carvona, eugenol, cariofileno X5: Timol y adyuvante (propilenglicol)	Efecto fungitóxico <i>in vitro</i> contra <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> Protección poscosecha del mango contra la antracnosis	Chillet et al., 2018
Limoncillo o zacate limón (<i>Cymbopogon citratus</i> L.)	Geranial y neral	Control <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> de antracnosis causada por <i>C. gloeosporioides</i> en papaya	Ali et al., 2015
Ajo (<i>Allium sativum</i>)	Trisulfuro de ajo, disulfuro de dialilo, sulfuro de dialilo	Reducción del desarrollo de pudrición del fruto de fresa causada por <i>Colletotrichum nymphaeae</i>	Hosseini et al., 2020

Tabla 3. Actividad biológica postcosecha en agricultura de algunos aceites esenciales (continuación).
 Table 3. Postharvest biological activity in agriculture of some essential oils (continuation).

Fuente de aceite esencial	Compuestos químicos (bioactivos)	Efecto	Referencias
Romero (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	α -pineno, acetato de bornilo, 1,8-cineol, canfeno	Reducción del desarrollo de pudrición del fruto de fresa causada por <i>Colletotrichum nymphaeae</i>	Hosseini et al., 2020
Clavo de olor (<i>Syzygium aromaticum</i>)	No reportado	Inhibición del crecimiento del moho azul en <i>Citrus reticulata</i> causado por <i>Penicillium italicum</i>	Chen et al., 2019
Naranja lima y naranja navel bahía (<i>Citrus sinensis</i>)	Limoneno	Actividad antifúngica contra <i>Rhizopus stolonifer</i> en uva	Rezende et al., 2020
Tomillo	Timol, carvacrol	Efecto antifúngico contra <i>Alternaria alternata</i> y <i>Penicillium expansum</i>	Nikkhah y Hashemi, 2020
Canela	Cinamaldehído, citral propilenglicol acetal	Aumento de vida útil postcosecha de la fruta de azufaifo	
Romero	α -pineno, terpineno	Efecto antifúngico contra <i>Penicillium expansum</i>	Nikkhah y Hashemi, 2020
Mejorana	1,8-cineol	Aumento de vida útil postcosecha de la fruta de azufaifo	
<i>Torreya grandis</i>	δ -cadineno	Control postcosecha de <i>Botrytis cinerea</i> para conservación de tomates cherry	Jiang et al., 2023
Nispero japónes (<i>Eriobotrya japonica</i>) Cidra o limón francés (<i>Citrus medica</i>)	Transnerolidol Dimetoxicumarina		
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i> L.)	Timol, cimol, linalol	Control del patógeno de antracnosis (<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>) postcosecha <i>in vitro</i> y en frutos de aguacate	Sellamuthu et al., 2013
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i> L.)	No reportado	Control <i>in vitro</i> de <i>Penicillium digitatum</i> y <i>P. italicum</i> en cítricos	Plaza et al., 2004
Canela (<i>Cinnamomum verum</i>)	No reportado	Control <i>in vitro</i> de <i>Penicillium digitatum</i> y <i>P. italicum</i> en cítricos	Plaza et al., 2004
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i> L.)	Timol	Actividad fungitóxica de los compuestos bioactivos contra el moho gris	López-Reyes et al., 2010
Lavanda (<i>Lavandula officinalis</i>)	Linalol	(<i>Botrytis cinerea</i>) de frutos de manzana	
Orégano (<i>Origanum vulgare</i>)	Carvacrol		
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i> L.)	Timol	Actividad fungitóxica de los compuestos bioactivos contra el moho azul	López-Reyes et al., 2010
Albahaca (<i>Ocimum basilium</i>)	Linalol	(<i>Penicillium expansum</i>) de frutos de manzana	

sores, transferencia de genes diana y la liberación controlada de agroquímicos (Worrall et al., 2018). Investigadores en materiales han diseñado y desarrollado nanopartículas con las características deseadas, para ser utilizadas como protectores o para entrega precisa y dirigida a través de la absorción o encapsulación de un compuesto activo (Khandelwal et al., 2016). La toxicidad de los aceites esenciales en fitopatógenos ha sido establecida en estudios de laboratorio. Pero es necesario generar información de la eficacia de estos aceites como protectores de cultivos en condiciones de campo. Los insecticidas a base de aceites esenciales están dirigidos a insectos y ácaros, principalmente. Se necesitan más experimentos de laboratorio, invernadero y de campo que puedan abordar específicamente esta cuestión (Isman et al., 2011). Productos como **EcoTrol®** (10 % aceite de romero, 5 % de geraniol, 2 % aceite de menta); **TetraCURB®** (50 % aceite de romero; 3 % aceite de clavo; 1,95 % de aceite de menta); **Prev-Am®** (6 % de aceite de naranja); **Ecoaceite®** (mezcla al 2 % de aceites de árbol de té (*Melaleuca*) y eucalipto) y **Akabrown®** (1,25 % de aceite de canela; 1 % de aceite de menta; 0,5 % aceite de clavo; 0,25 % aceite de orégano) son comercializados para el tratamiento de ácaros, pulgones, mosquitas blancas y minador de cítricos (Isman, 2020).

