








Enfermedades causadas por hongos fitopatógenos en el fruto de *Persea americana* durante la poscosecha

Wendy Abril Coyotl-Pérez¹ , Maricruz Rangel-Galván² , Yesenia Ithaí Angeles-López² , César Agustín Ramírez-Díaz³ , Nemesio Villa-Ruano^{4*} 

¹Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional (IPN) Tlaxcala, México. ²Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. ³Centro de Agroecología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. ⁴CONAHCYT- Centro Universitario de Vinculación y Transferencia de Tecnología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Autor para correspondencia: *nemesio.villa@secihti.mx

DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.15742154>

Editado por: D.C. Yolanda Elizabeth Morales-García (Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita universidad Autónoma de Puebla).

Revisado por:

D.C. América Paulina Rivera-Urbalejo (Facultad de Estomatología, Benemérita universidad Autónoma de Puebla).

D.C. Jesús Muñoz-Rojas (Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).

Resumen

El aguacate Hass (*Persea americana*) es un producto agrícola de alta demanda global, cuya calidad poscosecha se ve amenazada por enfermedades causadas por hongos. Estos patógenos son responsables de pérdidas significativas en la comercialización del fruto. La incidencia de hongos en aguacates durante la poscosecha está influenciada por factores físicos como el daño mecánico durante la manipulación y las temperaturas inadecuadas. Estos factores crean condiciones favorables para su proliferación. Entre los principales hongos que

afectan al fruto de aguacate Hass destacan *Colletotrichum gloeosporioides*, *Fusarium verticillioides* y *Sphaceloma perseae*, asociados a antracnosis, podredumbre y roña, disminuyendo la vida útil del fruto. Ante esta relación parasítica, el aguacate desarrolló mecanismos moleculares de defensa, como la producción de compuestos antifúngicos y el fortalecimiento de sus estructuras celulares. Sin embargo, estas respuestas suelen ser insuficientes para evitar las pérdidas. El manejo de estas enfermedades requiere un enfoque integrativo que combine métodos biológicos, físicos y químicos. Entre los métodos biológicos destacan los aceites esenciales, que poseen propiedades antifúngicas naturales. Los métodos físicos incluyen el control de temperatura, la aplicación de luz UV-C y el uso de películas biodegradables, que actúan como barreras protectoras. Por su parte, los métodos químicos, como el uso de vapor y etileno en concentraciones controladas han mostrado eficacia en la reducción de infecciones fúngicas sin comprometer la seguridad del consumidor. La integración de estos métodos permite minimizar las pérdidas poscosecha, mantener la calidad del fruto y reducir el impacto ambiental ligado al uso intensivo de fungicidas convencionales. El desarrollo de estrategias sostenibles es esencial para garantizar la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción de aguacate Hass frente a los retos impuestos por las enfermedades fúngicas en poscosecha.

Palabras clave: Fruto; fitopatógenos; enfermedades; infección poscosecha.

Abstract

Hass avocado (*Persea americana*) is a highly demanded agricultural product but, fungal diseases are a latent threaten in post-harvest period. Phytopathogens of avocado causes significant losses during fruit commercialization. Fungal incidence in post-harvest avocado is influenced by physical factors such as mechanical damage during handling, light intensity, and inadequate temperatures. These factors induce favorable conditions for fungal proliferation. *Colletotrichum gloeosporioides*, *Fusarium verticillioides*, and *Sphaceloma perseae* are the main fungi affecting Hass avocado fruit, which are linked to anthracnose, rot, and scab reducing fruit's shelf life. Avocados have molecular defense mechanisms such as the production of antifungal compounds and strengthening of cellular structures to deal with phytopathogenic interactions. However, these responses are often insufficient to prevent losses. Managing these diseases requires an integrative approach by

the combination of biological, physical, and chemical methods. Biological methods include essential oils, which show natural and strong antifungal properties. Physical methods include temperature control, UV-C light application, and biodegradable films as protective barriers. Chemical methods, such as steam and ethylene application under controlled conditions, have effectively reduced fungal infections without affecting consumer's safety. The integration of these methods would minimize post-harvest losses, maintain fruit quality, and reduce the environmental impact associated with the intensive use of conventional fungicides. The development of sustainable strategies is essential to assure profitability and sustainability of Hass avocado against post-harvest fungal diseases.

Keywords: Fruit; phytopathogens; fungal disease; postharvest infection.

Introducción

El aguacate (*Persea americana*) es un fruto de gran relevancia económica, nutricional y cultural a nivel mundial. Este fruto tiene una gran demanda en la industria alimentaria debido a su alto contenido de nutrientes como grasas saludables, vitaminas y minerales. También es aprovechado por sus propiedades nutraceuticas y sus aplicaciones en la industria cosmética [1]. Así mismo, es considerado como el "oro verde" ya que es una fuente de ingresos para productores locales de México, América central y Sudamérica [2, 3]. México es el principal exportador de aguacate en todo el mundo [4]. Sin embargo, el rendimiento del aguacate está sujeto a pérdidas por la presencia de enfermedades. Estas enfermedades no solo afectan la calidad del fruto, sino que también impactan directamente en su vida útil, reduciendo el valor comercial y causando pérdidas significativas en la cadena de suministro. Se estima que durante el periodo de poscosecha la calidad del aguacate se reduce hasta un 70 % del total de la producción [5-7]. Esto se debe principalmente a las enfermedades causadas por hongos patógenos de los géneros *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Rhizopus*, *Pestalotia*, *Dothiorella*, *Sphaceloma*, entre otros de menor incidencia [4, 8-10]. Comprender la incidencia y los mecanismos de infección de estos hongos patógenos es crucial para desarrollar estrategias de manejo efectivo, que ayuden a reducir las pérdidas y mantengan la competitividad del producto en los mercados nacionales e internacionales. En este capítulo se analizan las enfermedades fúngicas postcosecha en *Persea americana*, enfocándose en su prevalencia, predisposición y posibles enfoques de control,

con el fin de aportar conocimientos útiles para mejorar la calidad y durabilidad de los frutos de aguacate Hass en su etapa poscosecha.

Contexto agrícola

El aguacatero, aguacatal o palta (*Persea* spp.), pertenece a la familia Lauraceae. Se trata de árboles perennes que producen frutos todo el año y originarios de Mesoamérica. México es considerado el principal centro de origen y diversificación de estas especies además de Guatemala y El Salvador [11]. Estos árboles producen un fruto tipo drupa conocido en México como aguacate. El aguacate tiene muchas propiedades nutritivas y nutracéuticas sobre las bases de su contenido de proteínas, grasas, vitaminas, minerales y propiedades antioxidantes (Figura 1) [12].

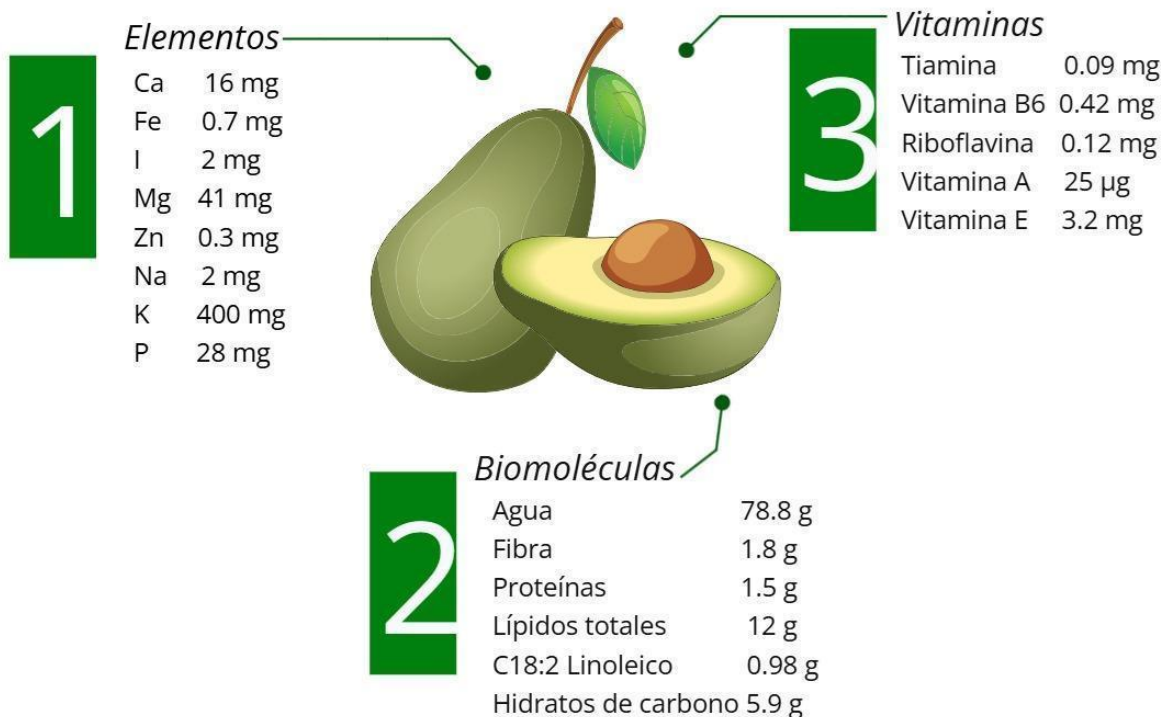


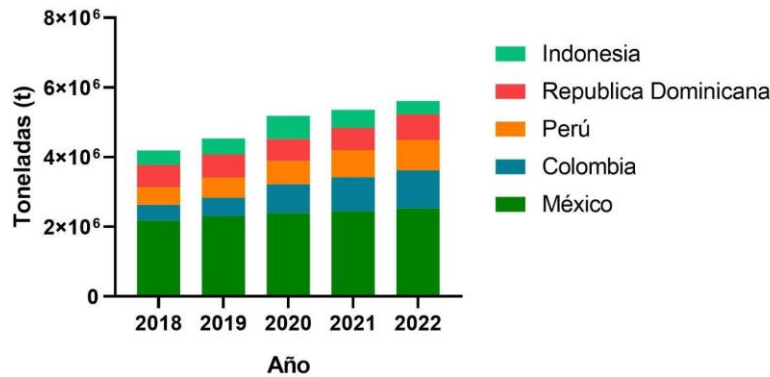
Figura 1. Información nutricional del aguacate Hass por cada 100 g de pulpa.

Entre las diversas especies conocidas, el aguacate de *P. americana* cv. Hass, tiene una alta demanda y se comercializa principalmente en México y alrededor del mundo [11]. Entre 2018 y 2022, México se posicionó como el principal productor de aguacate Hass en el mundo, seguido de Colombia, Perú, República Dominicana e Indonesia (Figura 2A). En éstos cinco años, la producción de aguacate en México se ubicó entre 2,184,663.07 y 2,529,581.41 toneladas (t) [13]. La producción de aguacate en el 2023 se incrementó un 14.92 % respecto al 2022 y alcanzó las 2,973,344.42 t, con un rendimiento promedio de 11.74 toneladas (t)/hectáreas (ha) en un área cosechada de 253,308.89 ha [3].

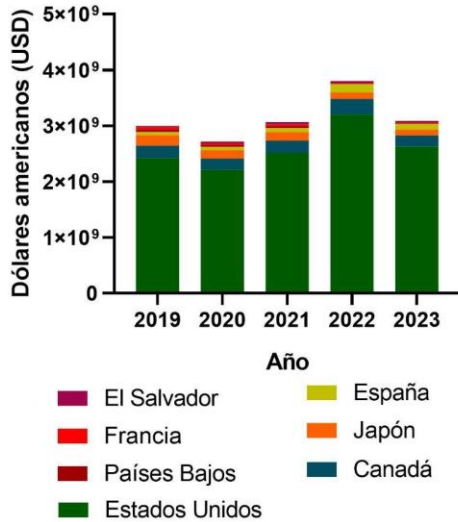
A nivel mundial, México también es el principal exportador de aguacate, siendo Estados Unidos su principal destino comercial (Figura 2B). Tan solo en el año 2023, el 39 % de los aguacates exportados a nivel mundial fueron mexicanos y el 87 % de éstos se destinó a Estados Unidos [14]. El valor generado de estas exportaciones en este año, alcanzó los 2, 835 mil millones de dólares americanos (USD) [14, 15]. Otros destinos comerciales importantes para México entre el 2019 y 2023 fueron Canadá, Japón, España, Países Bajos, Francia y El Salvador. Las exportaciones a estos países en el 2023 generaron un valor de 199.6 mil millones (6.3 %), 103.9 mil millones (3.3 %), 102.2 mil millones (3.2 %), 7.6 mil millones (0.2 %), 13.2 mil millones (0.4 %) y 28.8 mil millones de USD (0.9 %), respectivamente (Figura 2B). Por otra parte, las exportaciones a Estados Unidos generaron 2,628.8 mil millones de USD, lo que representó el 83 % del valor total generado en el 2023 (Figura 2B). Otros destinos comerciales emergentes desde el 2022 fueron Honduras y Costa Rica.

