



Control alternativo de *Fusarium oxysporum* Schltl y *Pectobacterium carotovorum* (Jones) Waldee et al., mediante el uso de aceites esenciales como una alternativa biológica

Alternative control of *Fusarium oxysporum* Schltl and *Pectobacterium carotovorum* (Jones) Waldee et al., by the use of essential oils as a biological alternative

Allison Stefanny Castro Monroy

Estudiante de Bacteriología y Laboratorio Clínico

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

allisonscastro@unicolmayor.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-9536-0628>

Bogotá D.C, Colombia.

Jovanna Acero Godoy

Candidata Doctora en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE)

Universidad Nacional de Costa Rica

jacerog@unicolmayor.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-1656-6888>

Costa Rica

Resumen

Los marchitamientos vasculares producidos por *Fusarium oxysporum* Schltl y la podredumbre blanda bacteriana por *Pectobacterium carotovorum* (Jones) Waldee et al., son enfermedades de importancia para diferentes tipos de cultivos como hortalizas, frutas y cereales; ocasionando pérdidas económicas y por sobrevivir en el suelo por largos periodos de tiempo, por lo que su control es difícil. El uso de plaguicidas sintéticos ha sido la tradicional para combatirlos, las consecuencias a largo plazo por su acumulación en el medio han tomado relevancia. El uso de alternativas biológicas extraídas de plantas empieza a destacarse como un método alternativo de control. En esta revisión, se busca hacer una recopilación bibliográfica de la capacidad de los aceites esenciales extraídos de las plantas aromáticas, como tomillo, menta, clavo, entre otros, y sus efectos como posibles agentes de control de estos patógenos, sus capacidades antimicrobianas y antifúngicas, destacando a su vez su forma de acción, los métodos, y las concentraciones que han demostrado efecto sobre los patógenos descritos.

Recibido: 09/04/2021

Revisado: 26/07/2021

Aprobado: 23/08/2021



Los artículos de Environment & Technology se comparten con Licencia Creative Commons: CC BY-NC-ND

Palabras clave: Control fitopatógico; recopilación bibliográfica; plantas aromáticas; extractos de plantas; agentes de biocontrol

Abstract

The vascular wilts produced by *Fusarium oxysporum* Schldt and the bacterial soft rot by *Pectobacterium carotovorum* (Jones) Waldee et al., are diseases of importance for different types of crops such as vegetables, fruits and cereals; causing economic losses and for surviving in the ground for long periods of time, which is why its control is difficult. The use of synthetic pesticides has been the traditional one to combat them, the long-term consequences of their accumulation in the environment have taken relevance. The use of biological alternatives extracted from plants is beginning to stand out as an alternative method of control. In this review, we seek to make a bibliographic compilation of the capacity of essential oils extracted from aromatic plants, such as thyme, mint, cloves, among others, and their effects as possible control agents of these pathogens, their antimicrobial and antifungal capacities, highlighting in turn its form of action, the methods, and the concentrations that have demonstrated an effect on the pathogens described.

Keywords: Phytopathogenic control; bibliographic compilation; aromatic plants; plant extracts; biocontrol agents.

Introducción

En el campo de la agricultura, el tratamiento y control de los fitopatógenos, requiere un estudio especial, principalmente en un tiempo en el que se busca no solo mejorar los cultivos y disminuir aquellos agentes que los afectan, sino a su vez cuidar el medio ambiente. Existen una gran variedad de patógenos desde bacterias hasta virus. Sin embargo, algunos generan mayor atención debido a su patogenicidad, sintomatología en la planta, y formas de tratamiento.

Una de las más destacadas es *Pectobacterium carotovorum* (Jones) Waldee et al., perteneciente a la familia de las *Enterobacteriaceae*, y conocida por ser patógena en una gran diversidad de cultivos como hortalizas, frutas, cereales y vegetales (Corzo-López & Quiñones-Pantoja, 2017; Cubero Agüero, 2019; Quintanilla, 2020). Este patógeno se describió inicialmente dentro del género *Erwinia*, en gran parte debido a su crecimiento en cultivo; sin embargo, gracias análisis moleculares se determinó que este género debería ser reclasificado en dos grandes grupos, de tal forma que, en el grupo I o verdaderas *Erwinias*, pertenecerían especies como *E. amylovora*, *E. maliotivora*, *E. persicinus*, *E. psidii*, *E. rhapontici* y *E. tracheiphila*, destacadas por provocar necrosis, marchitez; mientras que en el grupo II o grupo *carotovorum*, aquellas que se pueden identificar en las especies de *Pectobacterium carotovorum* (*Erwinia carotovorum*) y que provocan en las plantas pudriciones blandas o suaves (Quintanilla, 2020).

La bacteria *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al., son bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulados móviles, con presencia de enzimas pectinolíticas (a excepción de *Pectobacterium cyripeddi*). Se destaca por, provocar la podredumbre blanda bacteriana (Corzo-López & Quiñones-Pantoja, 2017) del tubérculo y la pata negra de la planta; la primera se caracteriza por generar una lesión acuosa inicialmente pequeña, la cual presenta una conformación

suave, pálida y viscosa en su interior; presentando al tiempo un marchitamiento de la parte aérea de la planta lo que conlleva finalmente al marchitamiento total de la planta y su posterior muerte (Cubero Agüero, 2019; Quintanilla, 2020). Así mismo, es la especie más destacada de este género, debido a su amplia variedad de subespecies y hospedantes (*Solanum lycopersicum* L. (tomate), *Allium cepa* L. (cebolla), *Solanum tuberosum* L. (papa), *Persea americana* Miller (aguacate), *Sedum album* L. (arroz), *Tragopogon pratensis* L. (lechuga), entre otros). Se le reconoce como un tipo de patógeno oportunista dada su capacidad de vivir no solo en el tejido vegetal sino en el suelo, siendo transmitida a través de un tubérculo contaminado o residuos de cosechas, agua de riego, maquinaria agrícola (Padilla Galvez, 2017).

Del mismo modo, otros de los microorganismos de estudio agrícola por su elevada patogenicidad, son los hongos del género *Fusarium* spp. Link, pertenecientes al phylum *Ascomycota* y la familia *Nectriaceae* (Database, 2021). Estos son mayormente identificados como hongos de campo, puesto que poseen una gran capacidad para sobrevivir en materia orgánica y, a su vez, ser patógenos en aquellas plantas que se encuentran susceptibles a una infección por desbalance, provocando comúnmente la enfermedad del marchitamiento del cultivo (Edel-Hermann & Lecomte, 2019; López-Díaz et al., 2018). Son de los patógenos de gran relevancia agrícola, dado que las afecciones que provoca son generalmente de tipo irreversibles y su capacidad de sobrevivir por largos periodos de tiempo en el suelo, a través de estructuras fúngicas como micelio, clamidosporas, hace que pueda dispersarse con los movimientos de suelos infectados y aguas de aspersión (Edel-Hermann & Lecomte, 2019; López-Díaz et al., 2018; Retana et al., 2018; Yao et al., 2019).

No obstante, una de las especies que más auge ha tomado debido a su alto potencial patogénico es el *Fusarium oxysporum* Schltdl, reconocido por ser el agente causal de la marchitez vascular en especies de plantas como son: el *Solanum lycopersicum* L. (tomate), *Musa x paradisiaca* L. (plátano), *Gossypium* L. (algodón), *Saccharum officinarum* L. (caña de azúcar), *Fragaria x ananassa* Duchesne (fresas), *Tragopogon pratensis* L. (lechuga), granos y varias especies de leguminosas como *Cicer arietinum* L. (garbanzos), *Lens culinaris* Medicus (lentejas) (Amaral et al., 2017; Edel-Hermann & Lecomte, 2019). Este al igual que el *Pectobacterium* spp. Waldee descrito anteriormente, posee la capacidad de variar en cuanto a cepa de la misma especie según la planta a infectar, por lo que al nombre de la especie en algunos casos lo sigue la asignación



a *formae speciales* (f. sp.) (Gordon, 2017), por ejemplo: *cubense*, *cucumerinum*, *niveum*, *radicis-cucumerinum* y *lycopersici*, entre otros.