Diversas investigaciones han explorado las propiedades repelentes de insectos y antimicrobianas de los aceites esenciales obtenidas de fuentes vegetales. Sin embargo, para fines comerciales y fitosanitarios, los principales son los compuestos por eugenol (por ejemplo, aceites de clavo y laurel). Esos estudios evalúan la aplicación de estos fitoquímicos en dos tiempos diferentes, durante la precosecha (Tabla 2) y la postcosecha (Tabla 3). Sin embargo, los mecanismos exactos de acción de estos aceites contra infecciones por hongos y bacterias en las plantas aún no están completamente aclaradas.

El uso de aceites esenciales en postcosecha ha sido estudiado y aplicado con diversos fines como la conservación de alimentos, la protección contra microorganismos patógenos y la mejora organoléptica de los productos (Raveau et al., 2020). Es importante considerar que el uso de AE's debe realizarse de manera segura y de acuerdo a las regulaciones sanitarias vigentes, con el fin de proteger la salud del consumidor y la calidad del producto. Por esto, la investigación en este campo está en constante evolución para explorar nuevas aplicaciones y estudiar los mecanismos de acción, que ayuden a comprender los beneficios y limitaciones de los AE's en postcosecha.

Algunas de las formas en las que los AE's pueden aplicarse en postcosecha son para la conservación de frutos. Por sus propiedades antifúngicas y antioxidantes, ayudan a prevenir el crecimiento de hongos patógenos y prologan la vida útil al inhibir la oxidación y deterioro del fruto (Rezende et al., 2020). Ayudan también al control de patógenos, insectos y plagas. Estos metabolitos secundarios tiene propiedades bactericidas y antivirales que actúan reduciendo la carga microbiana en productos frescos como frutas y verduras precortadas o los llamados alimentos de IV gama. Actúan como repelentes naturales de insectos y plagas y dan protección a productos almacenados. Los recubrimientos comestibles a base de aceites esenciales con ampliamente estudiados para la protección de la superficie y pérdida de humedad de frutos frescos (Cao et al., 2022).

Futuros retos y perspectivas

La gran diversidad de uso de los aceites esenciales como fuentes de compuestos bioactivos cubren extensos campos de estudios. Estos fitoquímicos, inicialmente, se utilizaban con fines medicinales y de conservación de ali-

mentos. Existen puntos desafiantes correspondientes a las aplicaciones de los aceites esenciales. Los principales desafíos tecnológicos para la aplicación de esos fitoquímicos se deben a su naturaleza hidrofóbica, volatilidad y reactividad de las moléculas bioactivas. La encapsulación de AE es una posible solución a los problemas que enfrentan estos sistemas biológicos, porque mejora la estabilidad y protección, controla la liberación de sustancias química y mejora la biodisponibilidad (Rout et al., 2022). Actualmente, la nanotecnología ofrece soluciones para los desafíos de este campo. Algunas investigaciones han sugerido la aplicación de técnicas nanotecnológicas. La formulación de nanoemulsiones de aceites vegetales, como una forma eficiente de aumentar la estabilidad física y bioactividad de las moléculas bioactivas (Ghazy et al., 2021). Los nanopesticidas representan un desarrollo tecnológico emergente que podrían ofrecer mayor eficacia, durabilidad y reducción en la cantidad actual de ingredientes activos sintéticos utilizados (de Oliveira et al., 2014; Zhang et al., 2023). Otras aportaciones a las principales perspectivas y desafíos futuros para estos sistemas como biocontrol podrían ser los estudios de la contribución de los AE para combatir fitopatógenos a nivel transcriptómico y metabólico (Kesraoui et al., 2022).