El principal estado mexicano productor y exportador de aguacate a nivel nacional es Michoacán, seguido de Jalisco, Ciudad de México (CDMX), Nayarit, Estado de México y Nuevo León (Figura 2C). En el 2023, las exportaciones de Michoacán generaron 2,861.9 millones de USD, es decir, el 90.3 % del valor total, siendo un porcentaje que se ha mantenido casi invariable desde el 2018 (Figura 2C). Jalisco se ha colocado como el segundo estado exportador, generando 217.2 mil millones de USD, es decir, el 6.8 % del valor total (Figura 2C). La CDMX, Nayarit, el Estado de México y Nuevo León, generaron 55.7 mil millones (1.8 %), 14.48 mil millones (0.5 %), 10.0 mil millones (0.3 %) y 3.7 mil millones de USD (0.1 %), lo cual tan sólo representó el 2.6 % del valor total (Figura 2C).

A Principales países productores de aguacate



B Principales destinos comerciales del aguacate mexicano



C Principales estados exportadores de aguacate

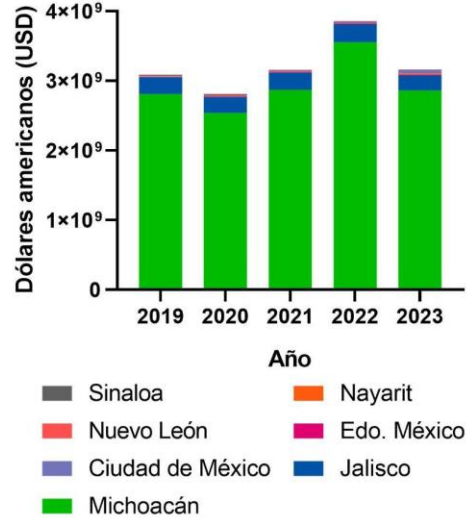


Figura 2. Producción mundial y nacional de aguacate para exportación y principales destinos comerciales en el 2023. A, cinco principales países productores de aguacate entre 2018 y 2023. B, principales destinos comerciales en 2023. C, principales estados exportadores de aguacate en 2023.

Además de Michoacán, otros estados productores son Jalisco, Estado de México, Nayarit y Morelos, los cuales atienden principalmente el consumo local. Para cubrir la demanda local e internacional del fruto de aguacate, el área sembrada con este cultivo fue de 264,589.06 ha en el 2023, de las cuales se cosecharon 253,308.89 ha (Figura 3A) [3]. El 91.9 % del área sembrada y el 92.9 % de la

cosechada se localizan en los cinco estados anteriormente mencionados. Del total del área sembrada, 186,713.13 ha se encuentran en Michoacán, de las cuales se cosecharon 184,224.14 ha (Figura 3A). Estas dimensiones representan el 70.6 % de lo sembrado y el 72.7 % de lo cosechado. Los otros cuatro estados tan solo sembraron 56,510.18 ha (21.4 %) y cosecharon 51,320.88 ha (20.3 %). El área sembrada en los estados de Jalisco, Estado de México, Nayarit y Morelos fue de 29,618.87 (11.2 %), 12,936.51 (4.9 %), 8,141.8 (3.1 %) y 5,813 (2.2 %) ha, respectivamente (Figura 3A). Sin embargo, el área cosechada fue de 26,890.64 (10.6 %), 11,456.94 (4.5 %), 8,141.8 (2.9 %) y 5,704 (2.25 %) ha en Jalisco, Estado de México, Nayarit y Morelos, respectivamente (Figura 3A) [3]. El rendimiento de la cosecha en Michoacán y Jalisco fue muy similar, siendo de 12.23 y 12.02 t/ha. El Estado de México y Nayarit también tuvieron un rendimiento similar, pero este fue menor que el de los dos estados anteriores con 11.6 y 10.5 t/ha, respectivamente (Figura 3A). El rendimiento más bajo de éstos cinco estados lo tuvo Morelos con 9.4 t/ha (Figura 3A) [3].

Michoacán también generó 2,252,783.06 t de aguacate, representando el 75.8 % del total de la producción a nivel nacional. Los estados de Jalisco, Estado de México, Nayarit y Morelos produjeron 323,228.37 (10.9 %), 132,478.25 (4.5 %), 76587.27 (2.6 %) y 53545.7 (1.8 %) t, respectivamente (Figura 3B). La producción de estos cuatro estados representó solo el 19.70 % a nivel nacional. En términos monetarios, el valor generado a nivel nacional en el 2023 fue de 60,097,063.91 pesos mexicanos (MXN) [3]. En el caso de Michoacán, el valor generado fue de 43,681,225.25 MXN, que corresponde a un 72.7 % del valor total reportado (Figura 3B). Jalisco generó 8,974,415.64 MXN (14.9 %), mientras que el Estado de México, Nayarit y Morelos generaron 2,437,421.67 (4.1 %), 1,667,276.63 (2.8 %) y 1,052,268.04 (1.7 %) MXN, respectivamente (Figura 3). Estos cuatro estados contribuyeron con un 23.5 % del valor generado a nivel nacional, es decir 14,131,381.98 MXN (Figura 3B) [3].

Incidencia de hongos en frutos de aguacate Hass

La incidencia de hongos fitopatógenos en el aguacate Hass inicia bajo las condiciones del campo abierto y se extiende y/o tiene la posibilidad de agravarse durante el periodo de poscosecha [5]. Es claro e irrefutable que las enfermedades en los frutos de aguacate generan un decremento en la producción agrícola y rendimientos económicos [16]. Se tiene documentado que las principales enfermedades que afectan a los frutos de aguacate en periodo poscosecha son la antracnosis, roña y diferentes tipos de pudrición donde los

hongos son los actores principales asociados a dichas enfermedades [2, 4, 6, 8, 9, 16] (Tabla 1). Interesantemente, algunas infecciones fúngicas son problemas que comienzan en el periodo de cosecha que terminan de evidenciarse en la poscosecha como es el caso de las especies de *Fusarium* [5].

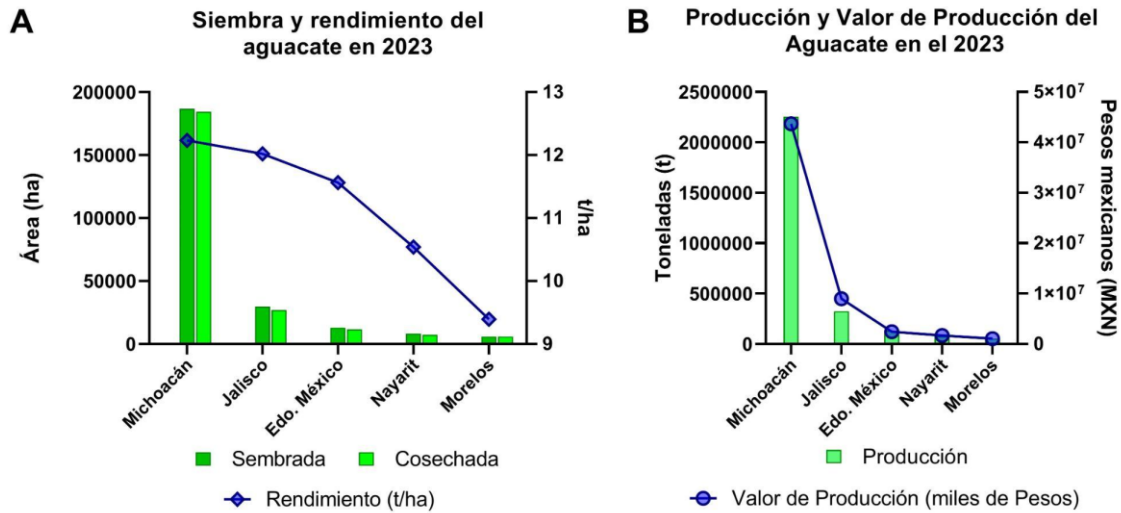


Figura 3. Principales estados productores de aguacate en el año 2023. A, rendimientos de las áreas sembradas y cosechadas. B, producción y valor de producción.

Antracnosis

Hongos de los géneros *Colletotrichum* y *Pestalotia* son los principales microorganismos que producen antracnosis. *Colletotrichum* es un hongo hialino con hifas septadas, conidióforos cortos y ramificados que producen conidios ovalados. Este hongo genera lesiones oscuras hundidas en forma circular y/o elipsoidales (Figura 4). Así mismo, se observa la emergencia de micelio color naranja o salmón, pérdida de peso y firmeza [5]. En cambio, *Pestalotia* presenta hifas septadas y conidios ovalados. La diferencia entre ambos géneros es que *Pestalotia sp* enferma la cáscara del fruto sin penetrar la pulpa [17, 18].

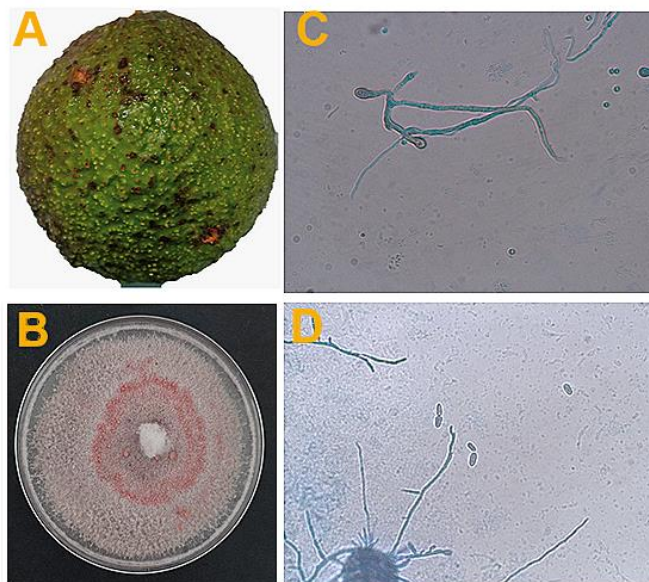


Figura 4. Antracnosis causada por *Colletotrichum* spp. A, signo de enfermedad en frutos de aguacate Hass. B, Morfología macroscópica de la cepa en medio PDA. C, Hifas septadas del hongo hialino. D, Microconidios observados a 50X. Las estructuras observadas en C y D fueron teñidas con azul de lactofenol. Elaboración propia.

Pudrición

Existen cuatro principales tipos de pudrición, siendo la del fruto, peduncular, chocolate y blanda causadas por *Dothiorella* sp., *Lasiodiplodia theobromae*, *Rhizopus stolonifer* y especies del género *Fusarium* respectivamente [2].

Dothiorella sp. es un hongo con hifas septadas y conidios cilíndricos albergados en conidióforos [6]. Presenta pignidina, una estructura esférica que contiene ascos con ascosporas, mientras que *L. theobromae* produce conidióforos, conidios cilíndricos e hifas septadas [18]. Por otro lado, *Fusarium* presenta hifas hialinas de las que emergen macroconidios curvados (lunados) y septados además de microconidios pequeños y ovalados (Figura 5) [4, 9]. *Rhizopus stolonifer* es un hongo dematiáceo que presenta hifas cenocíticas (no septadas) y rizoides. También contiene esporangios y sus estructuras reproductivas son conocidas como esporangiosporas [6, 8].

Los frutos de aguacate infectados con los hongos previamente mencionados presentan signos de enfermedad característicos. Por ejemplo, la infección de *R. stolonifer* genera manchas de color café características que proliferan cuando

los conidios han sido transportados del pedúnculo a la pulpa, donde germinan [6]. A diferencia de *R. stolonifer*, las infecciones causadas por *Dothiorella* no presenta un crecimiento micelial en el pedúnculo [6, 8]. Sin embargo, la sintomatología característica de esta enfermedad es la necrosis de los haces vasculares localizados en el interior del fruto [6]. *L. theobromae* y algunas especies del género *Fusarium* presentan crecimiento micelial blanco como principal signo de enfermedad. Posteriormente, el daño en el fruto se hace más evidente al palpar la pérdida de turgencia [4, 9, 18].