Es entonces, dada la importancia fitopatógena de estos dos microorganismos; *F. oxysporum* Schltldl y *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al., surge la necesidad de identificar formas de protección vegetal basadas en controles alternativos que no ocasionen un impacto a gran escala en el ambiente. Aunque, se han utilizado biocontroladores a base de microorganismos sobre estos, como lo han sido el uso de *Bacillus amyloliquefaciens* Priest et al., *Pseudomonas aeruginosa* (J.Schröter) Migula, y *Trichoderma harzianum* Rifai; todos con capacidad de antagonismo al competir con estos microorganismos, por los nutrientes para la producción de metabolitos secundarios (Azaiez et al., 2018; Gerayeli et al., 2018; Palyzová et al., 2019); el uso de otros métodos de control como el uso de aceites esenciales extraídos de plantas, se detalla como una solución de impacto sobre algunos fitopatógenos.

Lo anterior, en razón de disminuir la huella a nivel agrícola del uso de sustancias químicas, debido en gran medida a las consecuencias a futuro de la acumulación de los mismos, tanto en las plantas como en el suelo, y de igual forma en el medio, los humanos como principales consumidores de gran variedad de estos cultivos, y a su vez, sobre aquellos microorganismos que se ven expuestos continuamente a estas sustancias, generando no solo una bioacumulación sino también una resistencia a los mismos. Dado lo anterior, la finalidad del conocimiento acerca de los aceites esenciales, y especialmente su actuación a nivel agrícola como controladores de hongos y bacterias; genera una solución ambiental amigable con el medio, con una oferta de sustancias químicas presentes en las mismas plantas, que permiten la identificación y desarrollo de mejores mecanismos de acción sobre patógenos agrícolas.

Gracias a la variedad de plantas y así mismo, de los componentes activos en las mismas con capacidad antimicrobiana y antifúngica, trabajando de la mano con la biotecnología vegetal, los aceites esenciales, se exhiben como un recurso ideal para el tratamiento de fitopatógenos. El objetivo de esta revisión fue realizar una recopilación general de algunos aceites esenciales usados sobre el *F. oxysporum* Schltldl y *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al., su forma de acción, los métodos, y las concentraciones que han demostrado efecto sobre los patógenos descritos.

Patogenia de los microorganismos

a. Patogenicidad *F. oxysporum* Schltldl

La infección por este hongo, inicia en la raíz de la planta generando marchitez vascular, reducción del crecimiento, cambio de color de las hojas pequeñas a un tono amarillo y marchitamiento progresivo de hojas y tallos; provocando finalmente a la muerte de la planta (Amaral et al., 2017; Park et al., 2020; Yao et al., 2019). El mecanismo más reconocido para el daño vegetal se debe a su capacidad de secretar ácido oxálico entre la membrana y la pared celular o el apoplasto, conllevando a una quelación de Ca^{2+} y debilitando así, no solo la pared vegetal, sino el sistema inmunológico de la planta, lo que permite al hongo segregar otras enzimas capaces de degradar la pared vegetal. Así mismo, se genera un desbalance en la osmoregulación celular al inhibirse el cierre de la estoma, generando la marchitez y la necrosis de las hojas (Amaral et al., 2017). Igualmente, se han descrito la presencia de algunos genes de patogenicidad asociados a la gravedad de la infección provocada por el *F. oxysporum* Schltdl sobre la planta como son genes *fga1*, *fga2* y *fgb1*, los cuales codifican a las subunidades α y β de la proteína G y el gen *FocVell* que codifica a una proteína de terciopelo, junto con enzimas de degradación de la pared celular de las plantas (CWDE's: cell wall degradation enzymes) y en destrucción de la defensa de las mismas (Huang et al., 2019). Como se presenta en la **figura 1**.

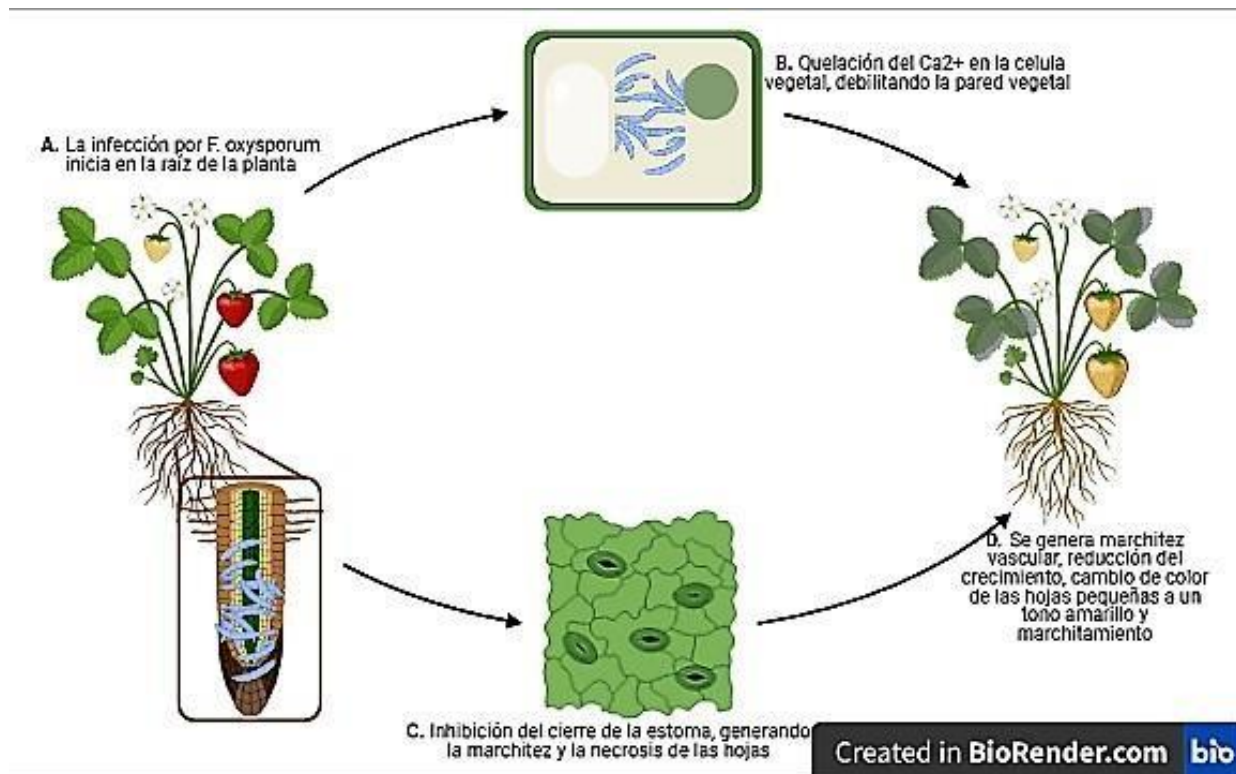


Figura 1. Ciclo de vida de *Fusarium oxysporum* Schltdl en cultivo de *Fragaria x ananassa* Duchesne (fresas). Fuente. Elaboración propia usando BioRender.

No obstante, no todas las subespecies de este hongo son patógenas, por lo que algunas de estas han sido usadas como supresoras del crecimiento y expresión genética de cepas patógenas de este mismo, esto a través de la producción de sesquiterpenos y otros compuestos orgánicos y; a su vez, estos mismos compuestos son capaces de inhibir el crecimiento de nematodos y otros hongos patógenos, un ejemplo de esto es la capacidad de reducir la enfermedad causada por agentes patógenos vasculares como *Verticillium dahliae* Klebahn y *Pythium ultimum* Trow (de Lamo & Takken, 2020).

b. Patogenicidad *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al.

La infección por esta bacteria inicia con el ingreso de la bacteria a la planta a través de una herida, como se presenta en la **figura 2**, cuando inicia con la activación de sus mecanismos de virulencia; basados en su capacidad de secretar una variedad de enzimas, especialmente pectinasas, enzimas degradadoras de la pared celular de las plantas (Cubero Agüero, 2019; Niemi et al., 2017), sumado a una variedad de proteasas, endoglucanasas, poligalacturonasas, pectato liasas y xilanasas (Niemi et al., 2017; Padilla Galvez, 2017), convirtiendo a las especies de *Pectobacterium* como patógenos altamente necrotróficos en plantas. La degradación celular, conlleva a la muerte celular y por ende, al marchitamiento de la planta, especialmente de la parte aérea de la misma, y su posterior muerte.