Conclusiones

Se debe incentivar el desarrollo y uso de productos "terapéuticos" alternativos a los plaguicidas sintéticos para el control de malezas y enfermedades de las plantas, con el objetivo de transitar hacia una agricultura más sostenible, que disminuya la incidencia de enfermedades por ser una importante amenaza para la seguridad alimentaria mundial. La aplicación de aceites esenciales tiene amplio potencial como nueva terapia para el control de

enfermedades vegetales, pueden ser utilizados como bioestimulantes o elicitores en plantas, y por su efecto fitotóxico se recomienda su uso en la formulación de bioherbicidas. En el área de la postcosecha y conservación de alimentos, la aplicación de aceites esenciales sigue siendo un campo de investigación muy activo que necesitan resolver desafíos como la variabilidad en la composición y concentración de los quimiotipos y la estabilidad durante el almacenamiento.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca no. 791307 para la realización de estudios en el posgrado Doctorado en Ciencias Agropecuarias (PNPC 004173; Nivel CONSO-LIDADO).

Referencias bibliográficas

- Alzate D.A., Mier G.I., Afanador L., Durango D.L., García C.M. (2009). Evaluación de la fitotoxicidad y la actividad antifúngica contra *Colletotrichum acutatum* de los aceites esenciales de tomillo (*Thymus vulgaris*), limoncillo (*Cymbopogon citratus*), y sus componentes mayoritarios. *Vitae* 16: 116-125.
- Ali A., Wee Pheng T., Mustafa M.A. (2015). Application of lemongrass oil in vapour phase for the effective control of anthracnose of 'Sekaki' papaya. *Journal of Applied Microbiology* 118: 1456-1464. <https://doi.org/10.1111/jam.12782>
- Assadpour E., Can Karaça A., Fasamanesh M., Mahdavi S.A., Shariat-Alavi M., Feng J., Kharazmi M.S., Rehman A., Jafari S.M. (2023). Application of essential oils as natural biopesticides; recent advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*: 1-21. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2170317>

- Barreto T.A., Andrade S.C., Maciel J.F., Arcanjo N.M., Madruga M.S., Meireles B., Cordeiro A.M.T, Souza E.L., Magnani M. (2016). A chitosan coating containing essential oil from *Origanum vulgare* L. to control postharvest mold infections and keep the quality of cherry tomato fruit. *Frontiers in Microbiology* 7: 1724. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01724>
- Caetano A.R.S., Chalfoun S.M., Resende M.L.V., Angelico C.L., Santiago W.D., Magalhaes M.L., Rezende D.A.C.S., Soares L.I., Nelson D.L., Cardoso M.G. (2020). Chemical characterization and determination of *in vivo* and *in vitro* antifungal activity of essential oils from four Eucalyptus species against the *Hemileia vastatrix* Berk and Br fungus, the agent of coffee leaf rust. *Australian Journal of Crop Science* 14: 1379-1384. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2249>
- Cao Z., Zhou D., Ge X., Luo Y., Su J. (2022). The role of essential oils in maintaining the postharvest quality and preservation of peach and other fruits. *Journal of Food Biochemistry* 46: e14513. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14513>
- Chacón C., Bojórquez-Quintal E., Caamal-Chan G., Ruíz-Valdiviezo V.M., Montes-Molina J.A., Garrido-Ramírez E.R., Rojas-Abarca L.M., Ruiz-Lau N. (2021). *In vitro* antifungal activity and chemical composition of *Piper auritum* kunth essential oil against *Fusarium oxysporum* and *Fusarium equiseti*. *Agronomy* 11: 1098. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061098>
- Chang Y., Harmon P.F., Treadwell D.D., Carrillo D., Sarkhosh A., Brecht J.K. (2022). Biocontrol potential of essential oils in organic horticulture systems: from farm to fork. *Frontiers in Nutrition* 8: 1275. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.805138>
- Chen C., Cai N., Chen J., Wan C. (2019). Clove essential oil as an alternative approach to control postharvest blue mold caused by *Penicillium italicum* in citrus fruit. *Biomolecules* 9: 197. <https://doi.org/10.3390/biom9050197>
- Chen Q., Xu S., Wu T., Guo J., Sha S., Zheng X., Yu T. (2014). Effect of citronella essential oil on the inhibition of postharvest *Alternaria alternata* in cherry tomato. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94: 2441-2447. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6576>
- Chillet M., Minier J., Ducroq M., Meile J.C. (2018). Postharvest treatment of mango: Potential use of essential oil with thymol to control anthracnose development. *Fruits* 73: 153-157. <https://doi.org/10.17660/th2018/73.3.2>
- Chrapačienė S., Rasiukevičiūtė N., Valiuškaitė A. (2021). Biocontrol of carrot disease-causing pathogens using essential oils. *Plants* 10: 2231. <https://doi.org/10.3390/plants10112231>
- Correa Pacheco Z.N., Bautista Baños S., Valle Marquina M.Á., Hernández López M. (2017). The effect of nanostructured chitosan and chitosan thyme essential oil coatings on *Colletotrichum gloeosporioides* growth *in vitro* and on cv Hass avocado and fruit quality. *Journal of Phytopathology* 165: 297-305. <https://doi.org/10.1111/jph.12562>
- da Costa Gonçalves D., Ribeiro W.R., Goncalves D.C., Menini L., Costa H. (2021). Recent advances and future perspective of essential oils in control *Colletotrichum* spp.: A sustainable alternative in postharvest treatment of fruits. *Food Research International* 150: 110758. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110758>
- Dean R., Van Kan J.A., Pretorius Z.A., Hammond Kosack K.E., Di Pietro A., Spanu P.D., Rudd J.J., Dickman M., Kahmann R., Ellis J., Foster G.D. (2012). The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology* 13: 414-430. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>
- Demidchik V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany* 109: 212-228. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021>
- Devi P.I., Manjula M., Bhavani R.V. (2022). Agrochemicals, environment, and human health. *Annual Review of Environment and Resources* 47: 399-421. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-111015>
- de Oliveira J.L., Campos E.V.R., Bakshi M., Abhilash P.C., Fraceto L.F. (2014). Application of nanotechnology for the encapsulation of botanical insecticides for sustainable agriculture: prospects and promises. *Biotechnology Advances* 32: 1550-1561. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.010>

