



Artículo de Revisión

Fitoquímicos de residuos agrícolas y agroindustriales: Una alternativa para el control de bacterias y hongos fitopatógenos

Luis Alfonso Jiménez-Ortega¹, Octavio Valdez-Baro¹, Laura A. Contreras-Angulo¹, Erick P. Gutiérrez-Grijalva¹, Karina Valencia-Sandoval², Raymundo Saúl García-Estrada¹, José Basilio Heredia^{1*}. ¹Laboratorio de Alimentos Funcionales y Nutracéuticos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, CIAD, A.C., Carretera a El Dorado Km 5.5 Col. Campo El Diez, Culiacán C. P. 80110, Sinaloa, México. ²Instituto de Ciencias Económico Administrativas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Circuito La Concepción Km 2.5, Col. San Juan Tilcuautla, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México C. P. 42160.

*Autor de correspondencia:

José Basilio Heredia
jbheredia@ciad.mx

Sección:
Edición periódica

Revisado:
22 Mayo, 2025
Aceptado:
27 Enero, 2026
Publicado:
09 Febrero, 2026

Cita:

Jiménez-Ortega LA, Valdez-Baro O, Contreras-Angulo LA, Gutiérrez-Grijalva EP, Valencia-Sandoval K, et al. 2026. Fitoquímicos de residuos agrícolas y agroindustriales: Una alternativa para el control de bacterias y hongos fitopatógenos. Revista Mexicana de Fitopatología 44(2): 112. <https://doi.org/10.18781/R.ME.X.FIT.2206-3>

RESUMEN

Justificación. El uso de pesticidas químicos ha sido generalizado durante varias décadas, demostrando ser eficaz para controlar plagas que reducen la calidad y la productividad de los cultivos. Sin embargo, debido a su naturaleza química, presentan efectos secundarios que afectan la salud del aplicador, del consumidor y del medio ambiente. Por ello, el uso de productos naturales está surgiendo como una alternativa para el control de enfermedades y plagas fitopatógenas. El objetivo de esta investigación fue revisar y analizar los efectos bactericidas y fungicidas de extractos ricos en fitoquímicos obtenidos a partir de subproductos y residuos agrícolas y agroindustriales.

Marco teórico y experimental. Se realizó una revisión bibliográfica en Scopus y Web of Science, enfocada en publicaciones en inglés y español de los últimos 10 años. Solo se consideraron publicaciones relacionadas con la extracción de fitoquímicos a partir de subproductos agrícolas y/o agroindustriales, y que investigaran su efecto contra organismos fitopatógenos. En este sentido, los principales fitoquímicos con actividad antibacteriana y antifúngica son compuestos fenólicos como los flavonoides y otros derivados. Asimismo, compuestos hidrofóbicos, como los terpenos (aceites esenciales), han demostrado potencial biocida a concentraciones similares a las comercializadas actualmente. Los principales modos y mecanismos de acción son multitarget, es decir, afectan más de una vía metabólica y de un organelo. Por ejemplo, impactan la membrana celular al insertarse en la bicapa lipídica, reducen la formación de biopelículas, disminuyen la síntesis de ergosterol y atenúan la síntesis de quitina en la pared celular.

Conclusiones y Perspectivas. Se identificaron fitoquímicos con potente actividad bactericida y fungicida, principalmente compuestos fenólicos y aceites esenciales (terpenos). Estos fitoquímicos presentaron valores de IC₅₀ y porcentajes de reducción incluso superiores a los de los controles químicos. Los subproductos agrícolas y la biomasa, que son recursos subvalorados, representan una alternativa importante para extraer fitoquímicos de alto valor agregado que pueden utilizarse en múltiples industrias, incluida la agricultura, para desarrollar biopesticidas sostenibles y no tóxicos.