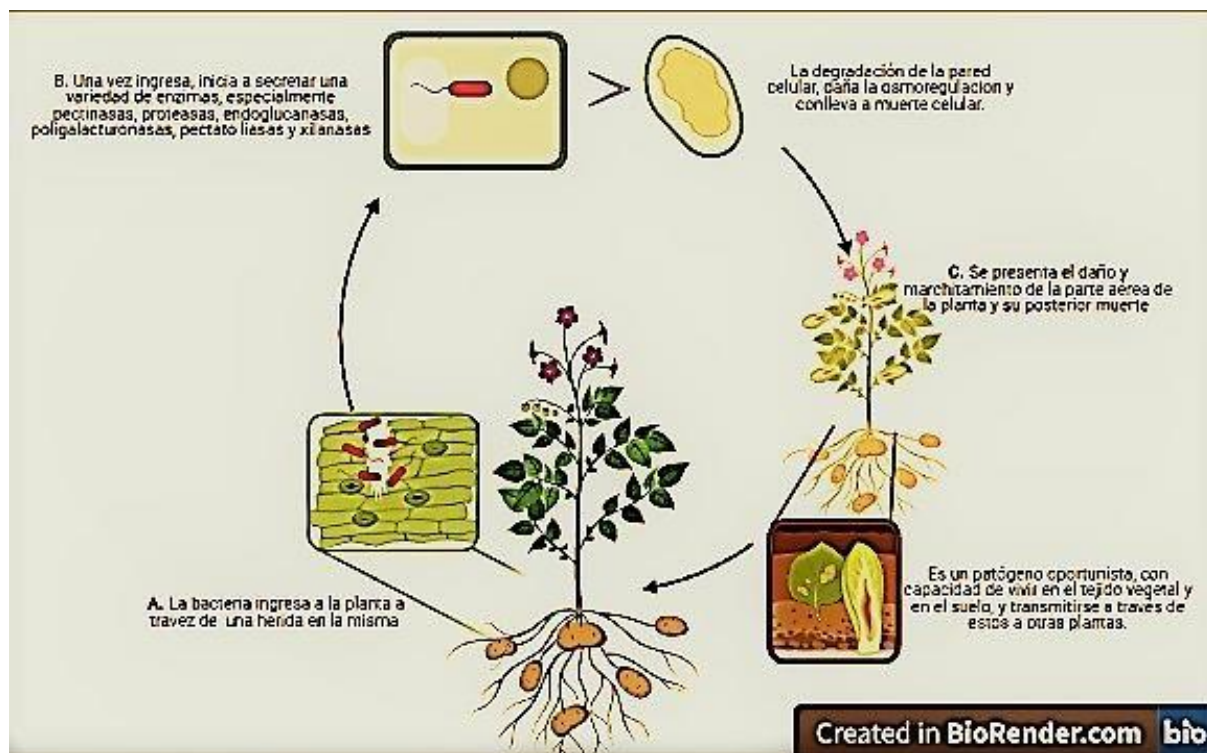


Figura 2. Ciclo de vida de *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al. Fuente. Elaboración propia usando BioRender.

Es dada esta misma capacidad de degradación celular y marchitamiento agresivo de los cultivos identificado en ambos organismos, que la idea de poder utilizar mecanismos derivados de las plantas para su control y tratamiento que los aceites esenciales y sus propiedades controladoras, toman relevancia e importancia.

Aceites esenciales

Los aceites esenciales (AE) provienen del metabolismo secundario de las plantas, y son principalmente obtenidos de las plantas aromáticas; estos son compuestos químicos incoloros, volátiles, líquidos, solubles en lípidos y solventes orgánicos. Caracterizados por ser mezclas complejas de hasta más de 100 componentes en concentraciones variables entre ellos y según la planta de la que se obtienen. Aunque poseen dos o tres componentes principales, los cuales están en una concentración más alta en comparación con los demás (entre un 20-70%). Entre sus principales compuestos se encuentran: compuestos alifáticos de bajo peso molecular (alcanos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos), terpenos (monoterpenos, sesquiterpenos) y fenilpropanos (Acero-Godoy et al., 2019; Aguilar – Veloz et al., 2020; Allenspach et al., 2020;

Aziz et al., 2018; Chouhan et al., 2017; Moghaddam & Mehdizadeh, 2016; Nazzaro et al., 2017; Raveau et al., 2020). A pesar de esto, su importancia se debe a la baja toxicidad que generan sobre los seres vivos, en contraste con compuestos químicos de uso controlador.

Métodos de extracción

Se han identificado varios métodos de extracción de AE, los cuales se han dividido en dos grandes grupos, aquellos métodos convencionales y los nuevos o innovadores. En el primer grupo, se destacan métodos como son la hidrodestilación, la destilación al vapor y la extracción con solventes, por el contrario en el segundo grupo, se encuentran metodologías como la extracción con fluidos supercríticos, ultrasonido y la extracción asistida por microondas y óhmicas (Aziz et al., 2018; Gao et al., 2017; Pavlić et al., 2020; Roohinejad et al., 2017; Stratakos & Koidis, 2016).

En cuanto a los métodos convencionales, la hidrodestilación (HD), corresponde a una destilación heterogénea, en el que, dependiendo del material vegetal a usar, puede tomar 3-6 horas el procedimiento, aunque su mayor ventaja, es que no se usan disolventes químicos, lo que mejora el rendimiento y la composición exacta de los AE. Sin embargo, se han derivado diferentes modificaciones para el mejoramiento de este método como son, la adición de la trituración del material vegetal durante la destilación para aumentar el nivel de AE; el uso de aditivos como sales (principalmente el cloruro de sodio); el pre tratamiento del material vegetal con enzimas como celulasas, hemicelulasas, xilanasas, pectinasas o proteasas con el fin de inducir una mejor ruptura de las paredes celulares; no obstante esta última modificación, aún se encuentra en estudios, pues genera una mayor oxidación de algunos compuestos de los AE; y finalmente, el uso de polisorbatos (como el Tween 80) que promueven la formación de micelas, que mejoran la recuperación de AE (Aziz et al., 2018; Oktavianawati, 2020; Pavlić et al., 2020; Roohinejad et al., 2017).

Por otro lado, el uso de solventes suele utilizarse para la extracción de AE que son térmicamente lábiles. Si bien, los disolventes más usados son alcohol, hexano, etanol, acetona, éter de petróleo, metanol e incluso agua, es el hexano el más destacado debido a su alta volatilidad (Abdel-Hameed et al., 2020; González-Fernández et al., 2020; Mohseni & Rad, 2018). Una de las mayores ventajas de este tipo de extracción, es que no se exponen los AE a altas temperaturas durante el proceso, lo que disminuye la formación de cambios químicos sobre sus componentes. Finalmente, la destilación al vapor es el método más usado y conocido, puesto que es el más sencillo, en comparación con los anteriormente mencionados.

No obstante, expone al AE a mayor cantidad de modificaciones químicas debido a la exposición prolongada de los compuestos a altas temperaturas por largos periodos de tiempo (1-10 horas), por lo que en algunos casos es necesaria una re-destilación, es por esto, que se han realizado al igual que con la hidrodestilación modificaciones para mejorar esta metodología, como son tratamientos previos con enzimas degradadoras de la pared celular y calentamiento asistido por microondas; los cuales mejoran la calidad de los AE y evitan las modificaciones químicas (Oktavianawati, 2020; Roohinejad et al., 2017; Stratakos & Koidis, 2016).

De igual importancia, entre los métodos nuevos se puede destacar la extracción con gases supercríticos; es una de las alternativas más destacadas, dada las condiciones que requiere, como el uso de bajas temperaturas, y una mayor difusión de este con el material vegetal, lo que disminuye el tiempo de extracción en contraste con los métodos convencionales, y sumado a esto, es menos nocivo para el ambiente, pues se utiliza comúnmente el dióxido de carbono como principal fluido, o en otros casos no requiere el uso de altas cantidades de disolventes orgánicos para la extracción (Bendif et al., 2018; Haloui & Meniai, 2017; Zermane et al., 2016).