- dos Santos M.S., Oro C.E., Dolianitis B.M., Wancura J.H., Tres M.V., Zabot G.L. (2022). Control of phytopathogens in agriculture by essential oils. En: Essential oils. Applications and trends in food science and technology (Ed. Santana O.M.), pp. 221-245. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99476-1_10
- Elshafie H.S., Camele I., Mohamed A.A. (2023). A Comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites based-plant origin. International Journal of Molecular Sciences 24: 3266. <https://doi.org/10.3390/ijms24043266>
- FAO (2002). Sustainable Development Goals Helpdesk. Food and Agriculture Organization. Disponible en: <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-the-2030-agenda-for-sustainable-development/sustainable-agriculture/en/> (Consultado: 20 mayo 2023).
- Fernández-Herrera E., Ruiz J.G., Puente E.R., Ramos M.A. (2013). Patógenos y síntomas asociados a la marchitez del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en Texcoco México. Biotecnia 15(3): 46-50.
- Ghazy O.A., Fouad M.T., Saleh H.H., Kholif A.E., Morsy T.A. (2021). Ultrasound-assisted preparation of anise extract nanoemulsion and its bioactivity against different pathogenic bacteria. Food Chemistry 341: 128259. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128259>
- Hanif M.A., Nisar S., Khan G.S., Mushtaq Z., Zubair M. (2019). Essential oils. En: Essential Oil Research. Trends in biosynthesis, analytics, industrial applications and biotechnological production (Ed. Malik S.), pp. 3-17. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16546-8_1
- Haro-González J.N., Castillo-Herrera G.A., Martínez-Velázquez M., Espinosa-Andrews H. (2021). Clove essential oil (*Syzygium aromaticum* L. Myrtaceae): Extraction, chemical composition, food applications, and essential bioactivity for human health. Molecules 26: 6387. <https://doi.org/10.3390/molecules26216387>
- Hazrati H., Saharkhiz M.J., Niakousari M., Moein M. (2017). Natural herbicide activity of *Satureja hortensis* L. essential oil nanoemulsion on the seed germination and morphophysiological features of two important weed species. Ecotoxicology and Environmental Safety 142: 423-430. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.041>
- Hosseini S., Amini J., Saba M.K., Karimi K., Pertot I. (2020). Preharvest and postharvest application of garlic and rosemary essential oils for controlling anthracnose and quality assessment of strawberry fruit during cold storage. Frontiers in Microbiology 11: 1855. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01855>
- Isman M.B., Miresmailli S., Machial C. (2011). Commercial opportunities for pesticides based on plant essential oils in agriculture, industry and consumer products. Phytochemistry Reviews 10: 197-204. <https://doi.org/10.1007/s11101-010-9170-4>
- Isman M.B. (2020). Commercial development of plant essential oils and their constituents as active ingredients in bioinsecticides. Phytochemistry Reviews 19: 235-241. <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09653-9>
- Jain A., Sarsaiya S., Wu Q., Lu Y., Shi J. (2019). A review of plant leaf fungal diseases and its environment speciation. Bioengineered 10: 409-424. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1649520>
- Jiang L.L., Wang J.B., Wang W.H., Lei B., Feng J.T., Wu H., Ma Z.Q. (2023). Effects of three essential oil fumigation treatments on the postharvest control of *Botrytis cinerea* and their efficacy as preservatives of cherry tomatoes. Plant Disease 107: 1874-1882. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-22-2134-RE>
- Jugreet B.S., Suroowan S., Rengasamy R.K., Mahomoodally M.F. (2020). Chemistry, bioactivities, mode of action and industrial applications of essential oils. Trends in Food Science & Technology 101: 89-105. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.025>
- Kesraoui S., Andrés M.F., Berrocal-Lobo M., Soudani S., Gonzalez-Coloma A. (2022). Direct and indirect effects of essential oils for sustainable crop protection. Plants 11: 2144. <https://doi.org/10.3390/plants11162144>