Palabras clave: Productos naturales, Aceites esenciales, Antibacterianos, Antifúngicos, Química verde



JUSTIFICACIÓN

La agricultura es fundamental para la humanidad, ya que de ella se obtienen más del 80 % de los alimentos consumidos en todo el mundo. Los métodos de producción se han optimizado con el paso del tiempo, superando retos y condiciones que han hecho necesario adaptar procesos para lograr mayores rendimientos y productividad, con la finalidad de asegurar la alimentación de cada persona (FAO, 2017; Koul, 2023). En la agricultura, el uso de fitoquímicos (FQ) se ha documentado ampliamente como bioplaguicidas (De Benedetti *et al.*, 2021; Pacífico *et al.*, 2021), los cuales se han popularizado en los últimos años, debido a su efectividad, menor toxicidad y rentabilidad. Estos residuos, son fuente importante de una amplia variedad de fitoquímicos (FQ) como flavonoides, terpenos, alcaloides, saponinas, entre otros, los cuales representan gran potencial para la agricultura como potentes fungicidas y bactericidas.

México, cuenta con una superficie agrícola cosechada de más de 11 808 173.74 ha (SIAP, 2021), lo que también sugiere una producción significativa de subproductos como tallos y hojas de maíz (*Zea mays*) ricos en ácido ferúlico (Tilay *et al.*, 2008), hojas y tallos de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) ricos en flavonoides antioxidantes (Jiménez-Ortega *et al.*, 2024), y hojas de berenjena (*Solanum melongena*) abundantes en alcaloides bioactivos (Germán-Soto *et al.*, 2024), entre otros. También numerosos reportes sustentan que el contenido de fitoquímicos (FQ) en subproductos agrícolas puede ser mayor que el de los frutos, debido al estrés abiótico al que están sometidos (Anaya-Esparza *et al.*, 2021; Pacífico *et al.*, 2021).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue discutir la actividad bactericida y fungicida de FQ obtenidos a partir de subproductos agrícolas. Se describen las fuentes, los tipos y los extractos con mayor actividad; se resaltan sus ventajas y posibles aplicaciones como bioplaguicidas. Cabe mencionar que la valorización de subproductos agrícolas y agroindustriales puede coadyuvar a la generación de economías circulares que, en el futuro, puedan establecerse en el campo mexicano.

MARCO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL

La agroindustria desempeña un papel importante en la transformación y conservación de alimentos perecederos, así como en la diversificación de materias primas y de productos terminados (Sadler *et al.*, 2021). Si bien la industria agrícola y agroindustrial son fundamentales para la alimentación humana, de estas se generan grandes cantidades de desperdicios y subproductos residuales, como hojas, tallos, raíces, semillas, cáscaras, bagazos y pulpas, que en muchas ocasiones se descartan o se destinan a aplicaciones sin valor agregado. Sin embargo, estos residuos son relevantes por su contenido de FQ; además, según la pirámide de valorización de desperdicios y subproductos agroindustriales (Figura 1), la extracción de compuestos bioactivos es la actividad con mayor valor agregado (Duque-Acevedo *et al.*, 2020).

En la agricultura, el uso de FQ se ha documentado ampliamente como bioplaguicidas (De Benedetti *et al.*, 2021; Pacífico *et al.*, 2021), los cuales se han popularizado en los últimos años, debido a su efectividad, menor toxicidad y rentabilidad. Por el contrario, los plaguicidas químicos, como los organofosforados u organoclorados, si su uso es indiscriminado, pueden causar serios daños medioambientales al contaminar la tierra, el agua y el aire. También se han documentado daños a la salud de mamíferos, insectos y otras especies que habitan los ecosistemas.



Figura 1. Pirámide de valorización de biomásas y de subproductos agrícolas y agroindustriales. FQ (Fitoquímicos).

Diversos estudios sustentan los efectos tóxicos de los plaguicidas sobre la salud humana, principalmente en los aplicadores en campo, ya que normalmente no están debidamente capacitados o no cuentan con la indumentaria de protección adecuada. Si la exposición es aguda, puede causar la muerte en horas debido a la toxicidad en el cuerpo; si es crónica, puede desencadenar la aparición de enfermedades crónico-degenerativas, como el cáncer, así como problemas inmunológicos y renales, por mencionar algunos (Bapat *et al.*, 2022; Degrendele *et al.*, 2022; Dwivedi *et al.*, 2022; Vasseghian *et al.*, 2022). Sin embargo, el control químico sigue siendo el más eficiente, rentable y de rápida acción, por lo que es necesario indagar en nuevas moléculas y en fuentes sustentables y no tóxicas. Una alternativa a los productos químicos son los naturales. Estos, al ser elaborados a partir de recursos naturales (como los subproductos), y al ser aplicados en las dosis adecuadas y con las aplicaciones reguladas durante el periodo recomendado; han demostrado mayor efectividad, además de que para su obtención se pueden emplear herramientas optimizadas y disolventes seguros y no tóxicos, con la finalidad de salvaguardar la química verde y la salud humana.