Asimismo, el uso de ultrasonido permite a través de ondas sonoras la generación de burbujas de cavitación que al estallar rompen estructuras y permiten la liberación del AE, y si bien promueve grandes ventajas como la no formación de otros compuestos a los deseados, además de una reducción en el tiempo de extracción, su mayor desventaja es el costo (Aziz et al., 2018; Hu et al., 2020; Koubaa et al., 2016; Stratakos & Koidis, 2016; Zhong et al., 2018). Por otro lado, el uso de microondas, permite debido a su mecanismo de calentamiento único un mayor rendimiento en la extracción, el tiempo y la homogenización de la temperatura (Al Mamoori & Al Janabi, 2018; Haffizi et al., 2020; Hakimi et al., 2019; Ibrahim & Zaini, 2018; Liu et al., 2018; Zeković et al., 2017).

De mismo modo, se encuentra el calentamiento óhmico, basado en una forma de tratamiento térmico, en el que al disiparse energía eléctrica a través del material vegetal se genera calor, que permite la liberación de los AE (Aamir & Jittanit, 2017; Gavahian et al., 2020; Gavahian & Farahnaky, 2018; Kaur & Singh, 2016).

A pesar de las grandes ventajas de estas nuevas metodologías, lo que más se ha manifestado es el uso combinado de los métodos convencionales con estos innovadores. Como lo es el uso de hidrodestilación y la extracción con solventes asistidos con microondas, ultrasonido y óhmica, metodologías que han demostrado grandes beneficios para la extracción de aceites esenciales



especialmente para mejorar o conservar su capacidad antimicrobiana, antifúngica, antiviral (Che Radzi & Kasim, 2020; Elyemni et al., 2019; Gao et al., 2017; Gavahian et al., 2017; Hashemi et al., 2017; Hu et al., 2020; Koubaa et al., 2016; Kusuma & Mahfud, 2017; Pavlić et al., 2020; Sarah & Estherina, 2020; Seidi Damyeh et al., 2016; Seidi Damyeh & Niakousari, 2017; Yamamoto et al., 2019), además de ser una combinación amigable con el ambiente, pues la complementariedad entre las metodologías reduce el gasto de energía y materiales, especialmente en el uso de disolventes.

Aceites esenciales como alternativas de biocontrol

El mecanismo de acción de los AE sobre los microorganismos, está definido en gran parte a los derivados oxigenados que poseen en diferentes concentraciones, los cuales son responsables de las actividades biológicas y fisiológicas, entre los que se destacan procesos como son la inhibición de la formación de la pared celular y daño en la membrana celular al inhibir la síntesis de ergosterol en el caso de los hongos; así como una afectación de las mitocondrias fúngicas al inhibirse el transporte de electrones en esta.

De igual forma, una inhibición sobre la división celular, la síntesis de proteínas y material genético y la inhibición de las bombas de eflujo, tanto en hongos como en bacterias (Chouhan et al., 2017; Nazzaro et al., 2017; Plavsic et al., 2020; Raveau et al., 2020). También, se ha destacado la capacidad de inhibir la formación y estructura de biopelículas formadas tanto por bacterias como por levaduras, al dañar el desarrollo de flagelo en algunas bacterias impidiendo su movilidad lo que tiene un efecto sobre la adhesión celular y de esta forma la actividad metabólica de los microorganismos (Cáceres et al., 2020) y a su vez en la interacción célula-célula. Acción similar se provoca sobre los genes que sintetizan micotoxinas, sobre los cuales actúan los AE y disminuyen su producción como pasa sobre la aflatoxina (Nazzaro et al., 2017).

Aceites esenciales con efecto sobre *F oxysporum* Schltdl

Si bien el tema de los aceites esenciales ha tomado auge en los últimos años como una forma menos nociva de atacar a fitopatógenos en cultivos, sus estudios aún son limitados sobre ciertos patógenos. En el caso de este hongo, se ha evaluado el alcance inhibitorio de aceites provenientes del clavo, limoncillo, albahaca, tomillo, menta, laurel y orégano, por sus destacadas actividades antifúngicas. Como se evidencia en algunos estudios en el que el uso del AE de clavo, menta y limoncillo afectaba el crecimiento micelial de este hongo (Sharma et al., 2017); acerca de este, el

AE de clavo destaca por su alta concentración de eugenol, de la misma forma, en un estudio en 2020 (Muñoz Castellanos et al., 2020), fue el AE de clavo, el que mostro actividad antifúngica sobre el *F. oxysporum* Schltdl, en ambos estudios, se destaca la acción de este compuesto principalmente sobre la membrana, al desnaturalizar proteínas y reacciona con los fosfolípidos que constituyen la membrana celular.

Respecto a otro estudio fueron los AE de albahaca y tomillo, quienes presentaron mejor acción antifúngica sobre el hongo en concentraciones de nanoemulsiones más bajas de los usados en el estudio, registrando la inhibición del crecimiento radial del hongo como una inhibición micelial del mismo (Hassanin et al., 2017). En este caso, el AE de albahaca presento entre sus principales componentes linalol, 1,8-cineol y eugenol; sin embargo, al igual que el anterior destaca que es el eugenol el componente con más actividad al alterar la membrana celular y las estructuras de la pared celular.

En cuanto a los AE de laurel y menta, en un estudio, estos AE actuaron sobre los microorganismos *Fusarium moniliforme* Nirenberg, *Fusarium solani* (Martius) L. Lombard & Crous, *F. oxysporum* Schltdl y *Stemphylium solani* G.F.Weber, destacando con eficiencia la capacidad fungicida del AE de la menta en una concentración de 0,5% sobre el aceite de laurel a la misma concentración (Goudjil et al., 2016), en gran parte debido a la elevada presencia de mentol, carvona y limoneno, en el AE de menta, y que ha demostrado tener actividad sobre la membrana de los microorganismo y a su vez generar una pérdida de homeostasis conllevando a la muerte del mismo.

Este estudio en yuxtaposición con uno realizado en 2019, en el que a través de halos de inhibición y a una concentración de $1.50 \pm 0.20 \mu\text{g/mL}$, el AE de la menta destacaba como controlador del crecimiento del hongo, igualmente relacionado a la presencia elevada de mentol (Desam et al., 2019). En la **tabla 1**, se presentan los anteriores estudios de sensibilidad sobre este hongo bajo la acción de algunos aceites esenciales, enfatizando la planta, el método utilizado en estos, junto con la concentración mínima de aceite esencial que mostro capacidad de acción sobre este, además de su acción y porcentaje de inhibición.

Sin embargo, acerca de patógenos fúngicos, aunque han hablado del género *Fusarium* spp. Link, muy pocos enfatizan en un fitopatógeno tan destacado como el *F. oxysporum* Schltdl, especialmente en un país como Colombia en el que este hongo ha comenzado a afectar gran



cantidad de cultivos de alimentos. En cuanto a los AE reportados con capacidad antifúngica, existen pocos reportes de investigaciones basadas en especies de plantas nativas del país.

Tabla 1.

Aceites esenciales usados sobre F. oxysporum Schldl

ACEITES ESENCIALES USADOS PARA CONTROL DE <i>FUSARIUM OXYSPORUM</i>						
Aceite Esencial					%	
Nombre científico	Nombre Común	Método	CMI ^a	Acción	Inhibición ^b	Referencia
<i>Syzygium aromaticum</i> L.	Clavo		125 ppm			
<i>Mentha x piperita</i> L.	Menta	Microdilución	500 ppm	Inhibición micelial	100%	(Sharma et al., 2017)
<i>Cymbopogon citratus</i> DC.	Limoncillo		250 ppm			
<i>Ocimum basilicum</i> L.	Albahaca	Placa (Agar PDA modificado con AE)	4.000 ppm	Inhibición micelial	100%	(Hassanin et al., 2017)
<i>Thymus vulgaris</i> L.	Tomillo		2.000 ppm			
<i>Thymus vulgaris</i> L.	Tomillo	Placa (Agar PDA modificado con AE)	800 μLL^{-1}	Actividad fungicida	100%	(Moghaddam & Mehdizadeh, 2020)
<i>Laurus nobilis</i> L.	Laurel	Placa (Agar PDA modificado con AE)	0,5%	Actividad fungistática	>80%	(Goudjil et al., 2016)
<i>Mentha x piperita</i> L.	Menta		0.5 %		100%	
<i>Mentha x piperita</i> L.	Menta	Difusión en disco (Halo de inhibición) y Microtitulación (CMI)	1.50 \pm 0.20 $\mu\text{g/mL}$	Inhibición crecimiento (Halo de inhibición: 30,12 \pm 0,12 mm)	-----	(Desam et al., 2019)