- Kim M.K., Choi G.J., Lee H.S. (2003). Fungicidal property of *Curcuma longa* L. rhizome-derived curcumin against phytopathogenic fungi in a greenhouse. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 1578-1581. <https://doi.org/10.1021/jf0210369>
- Khandelwal N., Barbole R.S., Banerjee S.S., Chate G.P., Biradar A.V., Khandare J.J., Giri A.P. (2016). Budding trends in integrated pest management using advanced micro-and nano-materials: Challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management* 184: 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.071>
- Kumar S., Saini R., Suthar P., Kumar V., Sharma R. (2022). Plant Secondary Metabolites. En: *Plant secondary metabolites. Their food and therapeutic importance* (Ed. Sharma A.K., Sharma A.), pp. 371-413. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4779-6_12
- López Reyes J.G., Spadaro D., Gullino M.L., Garibaldi A. (2010). Efficacy of plant essential oils on postharvest control of rot caused by fungi on four cultivars of apples *in vivo*. *Flavour and Fragrance Journal* 25: 171-177. <https://doi.org/10.1002/ffj.1989>
- Marcial G., De Lampasona M.P., Vega M.I., Lizarraga E., Viturro C.I., Slanis A., Juárez M.A., Elechosa M.A., Catalán C.A. (2016). Intraspecific variation in essential oil composition of the medicinal plant *Lippia integrifolia* (Verbenaceae). Evidence for five chemotypes. *Phytochemistry* 122: 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.11.004>
- Najar B., Pistelli L., Ferri B., Angelini L.G., Tavarini S. (2021). Crop yield and essential oil composition of two *Thymus vulgaris* chemotypes along three years of organic cultivation in a hilly area of central Italy. *Molecules* 26: 5109. <https://doi.org/10.3390/molecules26165109>
- Nana W.L., Eke P., Fokom R., Bakanrga Via I., Begoude D., Tchana T., Tchameni N.S., Kuate J., Menut C., Fekam B.F. (2015). Antimicrobial activity of *Syzygium aromaticum* and *Zanthoxylum xanthoxyloides* essential oils against *Phytophthora megakarya*. *Journal of Phytopathology* 163: 632-641. <https://doi.org/10.1111/jph.12363>
- Ni Z.J., Wang X., Shen Y., Thakur K., Han J., Zhang J.G., Hu F., Wei Z.J. (2021). Recent updates on the chemistry, bioactivities, mode of action, and industrial applications of plant essential oils. *Trends in Food Science & Technology* 110: 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.070>
- Nikkhah M., Hashemi M. (2020). Boosting anti-fungal effect of essential oils using combination approach as an efficient strategy to control postharvest spoilage and preserving the jujube fruit quality. *Postharvest Biology and Technology* 164: 111159. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111159>
- Peixoto P.M.C., Júlio A.A., Jesus E.G.D., Venancio A.N., Parreira L.A., Santos M.F.C., Menini L. (2023). Fungicide potential of citronella and tea tree essential oils against tomato cultivation's phytopathogenic fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and analysis of their chemical composition by GC/MS. *Natural Product Research* 38: 667-672. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2184358>
- Perveen K., Bokhari, N.A. (2020). Management of *Alternaria* leaf blight in tomato plants by mentha essential oil. *Plant Protection Science* 56: 191-196. <https://doi.org/10.17221/100/2019-PPS>
- Plaza P., Torres R., Usall J., Lamarca N., Vinas I. (2004). Evaluation of the potential of commercial post-harvest application of essential oils to control citrus decay. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79: 935-940. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511869>
- Raveau R., Fontaine J., Lounès-Hadj Sahraoui A. (2020). Essential oils as potential alternative biocontrol products against plant pathogens and weeds: A review. *Foods* 9: 365. <https://doi.org/10.3390/foods9030365>
- Rezende J.L., Fernandes C.C., Costa A.O.M., Santos L.S., Vicente Neto F., Sperandio E.M., Souchier E.L., Colli A.C., Crotti A.E.M., Miranda M.L.D. (2020). Antifungal potential of essential oils from two varieties of *Citrus sinensis* (lima orange and bahia navel orange) in postharvest control of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill. *Food Science and Technology* 40 : 405-409. <https://doi.org/10.1590/fst.30519>