Agricultura y seguridad alimentaria

Los recursos naturales, piezas clave en la producción de alimentos, se han vuelto cada vez más limitados. Por lo tanto, es necesario optimizar de manera urgente los métodos de producción y los insumos agrícolas, como los plaguicidas y otros agroquímicos, para una producción exitosa y, con ello, salvaguardar la seguridad alimentaria de cada habitante de México (FAO, 2017). México es caracterizado por su diversidad gastronómica, destacando por sus altos volúmenes de producción y rendimientos los siguientes ingredientes y materias primas: maíz grano (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), sorgo (*Sorghum spp.*), avena (*Avena sativa*), y maíz forrajero. Sin embargo, los cultivos con mayor derrama económica son el maíz, chile verde, jitomate rojo, sorgo y frijol (SIAP, 2021). Cabe mencionar que las entidades con mayor superficie agrícola cosechada durante el 2024 fueron Zacatecas, Tamaulipas, Chiapas, Jalisco y Puebla. Mientras que los estados que generaron mayor derrama económica fueron Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Sonora y Chihuahua (SIAP, 2026).

El eslogan del Día Mundial de la Alimentación de 2021, establecido por la FAO, es: “Nuestras *acciones son nuestro futuro*”. Con la generación de bioproductos obtenidos a partir del propio sistema de producción de cultivos alimenticios, se puede establecer un grado de producción sostenible, suficiente e inocua, con calidad nutricional y al alcance de todos. Es importante considerar todos estos factores para garantizar una agricultura sostenible; sin embargo, cumplir con todos estos objetivos representa un enorme reto (FAO, 2021).

Las cifras actuales indican que alrededor de 690 millones de personas en el mundo sufren hambre, lo que representa casi el 9 % de la población mundial, con tendencia a seguir aumentando (UN, 2021). La creciente población mundial es un problema que pone a prueba los sistemas agroproductivos. Se estima que para el 2030 se alcanzarán 6 910 millones de personas en países desarrollados, mientras que en países en vías de desarrollo se alcanzarán 381 millones. Para el 2050, el crecimiento de la población mundial se estima en 9 322 millones, con un crecimiento del 0.6 % por año; esto significa que se demandará 1.4 % más de alimentos agrícolas para suplir los requerimientos calóricos por día de un adulto (3 050 kcal/cápita/día). Por tanto, es necesario implementar estrategias eficientes de producción y manejo de plagas insectiles y fitopatógenas, ya que pueden causar pérdidas de hasta un 20 % del total de la producción (CIPF, 2021).

Si bien los plaguicidas químicos son útiles y eficaces para la prevención y erradicación de plagas, han presentado desde sus inicios una serie de afectaciones graves al medio ambiente y a la salud pública, además de generar resistencia en los cultivos y contaminación de mantos freáticos y del suelo, entre otras, que han sido documentadas en investigaciones. Por ello, es importante buscar alternativas eficientes que consideren el impacto ambiental y la toxicidad (Bapat *et al.*, 2022; Moustafa *et al.*, 2021; Tang y Luo, 2021).

Subproductos agroindustriales como fuente de fitoquímicos con valor agregado

Según la Base de Datos Estadísticos Corporativos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, los principales productos agrícolas producidos en el 2024 fueron caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) (1 939 782 021 t), maíz (1 218 205 574 t) y arroz (820 223 278 t) (Figura 2). Los países con mayor volumen de producción fueron China, Brasil y Estados Unidos (FAO, 2026). Estos volúmenes de producción generan cantidades importantes de subproductos, compuestos por fibras, cáscaras, semillas, bagazos, raíces, hojas, tallos y otros materiales lignocelulósicos ricos en fitoquímicos, que tienen implicaciones comerciales de alto valor agregado (Nayak y Bhushan, 2019; Teigiserova *et al.*, 2019).