<i>Origanum vulgare</i> L.	Orégano	Placa	400 - 1000 $\mu\text{g mL}^{-1}$	Actividad fungistática	-----	(Gonçalves et al., 2021)
<i>Eugenia caryophyllata</i> L.	Clavo	(Agar PDA modificado con AE)	500 ppm	Actividad fungicida	100%	(Muñoz Castellanos et al., 2020)
<i>Boesenbergia pulcherrima</i> W.	-----	(Agar PDA modificado con AE)	69,45 ppm	Actividad fungistática	-----	(Park et al., 2020)

Fuente: elaboración propia

Nota: CMI: (Concentración mínima inhibitoria)^a, % Inhibición^b: Porcentaje de inhibición

Desde el AE de tomillo, un estudio en 2020, destaco su actividad antifúngica sobre *F. oxysporum* Schltdl, debido a la elevada concentración que presenta este en compuestos monoterpenos oxigenados como el timol e hidrocarburos monoterpenos como el ρ -cimeno, dada la capacidad de estos para actuar sobre la membrana celular e inhibir los procesos respiratorios celulares, junto con la inhibición de síntesis de enzimas intracelulares y extracelulares (Moghaddam & Mehdizadeh, 2020). El AE de orégano, en un estudio presentado en 2021, destaco su actividad fungistática, dada la composición en monoterpenos principalmente el carvacrol en este aceite, el cual actúa sobre el ergosterol, lo que conlleva a la alteración de la membrana celular, y a su vez interrumpiendo la homeostasis y supervivencia celular (Gonçalves et al., 2021).

Respecto a la especie *Boesenbergia pulcherrima* Wall, en un estudio en 2020, su efecto sobre el *F. oxysporum* Schltdl, no solo se estudió con el AE completo, sino que además; se revisó cada componente de este AE como lo son el metil eugenol, metil isoeugenol, elemicina, 1,2,4-trimetoxi-5-vinilbenceno y compuestos α -asarona, por separado sobre el hongo para identificar de manera adecuada cual era el que presentaba mejor acción; en este caso fueron la α -asarona y la elemicina, los que destacaron al actuar sobre la membrana celular (Park et al., 2020). Actualmente, se han mostrado investigaciones sobre este hongo usando AE de *Salmea scandens* L., el cual mostro, una inhibición mayor sobre el hongo al ser extraído por el método de maceración-acetona, su alto desempeño se asoció a la presencia de altos niveles de compuestos como germacreno D, elemol (Marina et al., 2021).

Aceites esenciales con efecto sobre *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al.



En el caso de esta bacteria, los estudios realizados con aceites esenciales de orégano son mayores, principalmente porque esta bacteria posee la capacidad de generar biofilm y activar señalización a través de Quorum sensing (QS), y el carvacrol (uno de los principales componentes del aceite esencial del orégano) ha demostrado una alta acción inhibitoria sobre la formación de biopelículas. En uno de los experimentos se logró destacar que a una concentración de 0,66 mM se lograba disminuir la carga superficial bacteriana y de esta forma su potencial de adhesión, motilidad y la síntesis de polisacáridos (Gutierrez-Pacheco et al., 2018).

En otro estudio, este compuesto demostró a su vez que adicional a las características ya descritas sobre la bacteria, este modificaba el nivel de virulencia de la cepa bacteriana, además de influir en la expresión génica que están relacionados directamente con la formación del QS (Joshi et al., 2016). Así mismo, se destaca el estudio realizado en 2021 con el AE de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., y su capacidad de actuar sobre la formación de biofilm y a su vez bloquear los cambios metabólicos que se presentan en las células que lo conforman (Nazzaro et al., 2021), exhibiendo un porcentaje de inhibición sobre el *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al. de 63.06%.

Si bien se conoce el poder del carvacrol sobre la formación de biopelículas, no se ha estudiado la actividad del aceite de orégano proveniente de plantas como *Lippia origanoides* Kunth propias del país, por lo que se recomendaría el estudio de estos y su composición química como posibles controladores biológicos en el país; de igual forma, el abarcar y aumentar el campo de revisión de varios aceites sobre este potencial fitopatógeno.

Sobre esta bacteria, los estudios han estado centrados principalmente en el uso de aceites del árbol de té, eucalipto, ciprés de Monterrey, como se puede observar en la **tabla 2**, en la que se presentan los anteriores estudios detallándose algunas características como en la tabla 1.

Tabla 2.

Aceites esenciales usados sobre P. carotovorum (Jones) Waldee et al.

ACEITES ESENCIALES USADOS PARA CONTROL DE <i>PECTOBACTERIUM CAROTOVORUM</i>						
Aceite Esencial		Método	CMI ^a	Acción	% Inhibición ^b	Referencia
Nombre Científico	Nombre Común					
<i>Leptospermum petersonii</i> F.M.Bailey	Árbol de te	Placa	5.0 µg/mL	Actividad Antibacteriana	-----	(Caputo et al., 2020)

<i>Eucalyptus gunnii</i> H.	Eucalipto		2.0 µg/mL			
<i>Corymbia citriodora</i> H.	Eucalipto limón	Microdilución	0.16 ± 0.01d	Actividad antibacteriana	-----	(Salem et al., 2018)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> D.	Eucalipto rojo	Difusión en disco (Halo de inhibición) y Microtitulación (CMI)	4.000 µg/mL	Inhibición crecimiento (Halo de inhibición: 20.00 ± 1.00 mm)	Actividad bacteriostática	(EL-Hefny et al., 2017)
<i>Callistemon viminalis</i> (Sol. ex Gaertn.) G. Don (Extraído con n-butanol)	Calistemón llorón			Inhibición crecimiento (Halo de inhibición: 18.33 ± 0.58 mm)		

Fuente: elaboración propia

Nota: CMI: (Concentración mínima inhibitoria)^a, % Inhibición^b: Porcentaje de inhibición

El AE del árbol de té y eucalipto, en la investigación realizada en 2020 por Caputo y colaboradores, resalta la presencia de 1,8-cineol e hidrato-acetato de trans-sabineno en el AE de eucalipto, al presentar una acción sobre la membrana e inhibir la formación y síntesis de biopelículas (Caputo et al., 2020). En cuanto al AE de eucalipto de limón, su actividad antibacteriana corresponde inicialmente a los compuestos citronella y el citronelol, dos monoterpenos con capacidad de actuar sobre la membrana (Salem et al., 2018). Respecto al eucalipto rojo y el calistemón llorón, frente a esta bacteria, se destacó las concentraciones que presenta el primero en éster metílico del ácido 8-noninoico, alcanfor, mentol, 1,8-cineol (eucaliptol) y acetato de isobornilo; los cuales presentan actividad sobre la membrana celular al desestabilizarla; y concentraciones de ácido palmítico, ácido 2-hidroximirístico, 5-hidroximetilfurfural, ácido shikímico, 4-O- α -D-galactopiranosil- α -D-glucopiranososa en cuanto al segundo AE, que al igual que los compuestos descritos su acción potencial es sobre la membrana celular (E-Hefny et al., 2017).

Si bien se han realizado estudios sobre *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al., poco se ha logrado mostrar sensibilidad de esta bacteria a algunos AE, su alto potencial patógeno, junto con su capacidad de formación de biofilm, hacen de esta una bacteria con alta capacidad de resistencia a AE como a los de *Ferulago angulata* (Schltdl.) Boiss, *Callistemon viminalis* (Sol. ex Gaertn.) G.



Don (calistemon llorón) extraído con acetona, los cuales no logran inhibir ni controlar el crecimiento de este fitopatógeno (EL-Hefny et al., 2017; Moghaddam et al., 2018). En cuanto a los aceites de extractos de madera y corteza de *Picea abies* (L.) Karsten y *Larix decidua* Miller, la actividad sobre esta bacteria es moderada (EL-Hefny et al., 2017).

Sin embargo, en un estudio reciente, con AE de *Myrtus communis* L. y *Ferula gummosa* Boiss, se observó una alta capacidad de inhibición usando discos impregnados con 10 mg del aceite (Hajian-Maleki et al., 2021), en donde estos dos registraron halos de inhibición fuertes mayores a ≥ 20 mm, sobre dos cepas de *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al.