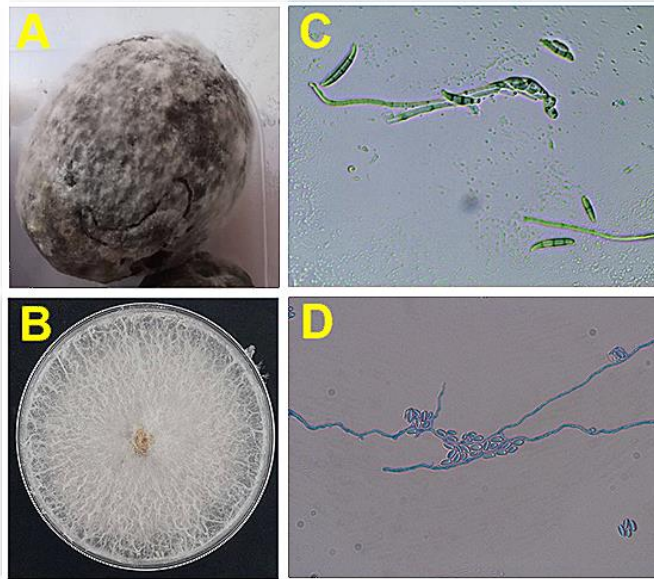


Figura 5. Pudrición causada por *Fusarium* spp. A, signo de enfermedad en frutos de aguacate Hass. B, morfología macroscópica de la cepa en medio PDA. C, hifas y macroconidios septados. D, Microconidios observados a 50X. Las estructuras observadas en D fueron teñidas con azul de lactofenol. Elaboración propia.

Roña

La roña o sarna del aguacate es causada por *Sphaceloma perseae* (*Elsinoe perseae*; telemorfo) que afecta principalmente hojas y frutos de aguacate. Es un hongo hialino con conidios elípticos, conidióforos ligeramente curvados, hifas septadas y clamidosporas (Figura 6). Las lesiones irregulares o redondeadas, color café claro son un claro síntoma de esta enfermedad [19]. La severidad avanzada de la enfermedad se presenta cuando la apariencia es corchosa en el fruto completo, presenta menor tamaño de lo normal pero no afecta la pulpa.

Sin embargo, cuando se observan grietas en el epicarpio del fruto este es más susceptible a dañar la pulpa [20].

Tabla 1. Principales enfermedades presentes en frutos de aguacate Hass causadas por hongos filamentosos.

Hongo	Enfermedad	Referencia
<i>Fusarium verticillioides</i>	Pudrición blanda	[6, 9]
<i>Fusarium solani</i>	Pudrición blanda	[4, 21]
<i>Fusarium graminearum</i>	Pudrición blanda	[22]
<i>Fusarium kuroshium</i>	Pudrición blanda	[23]
<i>Rhizopus stolonifer</i>	Pudrición chocolate	[6, 8]
<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Antracnosis	[5, 6, 16, 18]
<i>Colletotrichum acutatum</i>	Antracnosis	[16, 18]
<i>Pestalotia sp.</i>	Antracnosis	[17]
<i>Sphaceloma perseae</i>	Roña o sarna	[20]
<i>Dothiorella sp</i>	Pudrición del fruto	[6]
<i>Glomerella cingulata</i> var. <i>minor</i>	Antracnosis	[24]
<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	Pudrición peduncular	[6, 18]
<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Marchitez o tristeza del fruto	[25, 26]
<i>Clonostachys rosea</i>	Pudrición	[2]

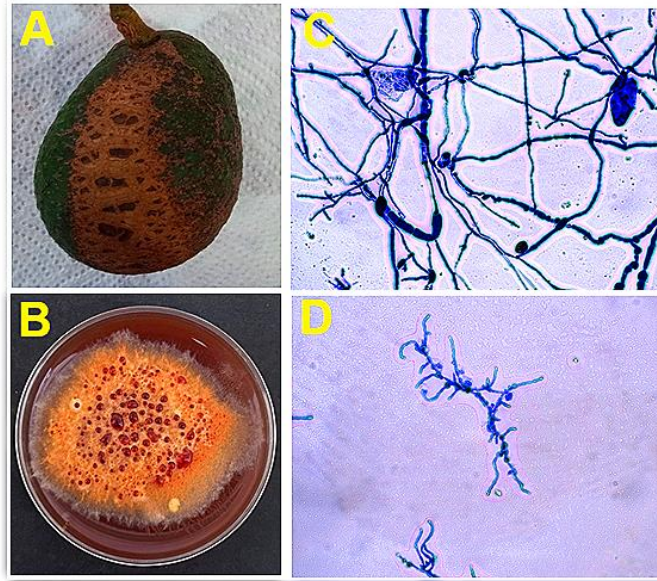


Figura 6. Roña causada por *Sphaceloma* spp. A, signo de enfermedad en frutos de aguacate Hass. B, Morfología macroscópica de la cepa en medio PDA. C, Hifas septadas y conidióforos de hongo hialino. D, Microconidios cilíndricos observados a 50X. Las estructuras observadas en C y D fueron teñidas con azul de lactofenol. Elaboración propia.

Factores que favorecen la infección por hongos

El aguacate es considerado un fruto climatérico. Esta clasificación se otorga a frutos cuya maduración ocurre o continúa aún después de su cosecha. Este factor intrínseco de maduración más la interacción con el ambiente y el daño mecánico en la cáscara, propician las infecciones por hongos fitopatógenos. Ya que el aguacate es rico en nutrientes, es blanco de distintas especies de hongos como se mencionó anteriormente. El proceso por el cual el aguacate envejece naturalmente y se vuelve susceptible a la infección fúngica se debe a tres factores propios del ciclo de vida del fruto. Estos son la maduración por el aumento en la producción de etileno, la pérdida de firmeza por la actividad enzimática y la falta de turgencia por pérdida de agua.

El fruto recientemente cosechado e inmaduro experimenta un proceso de acumulación y liberación de etileno, el cual es una fitohormona que induce la maduración de los frutos. Por ejemplo, en un aguacate inmaduro de la variedad Monroe, la producción de etileno es menor a $0.1 \mu\text{L kg}^{-1} \text{h}^{-1}$, mientras que en su mayor pico de producción alcanza los $3000 \mu\text{L kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ [27]. Durante este periodo,

en el fruto también se lleva a cabo actividad anabólica en la que se degradan polisacáridos presentes en la pulpa. Enzimas como las pectinasas y poligalacturonasas se encargan de hidrolizar parte de la fibra del fruto. En consecuencia, el fruto sufre pérdida de firmeza y también de agua, haciendo más susceptible al fruto a daños externos [28, 29].

Factores físicos que promueven la proliferación de hongos

Daño mecánico

Así como existen factores propios del aguacate que propician la infección por hongos también existen factores externos que favorecen la infección en un fruto de aguacate en poscosecha. El daño mecánico es una de las principales formas en las que un fruto puede ser infectado por hongos tanto fitopatógenos como oportunistas. En este sentido, el exocarpo (gruesa cáscara del fruto) es la principal barrera protectora del aguacate. El exocarpo se compone por una película cerosa en su capa más externa que cubre a la epidermis y bajo esta se encuentran entre 1 y 3 capas de células que son seguidas por tejidos de parénquima y esclerénquima. Una vez que esta capa es dañada por golpes, heridas o laceraciones, la integridad del fruto se ve comprometida, exponiendo la pulpa del aguacate a la infección por hongos. Incluso, sólo el daño mecánico sin intervención de organismo fúngicos puede provocar la marchitez de las lenticelas, provocando pardeamientos prematuros en el exocarpo [30]. Interesantemente, basta con una herida de 3 mm de profundidad para que las esporas de hongos pueden infectar un fruto de aguacate sano [31].

Los daños mecánicos producidos durante la cosecha, el empaque, el transporte y la postcosecha afectan significativamente la calidad del aguacate [5]. Los daños mecánicos durante todas estas etapas pueden manifestarse como desgarraduras, cortaduras, fricciones, punciones, magulladuras y destupado (caída del pedúnculo provocada por el cosechador o la recolección) [5, 32]. Dichas lesiones promueven la proliferación de hongos fitopatógenos poscosecha como *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium* spp., lo cual genera posteriormente antracnosis y podredumbre [33]. En una evaluación de más de 380 frutos de aguacate (durante una cosecha en Michoacán) se determinó que los daños mecánicos más perjudiciales son aquellos producidos por fricciones y punciones en el fruto. Estos daños causan oscurecimiento vascular, pudrición basal y una disminución en la calidad externa del aguacate [32]. En otro estudio se analizó el efecto de las magulladuras en el aguacate Hass

[34]. De acuerdo con este estudio, la manifestación de magulladuras por impacto depende de factores como el grado de madurez de la fruta, su firmeza, el tiempo de almacenamiento antes de la maduración, el período de retención después del impacto y la temperatura de conservación tanto antes como después del impacto. Se ha observado que la severidad del magullamiento aumenta progresivamente en los frutos almacenados hasta 5 semanas antes de sufrir una lesión por impacto y en aquellos conservados hasta 7 días después de éste [34]. Por otro lado, los aguacates verdes y firmes no mostraron magulladuras visibles después de 15 días al dejarles caer desde una altura de 50 a 100 cm (aproximadamente 1.36 J de energía absorbida) [34]. Sin embargo, se ha demostrado que la caída de aguacates inmaduros desde alturas de 30 cm o mayores puede aumentar las lesiones y las pudriciones en la maduración [35]. Una caída con estas características representa una absorción de energía de 0.54 J para un fruto de alrededor de 220 g, con una probabilidad de expresión de pudrición y ablandamiento en la etapa madura de 2 de cada 3 frutos de aguacate [35]. Para los frutos en estados de maduración más avanzados y con mayor blandura se desarrollan niveles progresivamente mayores de magulladuras tras impactos desde 50 cm (alrededor de 0,8 J de energía absorbida) [34]. Adicionalmente, mantener la fruta a temperaturas bajas (menores a 5 °C) antes y después del golpe resulta en una menor expresión de magulladuras [34]. Se ha considerado también el efecto que tienen las vibraciones del vehículo durante el transporte del aguacate Hass. Por ejemplo, en un viaje de 25 km con duración de 50 minutos se generan vibraciones de baja frecuencia de 0-5 Hz. Las vibraciones producidas contribuyen al daño de la fruta siendo más representativas en los frutos desprotegidos que cuando se protegen con algún envoltorio durante el transporte [35]. Si bien, la compresión y los cortes pueden afectar la calidad de la fruta, el daño por impacto parece ser el más perjudicial que los dos primeros. Es por ello que, para mitigar estos problemas, es fundamental implementar métodos de cosecha adecuados, usar contenedores apropiados y minimizar las alturas de caída para mantener la calidad del aguacate.

Temperatura

La temperatura baja es un factor importante que ayuda a prevenir infecciones microbianas de cualquier tipo, pero contradictoriamente, las temperaturas y humedades relativas altas favorecen la infección y proliferación de hongos en la poscosecha. Sin embargo, se tiene documentado que los hongos pueden incluso infectar y diseminarse con una temperatura ambiente óptima de



aproximadamente 25 °C [36, 37]. A esta temperatura, los frutos de aguacate tienen una vida de anaquel de 9 días en promedio [38]. Generalmente el lote es refrigerado para mantener la calidad del fruto buscando extender su vida de anaquel. Sin embargo, cuando el aguacate se lleva al almacenamiento, esto significa someterlo a cambios bruscos de temperatura que pueden dañar su apariencia y calidad [39]. Estas alteraciones generan una mayor vulnerabilidad a enfermedades. En este contexto, el grado de enfriamiento puede ser diferentemente aplicado según la variedad. En el caso de los frutos de aguacate Hass, los síntomas de daño por frío suelen aparecer después de 4 semanas de almacenamiento a unos 6 °C [40, 41]. Uno de los principales problemas por exposición a frío extremo es la “mancha de la pulpa” cuyo signo es la aparición de pequeñas manchas oscuras y ennegrecimiento de la región de los haces vasculares en el momento del corte. Otro aspecto a considerar es la pérdida de agua que se ve favorecida por altas temperaturas y humedad, lo cual, promueve la evapotranspiración. De igual manera, si el fruto se expone a una corriente de aire en el medio donde se almacena, la pérdida de agua aumenta. Los efectos que la pérdida de agua puede causar en frutos son notorios desde el 1% de pérdida de agua. Con un porcentaje de pérdida de agua del 6% se puede comenzar a ver un fruto más blando y con pérdida de textura [42]. Por su parte, la enzima poligalacturonasa se encarga de degradar polisacáridos de pectina por medio de rupturas en los enlaces α -1,4-glicosídicos. Mientras tanto, la pectina metilesterasa degrada parcialmente la pared celular del fruto del aguacate, provocando ablandamiento del fruto. Una manera conocida de disminuir la actividad catalítica de estas enzimas es el uso de bajas temperaturas de almacenamiento, lo cual, también favorece la conservación del aguacate retrasando el crecimiento de hongos fitopatógenos [43].