- Rhayour K., Bouchikhi T., Tantaoui-Elaraki A., Sendide K., Remmal A. (2003). The mechanism of bactericidal action of oregano and clove essential oils and of their phenolic major components on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. *Journal of Essential Oil Research* 15: 356-362. <https://doi.org/10.1080/10412905.2003.9698611>
- Riley M.B., Williamson M.R., Maloy O. (2002). Plant disease diagnosis. *The Plant Health Instructor APS* 10. <https://doi.org/10.1094/PHI-I-2002-1021-01>
- Rout S., Tambe S., Deshmukh R.K., Mali S., Cruz J., Srivastav P.P., Amin P.D., Gaikwad K.K., de Aguiar Andrade E.H., de Oliveira M.S. (2022). Recent trends in the application of essential oils: The next generation of food preservation and food packaging. *Trends in Food Science & Technology* 129: 421-439. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.10.012>
- Ruiz-Campos C., Umaña-Rojas G., Gómez-Alpizar L. (2022). Identificación multilocus de especies de *Colletotrichum* asociadas a la antracnosis de papaya. *Agronomía Mesoamericana* 33(1): 45495. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.45495>
- Sellamuthu P.S., Sivakumar D., Soundy P. (2013). Antifungal activity and chemical composition of thyme, peppermint and citronella oils in vapor phase against avocado and peach postharvest pathogens. *Journal of Food Safety* 33: 86-93. <https://doi.org/10.1111/jfs.12026>
- Sesan T.E., Enache E., Iacomi B.M., Oancea F., Iacomi C. (2015). Antifungal activity of some plant extracts against *Botrytis cinerea* Pers. in the blackcurrant crop (*Ribes nigrum* L.). *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus* 14: 29-43.
- Sotelo J.P., Oddino C., Giordano D.F., Carezzano M.E., Oliva M.D.L.M. (2021). Effect of *Thymus vulgaris* essential oil on soybeans seeds infected with *Pseudomonas syringae*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 116: 101735. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101735>
- Strange R.N., Scott P.R. (2005). Plant disease: a threat to global food security. *Annual Review of Phytopathology* 43: 83-116. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.113004.133839>
- Talhinhas P., Batista D., Diniz I., Vieira A., Silva D.N., Loureiro A., Tavares S., Pereira A.P., Azinheira H.G., Guerra-Guimaraes L., Várzea V., do Céu Silva M. (2019). The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology* 18: 1039-1051. <https://doi.org/10.1111/mpp.12512>
- Tzortzakis N.G., Economakis C.D. (2007). Antifungal activity of lemongrass (*Cymbopogon citratus* L.) essential oil against key postharvest pathogens. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 8: 253-258. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.01.002>
- Wang L., Hu W., Deng J., Liu X., Zhou J., Li X. (2019). Antibacterial activity of *Litsea cubeba* essential oil and its mechanism against *Botrytis cinerea*. *RSC Advances* 9: 28987-28995. <https://doi.org/10.1039/C9RA05338G>
- Worrall E.A., Hamid A., Mody K.T., Mitter N., Pappu H.R. (2018). Nanotechnology for plant disease management. *Agronomy* 8: 285. <https://doi.org/10.3390/agronomy8120285>
- Zhang Y., Dai J., Ma X., Jia C., Han J., Song C., Liu Y., Wei D., Xu H., Qin J., Yang S. (2023). Nanoemulsification essential oil of *Monarda didyma* L. to improve its preservation effect on postharvest blueberry. *Food Chemistry* 417: 135880. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135880>

(Aceptado para publicación el 5 de febrero de 2024)