Cabe destacar que en la mayoría de los estudios sobre las propiedades antifúngicas y antibacterianas de los aceites de la menta y el orégano suelen realizarse con el extracto puro o una emulsión a gran escala, lo que modifica las concentraciones de algunos de sus componentes con mayor actividad conocida. Es por esto que se ha buscado la manera de mejorar las propiedades de los aceites, usando menos proporción de estos a través de nanoemulsiones. Se ha reportado que la estabilidad de la emulsión mejora al usar partículas más pequeñas, lo que mejora la penetración del mismo a través de la membrana celular, desestabilizando la membrana y la osmolaridad celular, e incluso, se reportó una actividad sobre la inhibición de la producción de esporas. Sin embargo, estos estudios se han llevado a cabo con aceites de tomillo y albahaca (Deryabin et al., 2019), aunque/no obstante en otro estudio realizado sobre *Fusarium graminearum* Corda, las nanoemulsiones de aceite esencial de clavo fueron las que demostraron no solo la capacidad de inhibir el crecimiento del patógeno, sino de evitar la aparición de micotoxinas (Hassanin et al., 2017).

Conclusiones

Es de este modo, como se evidencia a través de la revisión de este artículo que los aceites esenciales presentan un buen control microbiano y fúngico a nivel de laboratorio como se muestra en las tablas en donde es posible comparar a nivel in vitro en pruebas en placa (en su mayoría). Sin embargo, aún hace falta llevar y evidenciar este potencial y sus concentraciones adecuadas a nivel de campo, no dejando de destacar que aun con lo anterior, los AE presentan un mecanismo de acción bastante elevado y eficaz sobre este caso, los dos microorganismos estudiados.

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre la actividad biológica de ciertos aceites esenciales se han enfocado en patógenos bacterianos productores de afecciones y enfermedades

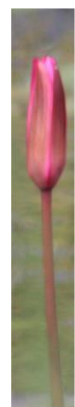
en cultivos. Respecto al *P. carotovorum* (Jones) Waldee et al., aunque se han destacado reportes en el país sobre su afección especialmente sobre cultivos de cebolla y papa, las investigaciones acerca del efecto de aceites esenciales no han sido revisadas tan a fondo.

Literatura Citada

- Aamir, M., & Jittanit, W. (2017). Ohmic heating treatment for Gac aril oil extraction: Effects on extraction efficiency, physical properties and some bioactive compounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.03.013>
- Abdel-Hameed, E. S. S., Al-Thbity, S. M., & Gobouri, A. A. (2020). Chemical composition, antimicrobial and anticancer activities of essential oils extracted from Nankah seeds using conventional, microwave assisted hydrodistillation and solvent extraction methods. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 12(sp1), 846–856. <https://doi.org/10.31838/ijpr/2020.SP1.133>
- Acero-Godoy, J., Guzmán-Hernández, T., & Muñoz-Ruíz, C. (2019). Revisión documental de uso de los aceites esenciales obtenidos de *Lippia alba* (Verbenaceae), como alternativa antibacteriana y antifúngica. *Revista Tecnología En Marcha*, 32(1), 3–11. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i1.4114>
- Aguilar-Veloz, L., Calderón-Santoyo, M., Vázquez González, Y., & Ragazzo-Sánchez, J. (2020). Application of essential oils and polyphenols as natural antimicrobial agents in postharvest treatments: Advances and challenges. *Food Science & Nutrition*, 8(6), 2555–2568. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1437>
- Al Mamoori, F., & Al Janabi, R. (2018). RECENT ADVANCES IN MICROWAVE-ASSISTED EXTRACTION (MAE) OF MEDICINAL PLANTS: A REVIEW. *International Research Journal Of Pharmacy*, 9(6), 22–29. <https://doi.org/10.7897/2230-8407.09684>
- Allenspach, M., Valder, C., & Steuer, C. (2020). Absolute quantification of terpenes in conifer-derived essential oils and their antibacterial activity. *Journal of Analytical Science and Technology*, 11(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40543-020-00212-y>
- Amaral, D., Pinto, N., Souza, V., Aragao, F., & Santos, M. (2017). Control of *Fusarium oxysporum* infection in transgenic tobacco carrying oxalate decarboxylase gene. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 5(1), 079–083. <https://doi.org/10.7324/JABB.2017.50114>
- Azaiez, S., Ben Slimene, I., Karkouch, I., Essid, R., Jallouli, S., Djebali, N., Elkahoui, S., Limam,

- F., & Tabbene, O. (2018). Biological control of the soft rot bacterium *Pectobacterium carotovorum* by *Bacillus amyloliquefaciens* strain Ar10 producing glycolipid-like compounds. *Microbiological Research*, 217, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.08.013>
- Aziz, Z., Ahmad, A., Setapar, S. H., Karakucuk, A., Azim, M., Lokhat, D., Rafatullah, M., Ganash, M., Kamal, M., & Ashraf, G. (2018). Essential Oils: Extraction Techniques, Pharmaceutical And Therapeutic Potential - A Review. *Current Drug Metabolism*, 19(13), 1100–1110. <https://doi.org/10.2174/1389200219666180723144850>
- Bendif, H., Lazali, M., Souilah, N., Miara, M., Kazernavičiūtė, R., Baranauskienė, R., Venskutonis, P., & Maggi, F. (2018). Supercritical CO₂ extracts and essential oils from *Teucrium polium* L. growing in Algeria: chemical composition and antioxidant activity. *Journal of Essential Oil Research*, 30(6), 488–497. <https://doi.org/10.1080/10412905.2018.1493406>
- Cáceres, M., Hidalgo, W., Stashenko, E., Torres, R., & Ortiz, C. (2020). Essential Oils of Aromatic Plants with Antibacterial, Anti-Biofilm and Anti-Quorum Sensing Activities against Pathogenic Bacteria. *Antibiotics*, 9(4), 147. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9040147>
- Caputo, L., Smeriglio, A., Trombetta, D., Cornara, L., Trevena, G., Valussi, M., Fratianni, F., De Feo, V., & Nazzaro, F. (2020). Chemical Composition and Biological Activities of the Essential Oils of *Leptospermum petersonii* and *Eucalyptus gunnii*. *Frontiers in Microbiology*, 11, 409. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00409>
- Che Radzi, N., & Kasim, F. A. (2020). Effect of Microwave Pretreatment on Gaharu Essential Oil Using Hydrodistillation Method. *Indonesian Journal of Chemistry*, 20(4), 960. <https://doi.org/10.22146/ijc.43191>
- Chouhan, S., Sharma, K., & Guleria, S. (2017). Antimicrobial Activity of Some Essential Oils— Present Status and Future Perspectives. *Medicines*, 4(3), 58. <https://doi.org/10.3390/medicines4030058>
- Corzo-López, M., & Quiñones-Pantoja, M. L. (2017). Identificación bioquímica, fisiológica y patogénica de aislados bacterianos asociados a la pudrición blanda y pierna negra en papa. *Revista de Protección Vegetal*, 32(3). <http://revistas.censa.edu.cu/index.php/RPV/article/view/928/982>
- Cubero Agüero, D. (2019). *Diversidad de bacterias fitopatógenas, agentes causales de pudrición*

- blanda en hortalizas de las zonas de Cartago y Alajuela, Costa Rica* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/11141/1/44697.pdf>
- Database, E. G. (2021). *Fusarium (1FUSAG)[Overview]* EPPO Global Database. <https://gd.eppo.int/taxon/1FUSAG>
- de Lamo, F. J., & Takken, F. L. W. (2020). Biocontrol by *Fusarium oxysporum* Using Endophyte-Mediated Resistance. *Frontiers in Plant Science*, 11(37). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00037>
- Deryabin, D., Galadzhieva, A., Kosyan, D., & Duskaev, G. (2019). Plant-Derived Inhibitors of AHL-Mediated Quorum Sensing in Bacteria: Modes of Action. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), 5588. <https://doi.org/10.3390/ijms20225588>
- Desam, N. R., Al-Rajab, A. J., Sharma, M., Mylabathula, M. M., Gowkanapalli, R. R., & Albratty, M. (2019). Chemical constituents, in vitro antibacterial and antifungal activity of *Mentha×Piperita* L. (peppermint) essential oils. *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.07.013>
- Edel-Hermann, V., & Lecomte, C. (2019). Current Status of *Fusarium oxysporum* Formae Speciales and Races. *Phytopathology*®, 109(4), 512–530. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0320-RVW>
- EL-Hefny, M., Ashmawy, N. A., Salem, M. Z. M., & Salem, A. Z. M. (2017). Antibacterial activities of the phytochemicals-characterized extracts of *Callistemon viminalis*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Conyza dioscoridis* against the growth of some phytopathogenic bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 113, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.11.004>
- Elyemni, M., Louaste, B., Nechad, I., Elkamli, T., Bouia, A., Taleb, M., Chaouch, M., & Eloutassi, N. (2019). Extraction of Essential Oils of *Rosmarinus officinalis* L. by Two Different Methods: Hydrodistillation and Microwave Assisted Hydrodistillation. *TheScientificWorldJournal*, 2019, 3659432. <https://doi.org/10.1155/2019/3659432>
- Gao, X., Lv, S., Wu, Y., Li, J., Zhang, W., Meng, W., Wang, C., & Meng, Q. (2017). Volatile components of essential oils extracted from Pu-erh ripe tea by different extraction methods. *International Journal of Food Properties*, 20(sup1), S240–S253. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295256>
- Gavahian, M., & Farahnaky, A. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 72, 153–161.