El fruto poscosecha se almacena inicialmente a 4-13 °C (85-90 % de humedad relativa) y posteriormente a 0-13 °C. De esta manera, el cambio gradual de temperatura favorece la conservación del fruto sin afectarlo negativamente [42]. Otra técnica similar para evitar el daño por frío en el aguacate Hass durante el almacenamiento es mediante el preacondicionamiento (hidroenfriamiento de la pulpa a 6 °C) y el encerado. El pretratamiento de hidroenfriamiento por sí solo no puede prevenir eficazmente la lenticelosis, pero en combinación con el encerado crea una reducción tres veces mayor del daño interno y retarda el cambio del color de la fruta [5]. La tasa de metabolismo y la producción de etileno controladas por el tratamiento extendieron el período de comercialización de la fruta mantenida a temperatura ambiente después del almacenamiento a 3 °C durante 46 días. El preenfriamiento se utiliza en algunos

frutos y productos hortícolas como un paso extra para evitar someter al fruto recientemente cosechado a estrés causado por el cambio extremo durante el almacenamiento. La exposición a temperaturas inferiores con un umbral crítico (10-15 °C) por encima del punto de congelación genera daños como manchas en la pulpa [5]. A bajas temperaturas se busca, además de los puntos anteriores, reducir el metabolismo de agentes fúngicos evitando la diseminación de infecciones y retrasando el crecimiento de hongos que puedan estar presentes en el fruto.

Humedad

El agua disponible en el medio resulta un factor importante ya que la humedad relativa también es un factor crítico que afecta la calidad del fruto y propicia las condiciones para la proliferación y crecimiento de hongos. Algunos hongos, como *Coniella vitis*, tienden a mostrar un mejor desarrollo hifal, mejor germinación de esporas y mayor virulencia en ambientes con un pH ácido que en condiciones de pH neutro o alcalino. El cambio en la actividad metabólica es relevante, ya que no sólo disminuye el crecimiento del hongo, sino que también se reduce la liberación de enzimas degradadoras del fruto [44].

Mecanismos moleculares de defensa en plantas de *Persea americana* contra hongos

En general, el proceso de infección de hongos postcosecha suele iniciarse cuando las esporas llegan a la superficie de los frutos. De este modo, los hongos fitopatógenos permanecen en estado latente sobre la cutícula del fruto inmaduro y no se hacen visibles hasta que el fruto alcanza la madurez. En la etapa de madurez, los frutos son más susceptibles a infectarse debido a que en esta etapa se debilitan los sistemas de defensa y se reblandece el tejido de los frutos. Los hongos penetran el tejido del fruto a través de heridas provocadas por factores bióticos o abióticos, por medio de aperturas naturales de la planta (e.g. estomas) o mediante rupturas directas en la cutícula del fruto [10].

El hongo *Colletotrichum gloeosporioides* infecta el fruto mediante la germinación del conidio y la formación de un apresorio. La penetración de las hifas subcuticulares permanece latente hasta que el fruto madura y se ablanda durante el almacenamiento. La resistencia del fruto inmaduro a la infección se atribuye a diversos compuestos antifúngicos destacando el compuesto (Z, Z)-1-acetoxi-2-hidroxi-4-oxo-heneicosá-12,15-dieno [45]. Otros compuestos

identificados en la cáscara del fruto inmaduro del aguacate con propiedades antifúngicas son el 1,2,4-trihidroxiheptadec-16-ieno, 1,2,4-trihidroxihepta dec-16-eno y 1-acetoxi- 2,4-dihidroxiheptadec-16-ieno [46]. El nivel de compuestos dienos antifúngicos en la piel de los aguacates inmaduros está regulado por la enzima lipoxigenasa [47]. Durante la maduración, aumenta la actividad de esta enzima y se reducen las concentraciones de dienos. En aguacates inmaduros, los niveles de dienos pueden elevarse por exposición a etileno o dióxido de carbono, así como por el uso de inhibidores de lipoxigenasa como la epicatequina [47].

El mecanismo molecular para la penetración de los hongos patógenos al fruto de aguacate representa un proceso complejo que involucra la producción de metabolitos tóxicos, la evasión del sistema inmune de la planta y la formación de esporas [8]. La segregación de las enzimas degradadoras de la pared celular (CWDE; *Cell wall degrading enzymes*, por su acrónimo en inglés) ayuda a los hongos postcosecha como *Botrytis*, *Colletotrichum* y *Fusarium* a romper los tejidos de las plantas que sirven de barrera física protectora al medio [48]. Por ejemplo, *Fusarium graminearum* posee 24 enzimas CWDE diferentes necesarias para descomponer la pared celular de las plantas hospederas [22]. Entre estas enzimas hidrolíticas se encuentran a las cutinasas, lipasas, pectinasas, proteasas, xilanasas y celulasas [22]. Entre las CWDE de *Botrytis cinerea*, se encuentran las endopoligalacturonasas (codificada por el gen *Bcpg1*) y son las primeras enzimas patogénicas secretadas durante la infección [48, 49]. Asimismo, las proteínas inductoras de necrosis (NLP; *Necrosis-inducing proteins*, por su acrónimo en inglés) son clave para el establecimiento exitoso de los hongos postcosecha durante las etapas iniciales de la infección [8]. Los hongos patógenos excretan también metabolitos fitotóxicos, conocidos como micotoxinas, que pueden dañar las células del huésped y desencadenar la muerte celular. Por ejemplo, las zearalenonas [22] y fumonisinas [23] en *Fusarium* spp. Los metabolitos fitotóxicos cambian también el pH de la planta hospedera para crear condiciones óptimas de infiltración, ya sea secretando sustancias alcalinas o ácidas que promueven la infección. En el fruto de aguacate, *Colletotrichum gloeosporioides* secreta amonio para elevar el pH del medio de 3.8 a 7.0, creando condiciones óptimas para la pectato liasa (pH 7.5-8.0) mediante la expresión del gen *pelB*. El aguacate se vuelve más susceptible a hongos cuando el pH del pericarpio aumenta de 5.2 a 6.0 durante la maduración [50]. Estos metabolitos no solo contribuyen a la descomposición del tejido, sino que también interfieren con las respuestas de defensa de la planta. La infección causada por *Botrytis cinerea* y *Colletotrichum gloeosporioides* puede inducir la producción de etileno en el fruto, lo que acelera la maduración

y, por tanto, elevan la susceptibilidad a la infección [48]. Algunas micotoxinas producidas por *Fusarium kuroshium* durante la infección del aguacate son el ácido fusárico, fumonisinas y los tricotecenos como la toxina T-2. Dentro de este grupo, se ha demostrado que el ácido fusárico causa necrosis y clorosis en el tejido foliar de las hojas del aguacate [23]. Cuando los hongos patógenos atacan las frutas, sus células pueden acumular rápidamente una gran concentración de especies reactivas de oxígeno (ROS) en torno al sitio de infección. Además, los hongos también emplean estrategias de evasión del sistema inmune de la planta. Los micro RNAs silencian genes de la planta hospedera para inducir modificaciones en el sistema inmune [8]. Después de colonizar el tejido, los hongos producen una gran cantidad de esporas que son liberadas al ambiente, listas para infectar nuevos frutos perpetuando así el ciclo del daño postcosecha (Figura 7).

Los mecanismos de defensa de las plantas se fundamentan principalmente en barreras físicas y la activación de señales genéticas y bioquímicas. Como primera respuesta inmune se activan los patrones moleculares asociados a patógenos (PAMP; *Pathogen-associated molecular pattern*, por su acrónimo en inglés). Los PAMP son reconocidos por los receptores de reconocimiento de patrones (PRR; *Pattern recognition receptors*, por su acrónimo en inglés) que se localizan en la superficie de las plantas como el receptor tipo cinasa (RLK; *Receptor like kinases*, por su acrónimo en inglés) y las proteínas tipo receptor (RLP; *Receptor like proteins*, por su acrónimo en inglés). El reconocimiento de estos patrones activa la cascada de inmunidad por PAMP denominada PTI (*PAMP-triggered immunity*, por su acrónimo en inglés) [51, 52]. La respuesta inmune PTI restringe la colonización de patógenos a través de un reforzamiento de la pared celular, la rápida difusión de iones a través de la membrana plasmática, la activación de proteínas cinasas activadas por mitógenos (MAPK; *Mitogen-activated protein kinases*, por su acrónimo en inglés), la activación de proteínas G, la liberación de ubiquitina, la liberación de especies reactivas de oxígeno (ROS; *Reactive oxygen species*, por su acrónimo en inglés), la liberación de factores de transcripción, la expresión de genes de defensa y la señalización de hormonas [26, 51, 53]. Los hongos patógenos pueden liberar factores de virulencia (efectores) que resulta en una susceptibilidad desencadenada por efectores (ETS; *Effector-triggered susceptibility*, por su acrónimo en inglés). Los efectores son reconocidos por proteínas NB-LRR (*Nucleotide-binding leucine-rich repeat*, por su acrónimo en inglés) los cuales desencadenan una respuesta acelerada y amplificada de PTI que se conoce como inmunidad desencadenada por efectores (ETI; *Effector-triggered immunity*, por su acrónimo en inglés). La iniciación de ETI desencadena una respuesta hipersensitiva (HR; *Hypersensitive*

response, por su acrónimo en inglés) en el sitio de infección en cual previene que la infección se disperse en otras partes de la planta resultando en la muerte celular programada [48]. Las plantas también se protegen por un mecanismo llamado resistencia adquirida sistémica (SAR; *Systemic acquired resistance*, por su acrónimo en inglés). La SAR es inducida por patógenos que usualmente infectan hojas o tallos y es dependiente de diversas fitohormonas incluyendo el ácido salicílico, ácido jasmónico, etileno, ácido abscísico o combinaciones de estas. La respuesta de SAR está asociada con un incremento en la expresión de genes relacionados con la patogénesis (PR; *Pathogenesis-related genes*, por su acrónimo en inglés) [26, 48, 54].

En este sentido, la defensa primaria del fruto de aguacate se basa en el fortalecimiento de la cáscara, cuya cutícula es rica en ceras y limita la entrada de patógenos reduciendo la pérdida de agua y manteniendo la firmeza del órgano. Además, la densa estructura de las células epidérmicas dificulta la penetración de las hifas de los hongos patógenos [1]. Similarmente, en la pudrición blanca de la raíz causada por *Rosellinia necatrix* se inducen una serie de genes de defensa relacionados con el fortalecimiento de la pared celular como la peroxidasa aniónica formadora de lignina y la cinamoil-CoA reductasa. También se expresan genes que codifican para inhibidores de proteinasas, regulación hormonal, factores de transcripción, entre otros [7]. Los mecanismos de defensa del aguacate contra *Phytophthora cinnamomi* incluyen el fortalecimiento de las paredes celulares con la deposición de calosa y lignina [26]. Otro mecanismo importante es la defensa química del aguacate basada en la producción de compuestos antimicrobianos como polifenoles, flavonoides, terpenoides y ácidos grasos (ácido oleico y linoleico), que inhiben el crecimiento de los patógenos [26]. Durante el ataque fúngico, la acumulación de fitoalexinas actúa como una defensa inducida al limitar la expansión de los hongos [8]. Asimismo, la activación de enzimas hidrolíticas desempeña un papel clave en la defensa postcosecha. Enzimas como las quitinasas y β -1,3-glucanasas degradan las paredes celulares de los hongos, dificultando su desarrollo. Por otro lado, las peroxidasa y polifenoloxidasas catalizan la formación de compuestos tóxicos para los patógenos, mediante la oxidación de fenoles a formas más reactivas [18]. Durante la infección de *Colletotrichum gloeosporioides*, las células del fruto de aguacate (tiras de tejido del pericarpio de ~1 mm de espesor, casi libres de tejido del mesocarpio) generan ROS en las zonas infectadas, como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), el oxígeno molecular (O₂) y los radicales hidroxilos (OH). Se sugiere que este mecanismo de defensa crea un ambiente hostil para los hongos y desencadena la producción de fitoalexinas, acumulación de lignina, peroxidación de lípidos y una respuesta de tipo HR [53]. Esta respuesta forma

parte de la resistencia inducida en la que también intervienen señales químicas como el ácido jasmónico y el etileno para activar defensas sistémicas en otras partes del fruto [48]. En las raíces del aguacate (*Persea americana* var. *drymifolia*) se han identificado 13,778 genes expresados en respuesta a la infección con *Fusarium* sp. Dentro de esta colección de genes destacan aquellos relacionados con respuestas de defensa que involucran vías de señalización de fitohormonas, como el ácido abscísico (58 genes), auxina (51 genes), etileno (35 genes), ácido jasmónico y ácido salicílico (15 genes). Otras categorías de genes están relacionadas con mecanismos de defensa descritos anteriormente como proteínas R (*Resistant proteins*, por su acrónimo en inglés), factores de transcripción y reguladores de la respuesta inmune asociados a PTI, ETI, HR, SAR, entre otros [55]. También, el ácido araquidónico activa los mecanismos de defensa en las raíces del aguacate. Estas producen el compuesto antifúngico phenol-2,4-bis (1,1-dimetiletil) que reduce la colonización por *Phytophthora cinnamomi* y *Aspergillus*, inhibiendo la producción de ROS en ambos hongos patógenos [25]. En conjunto, estos mecanismos permiten que *Persea americana* limite el daño ocasionado por hongos durante la poscosecha, garantizando una mayor resistencia ante patógenos y preservando la calidad del fruto por más tiempo (Figura 7).