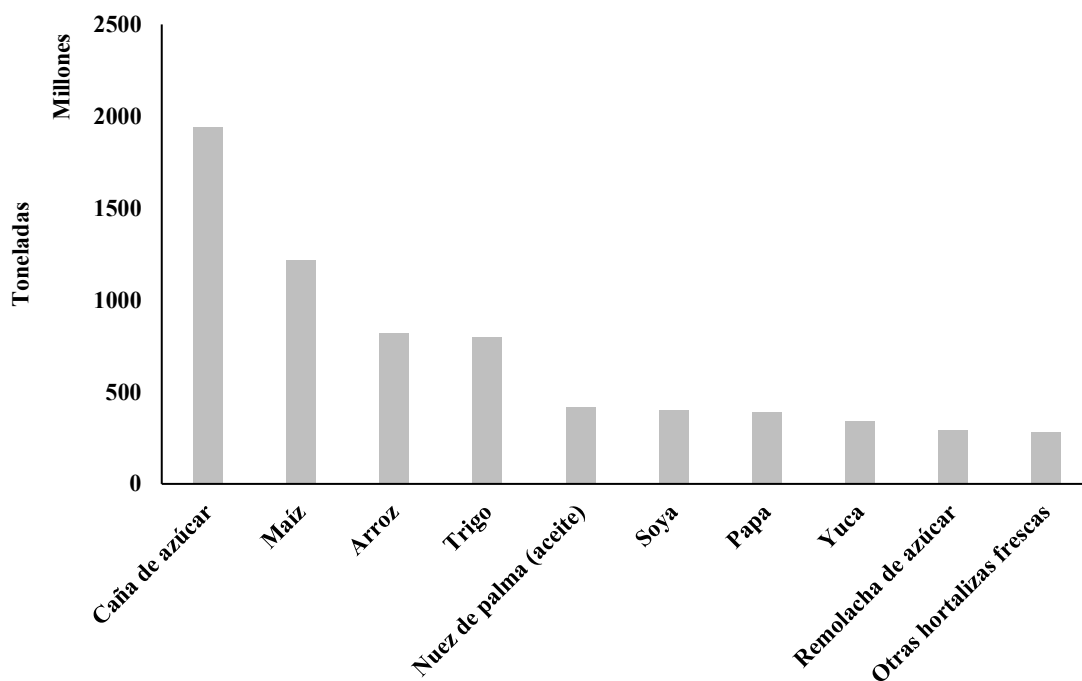


Figura 2. Cultivos de mayor producción en el mundo de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en 2024. Datos tomados de la FAO (2026).

Los FQ, derivados de subproductos agroindustriales, como bioplaguicidas, se han estudiado ampliamente y presentan una diversidad de aplicaciones (Figura 3). Por ejemplo, en la base de datos Web of Science (Clarivate) se registran al menos 931 publicaciones originales publicadas en los últimos 10 años. Sin embargo, la mayoría de ellas emplean plantas medicinales o frutos comestibles como fuente de FQ. Dentro de ellas, las plantas aromáticas (abundantes en aceites esenciales) lideran la investigación química y biológica, principalmente por su acción bactericida y antifúngica.

Por otro lado, los países líderes en investigación son Estados Unidos, China e India. Cabe mencionar que, del mismo modo, en la base de datos Web of Science solo se han reportado ≈ 588 documentos sobre la obtención de fitoquímicos a partir de subproductos agroindustriales, siendo Italia, España y Portugal los países con mayor número de publicaciones. De estos, un reducido número se enfoca en la sanidad vegetal, por lo que resulta de interés ampliar los estudios para potenciar dichos recursos en la salud de los cultivos y, en consecuencia, en la salud humana y ambiental.

En este sentido, al incorporar prácticas como esta como parte de manejo integrado de las principales plagas y enfermedades, se genera un modelo de economía circular, el cual produzca bioplaguicidas a partir de extractos crudos o metabolitos purificados de los subproductos generados por los cultivos; contribuyendo al cambio de una economía lineal a una economía circular, implementando estrategias de diferenciación que coadyuven en la competitividad del sector agrícola (Campos *et al.*, 2020; Rojas Rojas *et al.*, 2021).