<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.014>

- Gavahian, M., Farhoosh, R., Javidnia, K., Shahidi, F., Golmakani, M.-T., & Farahnaky, A. (2017). Effects of Electrolyte Concentration and Ultrasound Pretreatment on Ohmic-Assisted Hydrodistillation of Essential Oils from *Mentha piperita* L. *International Journal of Food Engineering*, 13(10). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0010>
- Gavahian, M., Sastry, S., Farhoosh, R., & Farahnaky, A. (2020). Ohmic heating as a promising technique for extraction of herbal essential oils: Understanding mechanisms, recent findings, and associated challenges. *Advances in Food and Nutrition Research*, 91, 227–273. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.09.001>
- Gerayeli, N., Baghaee-Ravari, S., & Tarighi, S. (2018). Evaluation of the antagonistic potential of Bacillus strains against *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and their role in the induction of resistance to potato soft rot infection. *European Journal of Plant Pathology*, 150(4), 1049–1063. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1344-0>
- Gonçalves, D. C., Tebaldi de Queiroz, V., Costa, A. V., Lima, W. P., Belan, L. L., Moraes, W. B., Pontes Póvoa Iorio, N. L., & Corrêa Póvoa, H. C. (2021). Reduction of Fusarium wilt symptoms in tomato seedlings following seed treatment with *Origanum vulgare* L. essential oil and carvacrol. *Crop Protection*, 141, 105487. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105487>
- González-Fernández, M. J., Manzano-Agugliaro, F., Zapata-Sierra, A., Belarbi, E. H., & Guerrero, J. L. (2020). Green argan oil extraction from roasted and unroasted seeds by using various polarity solvents allowed by the EU legislation. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123081. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123081>
- Gordon, T. R. (2017). *Fusarium oxysporum* and the Fusarium Wilt Syndrome. *Annual Review of Phytopathology*, 55(1), 23–39. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-095919>
- Goudjil, M. B., Ladjel, S., Zighmi, S., Hammoya, F., Bensaci, M. B., Mehani, M., & Bencheikh, S. (2016). Bioactivity of *Laurus Nobilis* and *Mentha Piperita* essential oils on some phytopathogenic fungi (in vitro assay). *J. Mater. Environ. Sci*, 7(12), 4525–4533.
- Gutierrez-Pacheco, M. M., Gonzalez-Aguilar, G. A., Martinez-Tellez, M. A., Lizardi-Mendoza, J., Madera-Santana, T. J., Bernal-Mercado, A. T., Vazquez-Armenta, F. J., & Ayala-Zavala, J. F. (2018). Carvacrol inhibits biofilm formation and production of extracellular polymeric substances of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*. *Food Control*, 89, 210–218.

<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.02.007>

Haffizi, M., Sulaiman, S., Noraini Jimat, D., & Amid, A. (2020). Review: A Comparison of Conditions for The Extraction of Vegetable and Essential Oils Via Microwave-Assisted Extraction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 778(1), 012172.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012172>

Hajian-Maleki, H., Baghaee-Ravari, S., & Moghaddam, M. (2021). Herbal essential oils exert a preservative effect against the potato soft rot disease. *Scientia Horticulturae*, 285, 110192.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110192>

Hakimi, M. I., Ilham, Z., & Abdul Kohar, R. A. (2019). Enhancement of Agro-Industrial Copra Residue Oil Yield Using Microwave-Assisted Extraction. *Waste and Biomass Valorization*, 10(9), 2681–2688. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0274-1>

Haloui, I., & Meniai, A.-H. (2017). Supercritical CO₂ extraction of essential oil from Algerian Argan (*Argania spinosa* L.) seeds and yield optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(17), 12912–12919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.012>

Hashemi, S. M. B., Nikmaram, N., Esteghlal, S., Mousavi Khaneghah, A., Niakousari, M., Barba, F. J., Roohinejad, S., & Koubaa, M. (2017). Efficiency of Ohmic assisted hydrodistillation for the extraction of essential oil from oregano (*Origanum vulgare* subsp. *viride*) spices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.03.003>

Hassanin, M., Abd-El-Sayed, M., & Abdallah, M. (2017). Antifungal activity of some essential oil emulsions and nanoemulsions against *Fusarium oxysporum* pathogen affecting cumin and geranium plants. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*, 4(3), 245–258. <https://doi.org/10.21608/sjfop.2017.11326>

Hu, B., Li, Y., Song, J., Li, H., Zhou, Q., Li, C., Zhang, Z., Liu, Y., Liu, A., Zhang, Q., Liu, S., & Luo, Q. (2020). Oil extraction from tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) using the combination of microwave-ultrasonic assisted aqueous enzymatic method - design, optimization and quality evaluation. *Journal of Chromatography. A*, 1627, 461380. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461380>

Huang, X.-Q., Lu, X.-H., Sun, M.-H., Guo, R.-J., van Diepeningen, A. D., & Li, S.-D. (2019). Transcriptome analysis of virulence-differentiated *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* isolates during cucumber colonisation reveals pathogenicity profiles. *BMC Genomics*, 20(1),



570. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5949-x>

- Ibrahim, N. A., & Zaini, M. A. A. (2018). Microwave-assisted solvent extraction of castor oil from castor seeds. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(12), 2516–2522. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.07.009>
- Joshi, J. R., Khazanov, N., Senderowitz, H., Burdman, S., Lipsky, A., & Yedidia, I. (2016). Plant phenolic volatiles inhibit quorum sensing in pectobacteria and reduce their virulence by potential binding to ExpI and ExpR proteins. *Scientific Reports*, 6(1), 38126. <https://doi.org/10.1038/srep38126>
- Kaur, N., & Singh, A. K. (2016). Ohmic Heating: Concept and Applications-A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14), 2338–2351. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.835303>
- Koubaa, M., Mhemdi, H., Barba, F. J., Roohinejad, S., Greiner, R., & Vorobiev, E. (2016). Oilseed treatment by ultrasounds and microwaves to improve oil yield and quality: An overview. *Food Research International*, 85, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.007>
- Kusuma, H. S., & Mahfud, M. (2017). The extraction of essential oils from patchouli leaves (*Pogostemon cablin* Benth) using a microwave air-hydrodistillation method as a new green technique. *RSC Advances*, 7(3), 1336–1347. <https://doi.org/10.1039/C6RA25894H>
- Liu, Z., Deng, B., Li, S., & Zou, Z. (2018). Optimization of solvent-free microwave assisted extraction of essential oil from *Cinnamomum camphora* leaves. *Industrial Crops and Products*, 124, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.016>
- López-Díaz, C., Rahjoo, V., Sulyok, M., Ghionna, V., Martín-Vicente, A., Capilla, J., Di Pietro, A., & López-Berges, M. S. (2018). Fusaric acid contributes to virulence of *Fusarium oxysporum* on plant and mammalian hosts. *Molecular Plant Pathology*, 19(2), 440–453. <https://doi.org/10.1111/mpp.12536>
- Marina, M. A. S., Eleria, G. del C. H., García, V. H., Velasco, C. R., Cisneros, M. F. R., Larramendi, L. A. R., García, C. O., & Medinilla, E. E. (2021). *Salmea scandens* (Asteraceae) extracts inhibit the growth of *Fusarium oxysporum* and *Alternaria solani* pathogens of tomato. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*. <http://revistas.uncuyo.edu.ar/ojs3/index.php/RFCFA/article/view/3259>
- Moghaddam, M., & Mehdizadeh, L. (2016). Essential Oil and Antifungal Therapy. In *Recent Trends in Antifungal Agents and Antifungal Therapy* (pp. 29–74). Springer India.