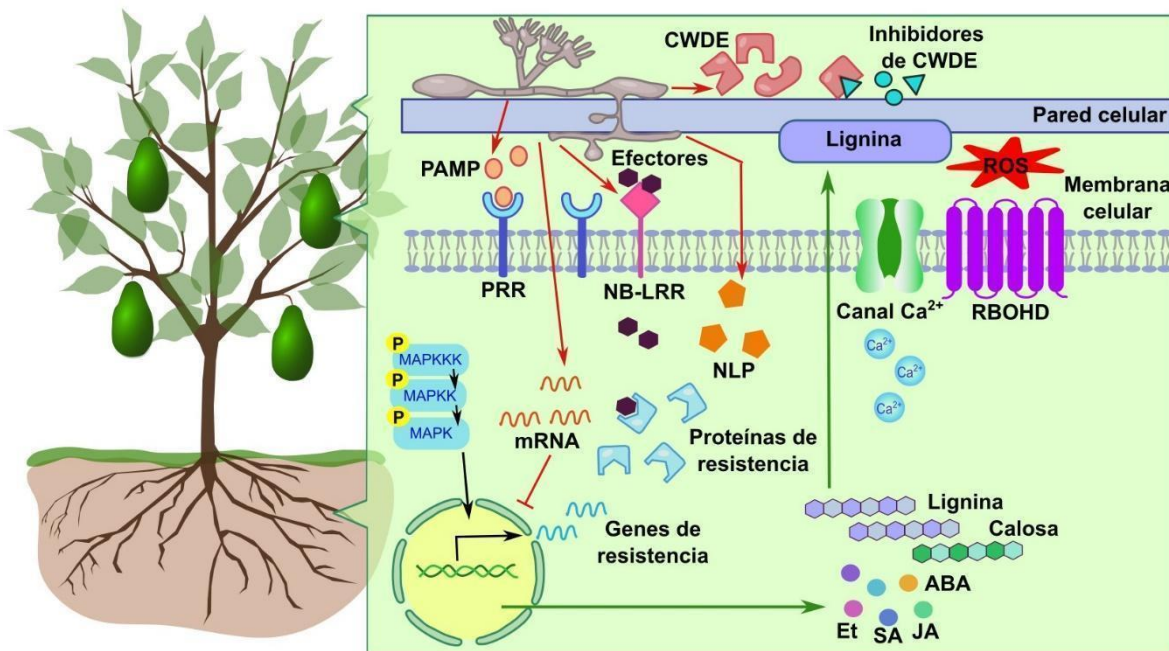


Figura 7. Algunos mecanismos de ataque de los hongos patógenos en la planta del aguacate incluyen la liberación de PAMP reconocidos por receptores PRR. La secreción de enzimas hidrolíticas (CWDE) tiene como objetivo degradar la pared

celular. La producción de proteínas NPL pueden inducir necrosis local en las células hospederas. Los efectores secretados son reconocidos por los receptores NB-LRR, mientras que la liberación de micro RNAs busca bloquear la respuesta inmune desencadenada por la planta hospedera. En la respuesta de defensa de la planta del aguacate contra los hongos patógenos se incluye la activación de PTI a través de los PAMP. En conjunto, la respuesta PTI involucra la activación de la cascada MAPK, la señalización de calcio, la producción de inhibidores de CWDE y la liberación de genes de resistencia que codifican para proteínas de resistencia. El reforzamiento de la pared celular es logrado con la producción de calosa y lignina. El ácido salicílico (SA), ácido jasmónico (JA), etileno (Et) y ácido abscísico (ABA) juegan un papel relevante en la defensa química del aguacate. Finalmente, la participación de ROS por medio de la proteína RBOHD se ve involucrada en la interacción hongo fitopatógeno-planta.

Métodos de control para el manejo de enfermedades causadas por hongos fitopatógenos en poscosecha

El manejo de enfermedades producidas principalmente por hongos inicia por la prevención y terapia [5]. En la mayoría de los casos, las enfermedades en frutos de aguacate en poscosecha se controlan con productos químicos como el sulfato de cobre o procloraz que son dos fungicidas de amplio espectro [9]. Sin embargo, existen tratamientos alternativos que son un poco más ecológicos y no contaminan drásticamente el medio ambiente [24, 56-59].

Métodos biológicos: Aceites esenciales

El uso de aceites esenciales representa una alternativa innovadora y sostenible (hasta cierto nivel) con propiedades antifúngicas. Los aceites esenciales pueden desestabilizar la membrana citoplasmática y pared celular de hongos filamentosos y otros microorganismos [56]. En principio, las fracciones hidrofóbicas compuestas por volátiles naturales disuelven los componentes de la membrana del patógeno e interrumpen la permeabilidad al ATP (adenosin-5'-trifosfato) [60]. En base a lo anterior, ocurre una inducción de la muerte celular programada mediante la fuga de compuestos intracelulares, Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} . Además, hay una incorrecta disposición estructural de quitina, glucanos y glicoproteínas conduciendo a la pérdida de viabilidad fúngica [4]. La actividad de los aceites esenciales en ocasiones se confiere a uno de los componentes del perfil químico. Tal es el caso del timol y carvacrol del aceite de tomillo o el E-

cinnamaldehído y eugenol en el aceite de canela [4, 5, 9]. Sin embargo, esto no siempre es una regla ya que la actividad antimicrobiana también puede estar asociada a compuestos minoritarios o bien a la actividad sinérgica de todos los volátiles disueltos en un aceite esencial particular. Existe una amplia variedad de aceites esenciales utilizados para inhibir el crecimiento de hongos causantes de enfermedades en frutos de aguacate Hass obteniendo resultados positivos (Tabla 2). Una clara ventaja de este recurso es la existencia de monocultivos destinados a la producción de plantas aromáticas comunes cuyos aceites esenciales muestran un amplio espectro antifúngico. Sin embargo, su aplicación a gran escala sigue representando un gran reto en términos de sostenibilidad.

Tabla 2. Principales aceites esenciales que se usan para el manejo de enfermedades presentes en frutos de aguacate Hass.

Hongo	Aceite esencial	Referencia
<i>Fusarium verticillioides</i>	<i>Cinnamomum verum, Origanum vulgare, Syzygium aromaticum, Cymbopogon, L. graveolens, Zataria multiflora, Foeniculum vulgare, Pinaceae, Cuminum cyminum y Heracleum persicum</i>	[9, 61-63]
	<i>Thymus vulgaris</i>	
<i>Fusarium solani</i>	<i>Artemisia annua</i>	[4, 63-65]
	<i>Larrea tridentata</i>	
<i>Rhizopus stolonifer</i>	<i>Syzygium aromaticum L., Origanum vulgare L., Mentha spicata L., Citrus sinensis, Rosmarinus officinalis L.</i>	[66]
<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	<i>Mentha spicata, Satureja montana, Thymus vulgaris, Cinnamomum verum, Lavandula angustifolia, Piper migrum, Schinus molle</i>	[5, 60, 67, 68]
<i>Pestalotia sp</i>	<i>Cymbopogon citratus L., Syzygium aromaticum L., Hibiscus sadfariffa L., Curcuma longa L.</i>	[69]
<i>Sphaceloma perseae</i>	<i>Larrea tridentata</i>	[19]
<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	<i>Thymus vulgaris</i>	[5]
<i>Clonostachys rosea</i>	<i>Thymus vulgaris</i>	[2]

Métodos físicos: temperatura, luz UV-C y películas biodegradables

La antracnosis y la pudrición del pedúnculo en la poscosecha, plantean desafíos importantes para mantener la calidad del fruto, minimizar las pérdidas y prolongar la vida útil del aguacate [18]. Para abordar estos problemas se han explorado varios métodos de control físicos como alternativas amigables con el medio ambiente. El método de refrigeración es tradicionalmente usado para prolongar la vida de los frutos y es considerado un método rutinario para el control de enfermedades fúngicas en poscosecha de aguacate. La eficacia del manejo de la temperatura varía con la madurez de la fruta y la temporada de cultivo [24]. Las temperaturas de maduración más bajas (15-17 °C) reducen la incidencia de antracnosis, causadas por *Glomerella cingulata* var. minor y *Dothiorella aromatica*, en comparación con las temperaturas más altas (24-30 °C) [24]. Además, se ha demostrado que la mejor temperatura de almacenamiento del aguacate Hass es de 6 °C. Bajo estas condiciones, se preservan el color y la firmeza del fruto sin causar daños externos ofreciendo alrededor de cinco días de vida en anaquel tras el almacenamiento [70]. Adicionalmente al almacenamiento frío, se consideran atmósferas controladas para reducir la descomposición del aguacate. De esta manera, se ha demostrado que el almacenamiento a 5-7 °C con 2 % O₂ y 2 % de CO₂ de cuatro a seis semanas, evita daños externos (conservando su firmeza y color) en los aguacates almacenados [71]. Otros métodos efectivos incluyen las condiciones de la cadena de frío (5.5 °C durante dos días, 5 °C durante seis días y 4.5 °C durante 20 días con un 95% de humedad relativa) con la combinación de cera y embalaje de polietileno. Estas condiciones permiten retrasar la maduración del aguacate hasta dos semanas, manteniendo su calidad con mínimos cambios en humedad (9.5 %), sólidos totales (19.0 %) y viscosidad [5]. Las tecnologías emergentes, como el plasma frío, muestran potencial para controlar enfermedades postcosecha sin efectos fitotóxicos [72]. El plasma frío es un gas ionizado que contiene especies reactivas de oxígeno y de nitrógeno, electrones y radicales libres. Ha surgido como una alternativa prometedora para reducir la incidencia de hongos, bacterias y micotoxinas en las superficies de los granos sin efectos adversos en la calidad del producto [72]. Se ha demostrado que el plasma frío reduce significativamente el crecimiento *in vitro* de *Colletotrichum alienum* y *Colletotrichum fioriniae* aislados del aguacate [73].

El tratamiento con bajas dosis de luz UV-C es otro método físico prometedor para controlar las enfermedades fúngicas del aguacate en poscosecha. Los rayos UV-C son una forma de radiación ultravioleta con una longitud de onda

corta (254 nm). Este tipo de radiación es altamente energética y posee propiedades germicidas, al destruir o inactivar microorganismos como bacterias, virus y hongos [57]. Se ha observado que los tratamientos con luz UV-C han tenido éxito en la reducción en la tasa de pudrición durante el almacenamiento en diversas frutas y verduras [74]. Los tratamientos con luz UV-C pueden ser más efectivos cuando se combinan con otros métodos, como agentes de biocontrol o fungicidas [74]. Se ha observado que la irradiación UV-C y gamma reducen el daño que puede ocurrir durante el almacenamiento del aguacate. Adicionalmente, la luz UV-C puede alterar positivamente la composición nutricional de algunos frutos y vegetales [57]. En el aguacate, por ejemplo, se ha observado un mayor contenido de grasas saludables tras la aplicación de esta tecnología [29]. Sin embargo, una limitante de esta técnica refiere a su incapacidad de penetrar barreras físicas por lo que solo tiene efecto en las superficies de los frutos [57]. Por lo anterior, es necesario realizar más investigaciones para optimizar las aplicaciones de la luz UV-C contra una variedad de patógenos.