https://doi.org/10.1007/978-81-322-2782-3_2

- Moghaddam, M., & Mehdizadeh, L. (2020). Chemical Composition and Antifungal Activity of Essential Oil of *Thymus vulgaris* Grown in Iran against Some Plant Pathogenic Fungi. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 23(5), 1072–1083. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2020.1843547>
- Moghaddam, M., Mehdizadeh, L., Mirzaei Najafgholi, H., & Ghasemi Pirbalouti, A. (2018). Chemical composition, antibacterial and antifungal activities of seed essential oil of *Ferulago angulata*. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 158–170. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1437626>
- Mohseni, S., & Rad, A. S. (2018). Determination of Compositions of *Thymus Pubescens*; the Comparison of Different Solvents towards Extraction. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 42(4), 1923–1928. <https://doi.org/10.1007/s40995-017-0159-3>
- Muñoz Castellanos, L., Amaya Olivas, N., Ayala-Soto, J., De La O Contreras, C. M., Zermeño Ortega, M., Sandoval-Salas, F., & Hernández-Ochoa, L. (2020). In Vitro and In Vivo Antifungal Activity of Clove (*Eugenia caryophyllata*) and Pepper (*Piper nigrum* L.) Essential Oils and Functional Extracts Against *Fusarium oxysporum* and *Aspergillus niger* in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *International Journal of Microbiology*, 2020, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2020/1702037>
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., & Feo, V. De. (2017). Essential Oils and Antifungal Activity. *Pharmaceuticals*, 10(4), 86. <https://doi.org/10.3390/ph10040086>
- Nazzaro, F., Fratianni, F., D’Acierno, A., Caputo, L., Feo, V. De, & Coppola, R. (2021). Antibiofilm Properties Exhibited by the Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica*) Seed Oil. *Proceedings*, 66(1), 29. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020066029>
- Niemi, O., Laine, P., Koskinen, P., Pasanen, M., Pennanen, V., Harjunpää, H., Nykyri, J., Holm, L., Paulin, L., Auvinen, P., Palva, E. T., & Pirhonen, M. (2017). Genome sequence of the model plant pathogen *Pectobacterium carotovorum* SCC1. *Standards in Genomic Sciences*, 12(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s40793-017-0301-z>
- Oktavianawati, I. (2020). Essential Oil Extraction of *Cananga odorata* Flowers using Hydrodistillation and Steam-Water Distillation Processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 833(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/833/1/012032>



- Padilla Galvez, N. P. (2017). *Capacidad antagónica contra Pectobacterium carotovorum, Pectobacterium atrosepticum, y colonización de sistema radicular de Solanum tuberosum cv. Pukará-INIA, de actinobacterias endófitas de Solanum tuberosum subsp. tuberosum nativa chilena.* [Universidad de Concepción]. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/2865/4/Tesis_Capacidad_Antagonica_contra_Pectobacterium.pdf
- Palyzová, A., Svobodová, K., Sokolová, L., Novák, J., & Novotný, Č. (2019). Metabolic profiling of *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans* race 2 in dual cultures with biocontrol agents *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Trichoderma harzianum*. *Folia Microbiologica*, 64(6), 779–787. <https://doi.org/10.1007/s12223-019-00690-7>
- Park, C., Kim, H., Lee, D. W., Kim, J., & Choi, Y. (2020). Identification of antifungal constituents of essential oils extracted from *Boesenbergia pulcherrima* against *Fusarium wilt* (*Fusarium oxysporum*). *Applied Biological Chemistry*, 63(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00518-w>
- Pavlić, B., Teslić, N., Zengin, G., Đurović, S., Rakić, D., Cvetanović, A., Gunes, A. K., & Zeković, Z. (2020). Antioxidant and enzyme-inhibitory activity of peppermint extracts and essential oils obtained by conventional and emerging extraction techniques. *Food Chemistry*, 338, 127724. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127724>
- Plavsic, D., Skrinjar, M., Psodorov, D., Pezo, L., Milovanovic, I., Psodorov, D., Kojic, P., & Kocic-Tanackov, S. (2020). Chemical structure and antifungal activity of mint essential oil components. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 85(9), 1149–1161. <https://doi.org/10.2298/JSC191210017P>
- Quintanilla, A. J. R. (2020). *Identificación y control del agente causal de la pudrición húmeda en alcachofa (Cynara scolymus L.) en chincha baja* [Universida Nacional Agracia La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4350/requis-quintanilla-angela-juana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 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(3), 365. <https://doi.org/10.3390/foods9030365>
- Retana, K., Ramírez-Coché, J. A., Castro, O., & Blanco-Meneses, M. (2018). Caracterización morfológica y molecular de *Fusarium oxysporum* F. SP. *Apii* asociado a la marchitez del apio

en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 115–126.
<https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32199>

- Roohinejad, S., Koubaa, M., Barba, F. J., Leong, S. Y., Khelfa, A., Greiner, R., & Chemat, F. (2017). Extraction Methods of Essential Oils From Herbs and Spices. In *Essential Oils in Food Processing* (pp. 21–55). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119149392.ch2>
- Salem, M. Z. M., Elansary, H. O., Ali, H. M., El-Settawy, A. A., Elshikh, M. S., Abdel-Salam, E. M., & Skalicka-Woźniak, K. (2018). Bioactivity of essential oils extracted from *Cupressus macrocarpa* branchlets and *Corymbia citriodora* leaves grown in Egypt. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 18(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s12906-018-2085-0>
- Sarah, M., & Estherina, D. (2020). Essential oil extraction from citronella grass by microwave-assisted hydro-distillation technique: a preliminary study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 801(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/801/1/012046>
- Seidi Damyeh, M., & Niakousari, M. (2017). Ohmic hydrodistillation, an accelerated energy-saver green process in the extraction of *Pulicaria undulata* essential oil. *Industrial Crops and Products*, 98, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.029>
- Seidi Damyeh, M., Niakousari, M., Golmakani, M. T., & Saharkhiz, M. J. (2016). Microwave and Ohmic Heating Impact on the In situ Hydrodistillation and Selective Extraction of *Satureja macrosiphonia* Essential Oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(4), 647–656. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12644>
- Sharma, A., Rajendran, S., Srivastava, A., Sharma, S., & Kundu, B. (2017). Antifungal activities of selected essential oils against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* 1322, with emphasis on *Syzygium aromaticum* essential oil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 123(3), 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2016.09.011>
- Stratakos, A. C., & Koidis, A. (2016). Methods for Extracting Essential Oils. In *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety* (pp. 31–38). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00004-3>
- Yamamoto, Y., Nawate, T., & Mitsudo, S. (2019). Extraction of essential oils from leaves of the Japanese *Lindera umbellata* Thunb. by using microwave heating distillation method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 550(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/550/1/012033>
- Yao, Z., Chen, Q., Chen, D., Zhan, L., Zeng, K., Gu, A., Zhou, J., Zhang, Y., Zhu, Y., Gao, W.,

Wang, L., Zhang, Y., & Qu, Y. (2019). The susceptibility of sea-island cotton recombinant inbred lines to *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* infection is characterized by altered expression of long noncoding RNAs. *Scientific Reports*, 9(1), 2894. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39051-2>

Zeković, Z., Pintać, D., Majkić, T., Vidović, S., Mimica-Dukić, N., Teslić, N., Versari, A., & Pavlić, B. (2017). Utilization of sage by-products as raw material for antioxidants recovery—Ultrasound versus microwave-assisted extraction. *Industrial Crops and Products*, 99, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.028>

Zermane, A., Larkeche, O., Meniai, A.-H., Crampon, C., & Badens, E. (2016). Optimization of Algerian rosemary essential oil extraction yield by supercritical CO₂ using response surface methodology. *Comptes Rendus Chimie*, 19(4), 538–543. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.08.011>

Zhong, J., Wang, Y., Yang, R., Liu, X., Yang, Q., & Qin, X. (2018). The application of ultrasound and microwave to increase oil extraction from *Moringa oleifera* seeds. *Industrial Crops and Products*, 120, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.028>