Otros enfoques eficaces incluyen la aplicación de recubrimientos comestibles y películas biodegradables directamente sobre la superficie de los frutos de aguacate. Los recubrimientos y películas prolongan la vida útil del aguacate al conservar sus propiedades fisicoquímicas y prevenir infección por hongos. Los recubrimientos no activos, basados en polisacáridos y proteínas, crean una barrera física que reduce la transferencia de agua, intercambio de gases, el cambio de color y la pérdida de firmeza. En contraste, los recubrimientos activos, con ingredientes adicionales como extractos de plantas y moléculas orgánicas, ofrecen mayor eficacia al retrasar la maduración y actuar como fungistáticos. Esto se logra mediante la inducción del daño a las membranas de los hongos, provocando fuga citoplasmática, o generando un ambiente hostil para su crecimiento [58]. Algunos estudios han demostrado la eficacia de recubrimientos basados en la combinación de alginato de sodio y volátiles orgánicos (1-butanol, 3-metil- y alcohol fenético) para controlar la antracnosis provocada por *Colletotrichum gloeosporioides* [75]. Este tratamiento demostró ser efectivo para reducir el crecimiento del micelio en un 45 % a 25 °C y un 67 % a 6 °C. Además, en un contacto directo de *Meyerozyma caribbica* (productora de 1-butanol, 3-metil- y alcohol fenético) con el hongo se observa una inhibición en la germinación de conidios de un 97 a un 100 % a 6 y 25 °C, respectivamente. Durante el almacenamiento, este recubrimiento reduce significativamente la pérdida de peso del aguacate (2-3.7 %) [75]. Otro recubrimiento comestible a base de goma arábica (GA) y carboximetilcelulosa (CMC) mezclado con extracto

de hoja de moringa fue diseñado y evaluado para controlar la infección de *Colletotrichum gloeosporioides* en el aguacate Maluma. Este estudio reportó que el tratamiento más efectivo para reducir la pérdida de peso (3.66-6.19 %) y firmeza, así como retrasar el cambio de color y producir una inhibición del crecimiento del micelio (alrededor de un 33 %), fue aquel conteniendo extracto de moringa adicionado con 15 % de GA, 10 % de GA y 1 % de CMC [76]. En el mismo tenor, las películas a base de quitosano (1 %) que contienen aceite esencial de canela (*Cinnamomum verum*) y de tomillo (*Thymus vulgaris*) (1-1.3 %) han demostrado ser prometedoras contra la infección por *Fusarium verticillioides* y *Fusarium solani*, respectivamente [4, 9]. Además, las películas de quitosano adicionadas aceite de tomillo también mostraron un efecto inhibitorio significativo contra la infección de *Clonostachys rosea* [2], un patógeno altamente agresivo identificado en cultivos de aguacate Hass en la Sierra Nororiental del estado de Puebla. Los compuestos volátiles mayoritarios del tomillo y la canela son el timol (~ 44 %) y el (E)-cinamaldehído (45.9 %), respectivamente. La aplicación de estas películas preservó la firmeza (con una pérdida del 10-20 %) y el contenido nutracéutico del fruto de aguacate por 21 días [4, 9]. Estas cubiertas agroecológicas aplicadas en mezcla estandarizada o individualmente, permitió mantener la calidad comercial del aguacate, lo cual es deseable para mercados de exportación donde se requiere prolongar la vida de anaquel lo más posible.

Métodos químicos: etileno y otros compuestos

Existen diversas alternativas químicas para mantener la calidad de los frutos de aguacate en poscosecha [16]. El uso de fungicidas químicos agresivos para el control de enfermedades en aguacate en poscosecha ha comenzado a reemplazarse por otros más amigables con el ambiente y el consumidor. La aplicación de etileno, metil jasmonato (MeJA), metil salicilato (MeSA), entre otros, para el manejo de enfermedades poscosecha del aguacate ha ganado terreno en los últimos años. El MeJA y MeSA son derivados de las hormonas ácido jasmónico (AJ) y ácido salicílico (AS), los cuales son capaces de activar defensas en diversos órganos de las plantas y algunos frutos como el aguacate [59].

La aplicación de MeJA y MeSA en forma de vapor ($100 \mu\text{mol L}^{-1}$) ha sido efectiva para controlar la antracnosis y reducir la incidencia de *C. gloeosporioides* en el aguacate sin afectar su firmeza [77]. Tanto el MeJA como el MeSA redujeron la incidencia de antracnosis en un 41 y 43.6 %, respectivamente, superando la eficacia del prochloraz [77]. Este efecto se relacionó con una alta producción de

epicatequina, un antioxidante de la cáscara del aguacate. La acumulación de este compuesto fenólico se asocia simultáneamente al aumento de la actividad de la fenilalanina amonio liasa (PAL), quitinasa y β -1,3-glucanasa [77]. En este sentido, la aplicación de compuestos fenólicos en el aguacate para el control de la antracnosis resulta prometedora. Los ácidos cafeico y vanílico son capaces de inhibir el crecimiento y esporulación de *C. gloeosporioides* desde el tercer día post-aplicación, en porcentajes similares al prochloraz, del 99.9 % [78]. Las dosis letales medias (LD₅₀) de los ácidos cafeico y vanílico fue 567.87 mg L⁻¹. La LD₅₀ que evitó la esporulación de este hongo fue de 287.65 mg L⁻¹ para el ácido cafeico y de 289.25 mg L⁻¹ para el ácido vanílico. La aspersion de ambos compuestos (700 mg L⁻¹) en los frutos aguacates previno y controló la infección de *C. gloeosporioides* en un 50 y 60 %, respectivamente. Éstos dos compuestos deben su mecanismo de acción al inducir la biosíntesis de epicatequina en la cáscara de aguacate y mediante la actividad de las enzimas PAL, POD, quitinasa y β 1,3-glucanasa a los 5 días de su aspersion [78].

Por otro lado, el citral (compuesto volátil) demostró su potencial para controlar la pudrición peduncular causada por *L. theobromae* en aguacate (cv. Hass y Fuerte) sin comprometer su firmeza [79]. Este compuesto mostró una actividad fungicida a una concentración de 10 μ L/L al inhibir la germinación de conidios y el crecimiento micelial de *L. theobromae* después de 24, 48 y 72 h post-aplicación. El empleo del citral en forma de vapor ayudó a reducir el crecimiento del hongo en las variedades Hass y Fuerte ya infectados o de prevenir su infección. El citral redujo la incidencia del hongo en aguacate Hass y Fuerte infectado hasta en un 70 y 87 %, respectivamente, y disminuye la severidad de la infección (en un 11.6 y 16.7 %, respectivamente). En cuanto a la prevención, también se logró reducir la incidencia tanto en el aguacate Hass (19.17 %) como en el Fuerte (6.12 %). El efecto protector del citral fue similar al del prochloraz, pero no fue tan eficaz para controlar la infección de *L. theobromae* en aguacate Hass una vez iniciada [79].

La formulación de quitosano (Q) combinado con compuestos generalmente reconocidos como seguros (GRAS) como el sorbato potásico (SP), el AS, el silicato de sodio (Si) y el benzoato de sodio (Be) podrían coadyuvar al control de la mancha negra del aguacate causada por *Neofusicoccum parvum* sin afectar su calidad [80]. La aplicación directa de mezclas de quitosano con cada uno de los cuatro GRAS inhibió el crecimiento micelial, redujo la tasa de esporulación o limitó el tamaño de las esporas de *N. parvum* [80]. Las combinaciones Q+SP y Q+Si inhibieron la esporulación y decrecieron drásticamente el crecimiento de micelio (en un 96.5 y 100 %, respectivamente) [80]. Por otro lado, las

combinaciones Q+SA y Q+Be tuvieron un efecto similar sobre la esporulación, pero solo la combinación Q+Be disminuyó la talla de la espora a 3.8 μm [80]. Esta última combinación también inhibió de manera importante el crecimiento del micelio entre 87.7 y 89.4 %, respectivamente. Observaciones microscópicas revelaron que la aspersión de Q+Si y Q+SA a los aguacates redujo el diámetro del micelio, mientras que Q+Be disminuyó la producción del micelio, provocando su colapso [80]. Aunado a lo anterior, las combinaciones de quitosano y GRAS aumentaron la actividad enzimática de PAL, POD y PPO en la cáscara del aguacate [80].

El uso de bioformulaciones basadas en extractos y moléculas bacterianas han comenzado a contemplarse en el manejo de diferentes enfermedades del aguacate en poscosecha. La aplicación de extractos de *Serratia* sp. ARP5.1 para la prevención y el control de la antracnosis causada por *C. gloeosporioides* y de la pudrición de la raíz *P. cinnamomi*, se investigó bajo condiciones de empaquetado [81]. Los extractos de *Serratia* sp. ARP5.1 disminuyó significativamente el crecimiento de *C. gloeosporioides* en aguacates lesionados (0.5 cm de profundidad y 0.1 cm de diámetro) en un 63.5 (31.1 $\mu\text{g mL}^{-1}$) y 79.5 % (62.5 $\mu\text{g mL}^{-1}$). El recubrimiento de aguacates intactos con el mismo extracto (31.1 $\mu\text{g mL}^{-1}$) previno sustancialmente la infección con *C. gloeosporioides*. Por otra parte, la formulación conteniendo el extracto de *Serratia* sp. emulsificado en agua-aceite, mostró una reducción del crecimiento de *P. cinnamomi*, comparable con aquella generada por el prochloraz [81].

La aplicación de proteínas elicitoras disueltas en medios acuosos para el control de enfermedades en frutos de aguacate también está siendo intensamente evaluada [82]. La subtilisina de *Acremonium strictum* (AsES) confiere protección contra hongos que colonizan naturalmente la superficie del aguacate cv. Torres [82]. La aspersión del AsES en solución acuosa (1 mL [60 nM cm^{-1}]) en la superficie del aguacate cv. Fuerte redujo de un 94 a 82 % el tamaño de lesiones causadas por *C. gloeosporioides* y *L. theobromae* [82]. Este efecto se mantuvo hasta los 12 días posteriores a la aspersión de AsES [82]. Al tercer día posterior a la aplicación del tratamiento, la AsES provocó un incremento en la producción de etileno y la emisión de CO_2 . Altas concentraciones de etileno activaron los mecanismos de defensa del aguacate, evitando su decaimiento y conservando su calidad [82].

Remarcablemente, para el caso de los frutos de aguacate Hass se deben aplicar tratamientos térmicos a temperaturas mayores a 35 °C con el objetivo de inducir respuestas protectoras en las plantas y ayudar en la rehabilitación de los daños

celulares [5]. Sin embargo, esta alternativa debe ser canalizada con precaución debido a que puede deteriorar el sabor y el aroma del fruto [41]. En algunos estudios se observó que el almacenamiento de aguacates Hass en atmósfera controlada a temperaturas de 5 y 7 °C, ayudó a reducir las lesiones por frío siendo más eficaz el almacenamiento a 5 °C [5].

Otra alternativa relacionada, es el uso de aire forzado seco (50 % humedad relativa) aplicado a los frutos de aguacate bajo una temperatura de 38 °C durante 6 horas para mantener la calidad del fruto [83]. La aplicación de esta técnica demanda tratamientos precisos para evitar pérdida de peso y tasa de respiración o daño interno del fruto.

Conclusión

La incidencia de enfermedades causadas por hongos en *Persea americana* en poscosecha representa un desafío significativo para la producción y comercialización de aguacate Hass. Medidas inadecuadas durante el manejo y almacenamiento contribuyen a la proliferación de hongos patógenos, causando daños en la calidad del fruto y pérdidas económicas. A pesar de los mecanismos moleculares de defensa que desarrolla la planta de manera natural, estas respuestas no son suficientes para contrarrestar la acción de hongos como *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium verticillioides*. Por lo anterior, es necesario implementar estrategias integrales de manejo que combinen métodos biológicos, físicos y químicos con enfoque agroecológico. Estos incluyen el uso de aceites esenciales, luz UV-C, control de temperatura, películas biodegradables y tratamientos con vapor o etileno que han demostrado de manera independiente o combinada ser altamente efectivos para mitigar las infecciones fúngicas y mantener la calidad del fruto de aguacate. Estas estrategias no solo reducen las pérdidas poscosecha, sino que también contribuyen a minimizar el uso de fungicidas químicos tradicionales, promoviendo una producción gradualmente sostenible y amigable con el medio ambiente. Las medidas integrales basadas en la comprensión de los factores que favorecen la proliferación de hongos y los mecanismos de defensa del fruto son fundamentales para optimizar la rentabilidad y sostenibilidad del cultivo de aguacate Hass y otros cultivares, asegurando su competitividad en los mercados nacionales e internacionales.

Agradecimientos

W.A.C.P., C.A.R.D., M.R.G., Y.I.A.L., agradecen a CONAHCYT México por las becas de posgrado y posdoctorado otorgadas por CONAHCYT.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe algún tipo de conflicto de interés.

Referencias

- [1]. Pedreschi R, Uarrota V, Fuentealba C, Alvaro JE, Olmedo P, Defilippi BG, *et al.* Primary metabolism in avocado fruit. *Front Plant Sci.* 2019;10. Disponible en: <http://doi.org/10.3389/fpls.2019.00795>
- [2]. Coyotl-Pérez WA, Rubio-Rosas E, Morales-Rabanales QN, Ramírez-García SA, Pacheco-Hernández Y, Pérez-España VH, *et al.* Improving the shelf life of avocado fruit against *Clonostachys rosea* with chitosan hybrid films containing thyme essential oil. *Polymers (Basel).* 2022;14(10):2050. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/polym14102050>
- [3]. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gobierno | Gob.mx. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap>
- [4]. Coyotl-Pérez WA, Villa-Ruano N, Rubio-Rosas E. Biodegradable films with fungistatic activity for the postharvest control of *Fusarium solani* in Hass avocado fruit. *Rev Mex Fitopatol.* 2023;41(3). Disponible en: <http://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2303-4>
- [5]. Munhuweyi K, Mpai S, Sivakumar D. Extension of avocado fruit postharvest quality using non-chemical treatments. *Agronomy (Basel).* 2020;10(2):212. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/agronomy10020212>
- [6]. Leon TB, Mattos CL. Control de hongos fitopatógenos asociados a semillas de palto *Persea americana* Mill. (*Lauraceae*) *in vitro*. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria* 2021;5(3):2690–701. Disponible en: http://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.483
- [7]. Moreno-Pérez A, Zumaquero A, Martínez-Ferri E, López-Herrera C, Pliego-Alfaro F, Palomo-Ríos E, *et al.* A comparative transcriptome analysis of avocado

embryogenic lines susceptible or resistant to *Rosellinia necatrix* exudate. *Agronomy* (Basel). 2023;13(5):1354. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/agronomy13051354>

[8]. Zhang-Quan Z, Tong C, Bo-Qiang L, Guo-Zheng Q, Shi-Ping T. Molecular basis of pathogenesis of postharvest pathogenic Fungi and control strategy in fruits: progress and prospect. *Mol Horticulture*. 2021;1(1). Disponible en: <http://doi.org/10.1186/s43897-021-00004-x>

[9]. Coyotl-Pérez WA, Morales-Rabanales QN, Lozoya-Gloria E, Becerra-Martínez E, Ramírez-García SA, Mosso-González C, *et al.* Fungistatic films containing cinnamon essential oil: New coatings to preserve the nutraceutical content of avocado fruit against fusariosis. *Chem Biodivers*. 2022;19(8). Disponible en: <http://doi.org/10.1002/cbdv.202200441>

[10]. Cuéllar-Torres EA, Aguilera-Aguirre S, Hernández-Oñate MÁ, López-García UM, Vega-Arreguín J, Montalvo-González E, *et al.* Molecular aspects revealed by omics technologies related to the defense system activation in fruits in response to elicitors: A review. *Horticulturae*. 2023;9(5):558. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/horticulturae9050558>

[11]. Galindo-Tovar ME, Ogata-Aguilar N, Arzate-Fernández AM. Some aspects of avocado (*Persea americana* Mill.) diversity and domestication in Mesoamerica. *Genet Resour Crop Evol*. 2008;55(3):441–50. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s10722-007-9250-5>

[12]. Valero GT, Rodríguez AP, Ruiz ME, Ávila TJM, Varela MG. La alimentación española: características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta. 2018; 245-6. Disponible en: <https://www.sennutricion.org/es/2018/12/20/la-alimentacin-espaola-caractersticas-nutricionales-de-los-principales-alimentos-de-nuestra-dieta>

[13]. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT) 2024. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

[14]. International Trade Centre (ITC). Trade Map - Trade statistics for international business development. Copyright © 2008-2014 International Trade Centre. All Rights Reserved. Disponible en: <https://www.trademap.org/Index.aspx>

[15]. Secretaría de Economía | Gobierno | Gob.mx [Internet]. Disponible en: <https://www.gob.mx/se>



- [16]. Chávez-Magdaleno ME, Gutiérrez-Martínez P, Montaña-Leyva B, González-Estrada RR. Evaluación *in vitro* del quitosano y aceites esenciales para el control de dos especies patógenas de *Colletotrichum* aisladas de aguacate (*Persea americana* Mill). TIP. 2019;22. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.189>
- [17]. Xoca-Orozco LA, Aguilera-Aguirre S, López-García UM, Gutiérrez-Martínez P, Chacón-López A. Effect of chitosan on the *in vitro* control of *Colletotrichum* sp., and its influence on post-harvest quality in Hass avocado fruits. Revista Bio Ciencias 2018; 5(e355): 1-20. Disponible en: <https://doi.org/10.15741/revbio.05.01.13>
- [18]. Herrera-Gonzalez JA, Bautista-Baños S, Salazar-Garcia S, Gutiérrez-Martinez P. Situación actual del manejo poscosecha y de enfermedades fungosas del aguacate 'Hass' para exportación en Michoacán. Rev Mex De Cienc Agric [Internet]. 2020;11(7):1647-60. Disponible en: <http://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2402>
- [19]. Esquivel-Miguel E, Morales-García JL, Pedraza-Santos ME, Chávez-Bárceñas AT, García-Morales S, Pineda-Guillermo S. Pathogenicity, virulence and *in vitro* sensitivity of *Elsinoe perseae* (= *Sphaceloma perseae*) isolates to different fungicides. Rev Mex Fitopatol. 2023;41(3). Disponible en: <http://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2302-3>
- [20]. Morales-García JL, López-Cornejo CI, Pedraza-Santos ME, Chávez-Bárceñas AT, Esquivel-Miguel E, García-Morales S, *et al.* Morpho-molecular identification of the causal agent of avocado scab in Michoacán. Rev Mex Fitopatol. 2023;41(2). Disponible en: <http://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2302-4>
- [21]. Wanjiku EK, Waceke JW, Wanjala BW, Mbaka JN. Identification and pathogenicity of fungal pathogens associated with stem end rots of avocado fruits in Kenya. Int J Microbiol. 2020;2020:1-8. Disponible en: <http://doi.org/10.1155/2020/4063697>
- [22]. Kikot GE, Hours RA, Alconada TM. Contribution of cell wall degrading enzymes to pathogenesis of *Fusarium graminearum*: a review. J Basic Microbiol. 2009;49(3):231-41. Disponible en: <http://doi.org/10.1002/jobm.200800231>
- [23]. Gutiérrez-Sánchez A, Plasencia J, Monribot-Villanueva JL, Rodríguez-Haas JB, López-Buenfil JA, García-Ávila CJ, *et al.* Characterization of the Exo-Metabolome of the Emergent Phytopathogen *Fusarium kuroshium* sp. nov., a

Causal Agent of *Fusarium* Dieback. Toxins (Basel). 2021;13(4):268. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/toxins13040268>

[24]. Fitzell RD, Muirhead IF. Reducing post-harvest disease in Fuerte avocados by temperature management. Aust J Exp Agric. 1983;23(122):331. Disponible en: <http://doi.org/10.1071/ea9830331>

[25]. Romero-Correa MT, Villa-Gómez R, Castro-Mercado E, García-Pineda E. The avocado defense compound phenol-2,4-bis (1,1-dimethylethyl) is induced by arachidonic acid and acts via the inhibition of hydrogen peroxide production by pathogens. Physiol Mol Plant Pathol. 2014;87:32–41. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.pmpp.2014.05.003>

[26]. Van den Berg N, Swart V, Backer R, Fick A, Wienk R, Engelbrecht J, *et al.* Advances in Understanding Defense Mechanisms in *Persea americana* Against *Phytophthora cinnamomi*. Front Plant Sci. 2021;12. Disponible en: <http://doi.org/10.3389/fpls.2021.636339>

[27]. Berry AD, Sargent SA, Pereira MEC, Huber DJ. Postharvest ripening and quality of Guatemalan-West Indian avocado hybrids under simulated commercial shipping temperatures following treatment with aqueous 1-Methylcyclopropene. HortTechnology. 2015;25(1):85-9. Disponible en: <https://doi.org/10.21273/horttech.25.1.85>

[28]. Buthelezi NMD, Mafeo TP. Effect of perforated low-density polyethylene films on postharvest quality of avocado fruit. Heliyon. 2024;10(5):e27656. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27656>

[29]. Lieu MD, Phuong TV, Nguyen TTB, Dang TKT, Nguyen TH. A review of preservation approaches for extending avocado fruit shelf-life. J Agric Food Res. 2024;16(101102):101102. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101102>

[30]. Everett KR, Hallett IC, Rees-George J, Chynoweth RW, Pak HA. Avocado lenticel damage: The cause and the effect on fruit quality. Postharvest Biol Technol. 2008;48(3):383–90. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.008>

[31]. González-Gutiérrez KN, Ragazzo-Sánchez JA, Calderón-Santoyo M. Bioformulation of *Yamadazyma mexicana* LPa14 by electrospraying process: Anthracnose control and effect on postharvest quality of avocado fruit. Biol

Control. 2024;190(105449):105449. Disponible en:
<http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105449>

[32]. Herrera-González JA, Venegas-González E, Madrigal-Huendo L. Proporciones de daños mecánicos y su efecto en calidad postcosecha de aguacate 'hass'. *Rev Mex De Cienc Agric.* 2017;(19):3897–909. Disponible en:
<http://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.659>

[33]. Geremu MA, Welelaw E, Tamirat S, Kidane B. Associated fungal pathogens and causes of postharvest losses in the avocado value chain in Hossana town market, Ethiopia. *Afr J Food Agric Nutr Dev.* 2022;22(111):20646–67. Disponible en: <http://doi.org/10.18697/ajfand.111.22015>

[34]. Mazhar M, Joyce D, Hofman P, Vu N. Factors contributing to increased bruise expression in avocado (*Persea americana* M.) cv. 'Hass' fruit. *Postharvest Biol Technol.* 2018;143:58–67. Disponible en:
<http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.04.015>

[35]. Perkins ML, Usanase D, Zhang B, Joyce DC, Coates LM. Impact injury at harvest promotes body rots in 'Hass' avocado fruit upon ripening. *Horticulturae.* 2020;6(1):11. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/horticulturae6010011>

[36]. Ríos-Mesa AF, Zuluaga Gallego R, Osorio M, Ciro-Velásquez HJ, Márquez Cardozo CJ. Effect of vehicle vibration on the mechanical and sensory properties of avocado (*Persea Americana* Mill. Cv. Hass) during road transportation. *Int J Fruit Sci.* 2020;20(sup3):S1904–19. Disponible en:
<http://doi.org/10.1080/15538362.2020.1835602>

[37]. Colín-Chávez C, Virgen-Ortiz JJ, Martínez-Téllez MÁ, Avelino-Ramírez C, Gallegos-Santoyo NL, Miranda-Ackerman MA. Control of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) growth in "Hass" avocado fruit using sachets filled with oregano oil-starch-capsules. *Future Foods.* 2024;10:100394. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100394>

[38]. Nevado-Velasquez PA, Ramírez-Gil JG, García C, Castellanos DA, Lopera AA, Nonato Bezzon VD, *et al.* Synthesis and application of Ag-doped TiO₂ nanoparticles with antifungal activity and ethylene inhibition in postharvest of avocado cv. Hass. *Biocatal Agric Biotechnol.* 2023;54(102901):102901. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102901>

[39]. Correa-Pacheco ZN, Ventura-Aguilar RI, Zavaleta-Avejar L, Barrera-Necha LL, Hernández-López M, Bautista-Baños S. Anthracnose disease control and postharvest quality of Hass avocado stored in biobased PLA/PBAT/Pine essential

oil/chitosan active packaging nets. *Plants*. 2022;11(17):2278. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants11172278>

[40]. Ramírez-Gil JG, Henao-Rojas JC, Morales-Osorio JG. Postharvest diseases and disorders in avocado cv. Hass and their relationship to preharvest management practices. *Heliyon*. 2021;7(1):e05905. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05905>

[41]. Mendieta B, Olaeta JA, Pedreschi R, Undurraga P. Reduction of cold damage during cold storage of Hass avocado by a combined use of pre-conditioning and waxing. *Sci Hortic (Amsterdam)*. 2016;200:119–24. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.012>

[42]. Gidado MJ, Gunny AAN, Gopinath SCB, Ali A, Wongs-Aree C, Salleh NHM. Challenges of postharvest water loss in fruits: Mechanisms, influencing factors, and effective control strategies – A comprehensive review. *J Agric Food Res*. 2024;17(101249):101249. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101249>

[43]. Tran TKN, Phan PH, Tran TT, Nguyen VH, Duong VH, Nguyen VT. Enhancing postharvest quality and extending storage life of Booth 7 avocado (*Persea americana* Mill.) fruit through sodium nitroprusside (SNP) application during low-temperature storage. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2024;331(113120):113120. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113120>

[44]. Yuan LF, Jiang H, Liu Q-B, Jiang XL, Wei YF, Yin XT, et al. Acidic environment favors the development and pathogenicity of the grape white rot fungus *Coniella vitis*. *J Integr Agric*. 2024; Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.jia.2024.01.002>

[45]. Prusky D, Plumbley RA, Kobilier I. The relationship between antifungal diene levels and fungal inhibition during quiescent infection of unripe avocado fruits by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant Pathol*. 1991;40(1):45–52. Disponible en: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1991.tb02291.x>

[46]. Adikaram NKB, Ewing DF, Karunaratne AM, Wijeratne EMK. Antifungal compounds from immature avocado fruit peel. *Phytochemistry*. 1992;31(1):93–6. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)83013-b](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)83013-b)

[47]. Prusky D, Kobilier I, Jacoby B, Sims JJ, Midland SL. Inhibitors of avocado lipoxygenase: their possible relationship with the latency of *Colletotrichum gloeosporioides*. *Physiol Plant Pathol*. 1985;27(3):269–79. Disponible en: [http://doi.org/10.1016/0048-4059\(85\)90040-2](http://doi.org/10.1016/0048-4059(85)90040-2)



- [48]. Alkan N, Fortes AM. Insights into molecular and metabolic events associated with fruit response to post-harvest fungal pathogens. *Front Plant Sci.* 2015;6. Disponible en: <http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00889>
- [49]. Have AT, Mulder W, Visser J, van Kan JAL. The endopolygalacturonase gene *Bcpg1* is required for full virulence of *Botrytis cinerea*. *Mol Plant Microbe Interact.* 1998;11(10):1009–16. Disponible en: <http://doi.org/10.1094/mpmi.1998.11.10.1009>
- [50]. Prusky D, McEvoy JL, Leverentz B, Conway WS. Local modulation of host pH by *Colletotrichum* species as a mechanism to increase virulence. *Mol Plant Microbe Interact.* 2001;14(9):1105–13. Disponible en: <http://doi.org/10.1094/mpmi.2001.14.9.1105>
- [51]. Ojito-Ramos K, Portal O. Introducción al sistema inmune en plantas. *Biotecnología Vegetal.* 2010 ;10(1):3–19. Disponible en: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/266/html>
- [52]. Nicaise V, Roux M, Zipfel C. Recent advances in PAMP-triggered immunity against bacteria: Pattern recognition receptors watch over and raise the alarm. *Plant Physiol.* 2009;150(4):1638–47. Disponible en: <http://doi.org/10.1104/pp.109.139709>
- [53]. Beno-Moualem D, Prusky D. Early events during quiescent infection development by *Colletotrichum gloeosporioides* in unripe avocado fruits. *Phytopathology.* 2000;90(5):553-9. Disponible en: <http://doi.org/10.1094/phyto.2000.90.5.553>
- [54]. Andersen E, Ali S, Byamukama E, Yen Y, Nepal M. Disease resistance mechanisms in plants. *Genes.* 2018;9(7):339. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/genes9070339>
- [55]. Pale M, Pérez-Torres C-A, Arenas-Huertero C, Villafán E, Sánchez-Rangel D, Ibarra-Laclette E. Genome-Wide Transcriptional Response of Avocado to *Fusarium* sp. Infection. *Plants.* 2024;13(20):2886. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/plants13202886>
- [56]. Nazzaro F, Fratianni F, Coppola R, Feo VD. Essential oils and antifungal activity. *Pharmaceuticals.* 2017;10(4):86. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/ph10040086>
- [57]. Fonseca JM, Rushing J. Application of Ultraviolet Light during Postharvest Handling of Produce: Limitations and Possibilities. 2008. Disponible en:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-Ultraviolet-Light-during-Postharvest-Fonseca-Rushing/570764592c0930e1e841340a55d02b00d59bb57f>

[58]. Garcia F, Davidov-Pardo G. Recent advances in the use of edible coatings for preservation of avocados: A review. *J Food Sci.* 2021;86(1):6–15. Disponible en: <http://doi.org/10.1111/1750-3841.15540>

[59]. Rayón-Díaz E, Hernández-Montiel LG, Sánchez-Burgos JA, Zamora-Gasga VM, González-Estrada RR, Gutiérrez-Martínez P. Natural compounds and derivatives: Alternative treatments to reduce post-harvest losses in fruits. *AgriEngineering.* 2024;6(2):1022–42. Disponible en: <http://doi.org/10.3390/agriengineering6020059>

[60]. Sellamuthu PS, Mafune M, Sivakumar D, Soundy P. Thyme oil vapour and modified atmosphere packaging reduce anthracnose incidence and maintain fruit quality in avocado: Thyme oil vapour and modified atmosphere packaging in avocado. *J Sci Food Agric.* 2013;93(12):3024–31. Disponible en: <http://doi.org/10.1002/jsfa.6135>

[61]. Naeini A, Ziglari T, Shokri H, Khosravi AR. Assessment of growth-inhibiting effect of some plant essential oils on different *Fusarium* isolates. *J Mycol Med.* 2010;20(3):174–8. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.mycmed.2010.05.005>

[62]. Roselló J, Sempere F, Sanz-Berzosa I, Chiralt A, Santamarina MP. Antifungal activity and potential use of essential oils against *Fusarium culmorum* and *Fusarium verticillioides*. *J Essent Oil-Bear Plants.* 2015;18(2):359–67. Disponible en: <http://doi.org/10.1080/0972060x.2015.1010601>

[63]. Medina-Romero YM, Hernandez-Hernandez AB, Rodriguez-Monroy MA, Canales-Martínez MM. Essential oils of *Bursera morelensis* and *Lippia graveolens* for the development of a new biopesticides in postharvest control. *Sci Rep.* 2021;11(1). Disponible en: <http://doi.org/10.1038/s41598-021-99773-0>

[64]. Zaker M. Antifungal evaluation of some plant extracts in controlling *Fusarium solani*, the causal agent of potato dry rot *in vitro* and *in vivo*. *Int. J. Agric. Biosci.* 2014; 3(4): 190-195. Disponible en: <https://www.ijagbio.com/pdf-files/volume-3-no-4-2014/190-195.pdf>

[65]. Rodríguez-Castro A, Torres-Herrera S, Calleros AD-, Romero-García A, Silva-Flores M. Extractos vegetales para el control de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*; una alternativa sostenible para la agricultura.

Abanico Agroforestal. 2020 ;2(0):2020-6. Disponible en:
<https://abanicoacademico.mx/revistasabanico/index.php/abanico-agroforestal/article/view/265>

[66]. Liu Q, Chen Q, Liu H, Du Y, Jiao W, Sun F, et al. *Rhizopus stolonifer* and related control strategies in postharvest fruit: A review. *Heliyon*. 2024;10(8):e29522. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29522>

[67]. Sarkhosh A, Vargas AI, Schaffer B, Palmateer AJ, Lopez P, Soleymani A, et al. Postharvest management of anthracnose in avocado (*Persea americana* Mill.) fruit with plant-extracted oils. *Food Packag Shelf Life*. 2017;12:16-22. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.02.001>

[68]. Chávez-Magdaleno ME, González-Estrada RR, Ramos-Guerrero A, Plascencia-Jatomea M, Gutiérrez-Martínez P. Effect of pepper tree (*Schinus molle*) essential oil-loaded chitosan bio-nanocomposites on postharvest control of *Colletotrichum gloeosporioides* and quality evaluations in avocado (*Persea americana*) cv. Hass. *Food Sci Biotechnol*. 2018;27(6):1871-5. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s10068-018-0410-5>

[69]. Darapanit A, Boonyuen N, Leesutthiphonchai W, Nuankaew S, Piasai O. Identification, pathogenicity and effects of plant extracts on *Neopestalotiopsis* and *Pseudopestalotiopsis* causing fruit diseases. *Sci Rep*. 2021;11(1). Disponible en: <http://doi.org/10.1038/s41598-021-02113-5>

[70]. Osuna GJA, Nolasco GY, Herrera GJA, Guzmán MSH, Álvarez BA. Influencia del clima y rugosidad sobre la tolerancia a refrigeración del aguacate 'Hass'. *Rev Mex De Cienc Agric*. 2017;(19):3911-21. Disponible en: <http://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.660>

[71]. Burdon J, Billing D, Pidakala P. Avoiding chilling damage in 'Hass' avocado fruit by controlled atmosphere storage at higher temperature. *HortScience*. 2017;52(8):1107-10. Disponible en: <https://doi.org/10.21273/hortsci12070-17>

[72]. Siddique SS, Hardy GESJ, Bayliss KL. Cold plasma: a potential new method to manage postharvest diseases caused by fungal plant pathogens. *Plant Pathol*. 2018;67(5):1011-21. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/ppa.12825>

[73]. Siddique SS, St.J. Hardy GE, Bayliss KL. Cold plasma as a novel treatment to reduce the *in vitro* growth and germination of *Colletotrichum* species. *Plant Pathol*. 2019;68(7):1361-8. Disponible en: <http://doi.org/10.1111/ppa.13059>

- [74]. Stevens C, Khan VA, Lu JY, Wilson CL, Pusey PL, Igwegbe ECK, *et al.* Integration of ultraviolet (UV-C) light with yeast treatment for control of postharvest storage rots of fruits and vegetables. *Biol Control*. 1997;10(2):98–103. Disponible en: <http://doi.org/10.1006/bcon.1997.0551>
- [75]. Iñiguez-Moreno M, Ragazzo-Sánchez JA, Barros-Castillo JC, Sandoval-Contreras T, Calderón-Santoyo M. Sodium alginate coatings added with *Meyerozyma caribbica*: Postharvest biocontrol of *Colletotrichum gloeosporioides* in avocado (*Persea americana* Mill. cv. Hass). *Postharvest Biol Technol*. 2020;163(111123):111123. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111123>
- [76]. Kubheka SF, Tesfay SZ, Mditshwa A, Magwaza LS. Evaluating the efficacy of edible coatings incorporated with Moringa leaf extract on postharvest of 'Maluma' avocado fruit quality and its biofungicidal effect. *HortScience*. 2020;55(4):410–5. Disponible en: <http://doi.org/10.21273/hortsci14391-19>
- [77]. Glowacz M, Roets N, Sivakumar D. Control of anthracnose disease via increased activity of defence related enzymes in 'Hass' avocado fruit treated with methyl jasmonate and methyl salicylate. *Food Chem*. 2017;234:163–7. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.063>
- [78]. Osondu HAA, Akinola SA, Shoko T, Sivakumar D. Phenolic compounds suppress anthracnose decay by enhancing antifungal properties and biochemical defence responses in avocado fruit. *J Plant Pathol*. 2022;104(2):711–20. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s42161-022-01085-3>
- [79]. Obianom C, Sivakumar D. Natural plant volatiles as an alternative approach to control stem-end rot in avocado cultivars. *J Phytopathol*. 2018;166(1):1–9. Disponible en: <http://doi.org/10.1111/jph.12653>
- [80]. Herrera-González JA, Ramos-Bell S, Bautista-Baños S, Velázquez-Estrada RM, Rayón-Díaz E, Martínez-Batista E, *et al.* Chitosan and GRAS substances: An alternative for the control of *Neofusicoccum parvum in vitro*, elicitor and maintenance of the postharvest quality of avocado fruits. *Horticulturae*. 2024;10(7):687. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070687>
- [81]. Granada D, López-Lujan L, Ramírez-Restrepo S, Morales J, Peláez-Jaramillo C, Andrade G, *et al.* Bacterial extracts and bioformulates as a promising control of fruit body rot and root rot in avocado cv. Hass. *J Integr Agric*. 2020;19(3):748–58. Disponible en: [http://doi.org/10.1016/s2095-3119\(19\)62720-6](http://doi.org/10.1016/s2095-3119(19)62720-6)

[82]. Perato SM, Martínez-Zamora MG, Salazar SM, Díaz-Ricci JC. The elicitor AsES stimulates ethylene synthesis, induce ripening and enhance protection against disease naturally produced in avocado fruit. *Sci Hortic (Amsterdam)*. 2018;240:288–92. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.030>

[83]. Ornelas DJ, Yahia EM. Effects of prestorage dry and humid hot air treatments on the quality, triglycerides and tocopherol contents in 'Hass' avocado fruit. *J Food Qual*. 2004;27(2):115–26. Disponible en: <http://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2004.tb00642.x>