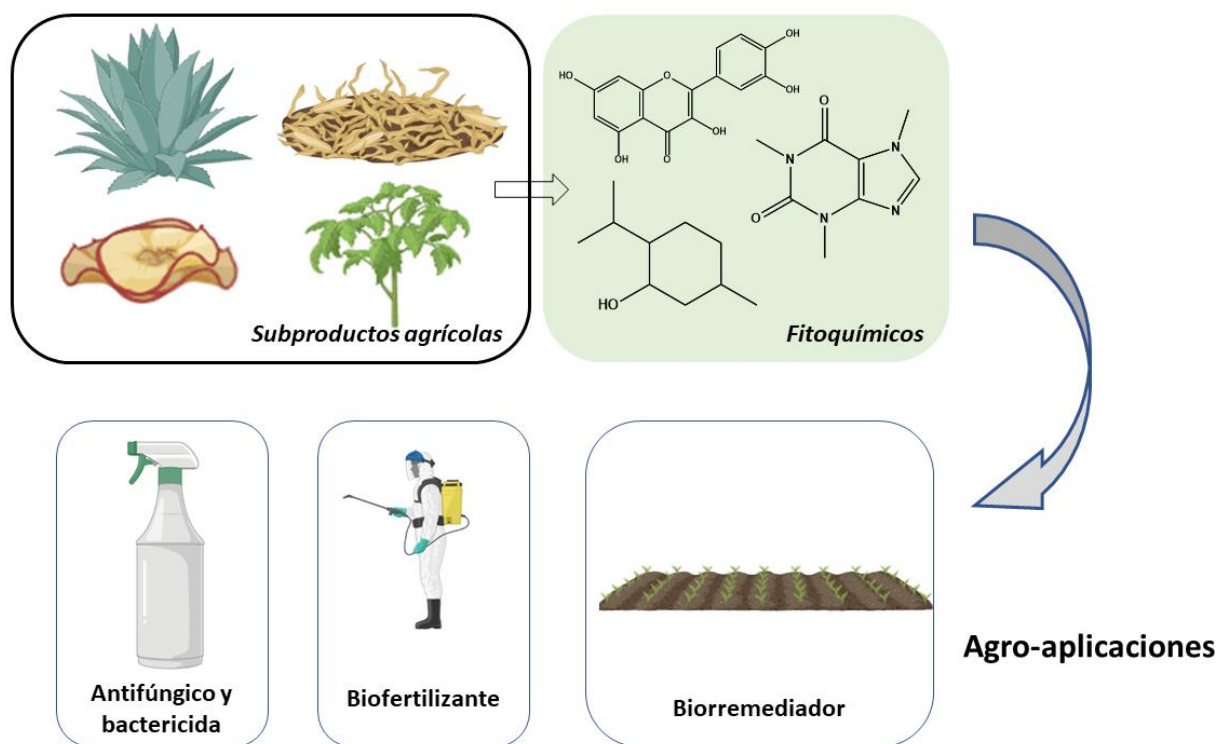


Figura 3. Aplicaciones industriales de fitoquímicos aislados a partir de subproductos agrícolas. Elaborado con BioRender.

Organismos fitopatógenos

La presencia de organismos fitopatógenos y las enfermedades que estos ocasionan pueden verse influidas por factores bióticos y abióticos durante la siembra, las etapas vegetativa y productiva, la cosecha y la poscosecha de los cultivos. Entre los bióticos destacan los hongos, bacterias, virus, protozoarios y nematodos. Sin embargo, los fitopatógenos más abundantes y de mayor interés son los hongos, virus y bacterias, responsables de la mayoría de los problemas fitosanitarios en el mundo; en consecuencia, producen la mayor pérdida económica (Ravichandra, 2013). Los géneros de bacterias asociadas a serias enfermedades que culminan en pérdidas de cultivos y de mayor relevancia económica son: *Acidovorax*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Citrobacter*, *Clavibacter*, *Dickeya*, *Erwinia*, *Leifsonia*, *Pectobacterium*, *Pseudomonas*, *Ralstonia*, *Spiroplasma*, *Xanthomonas* y *Xylella*, entre otros (Hernández-Díaz *et al.*, 2021; Setubal *et al.*, 2005).

Por otro lado, los géneros de hongos más estudiados son *Alternaria*, *Botrytis*, *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Dreschlera* (Sin. *Helminthosporium*), *Aspergillus*, *Penicillium*, *Macrophomina*, *Neofusicoccum*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Curvularia*, *Mucor*, *Botryosphaeria*, *Diplodia*, *Sclerotium* y *Phoma* (Di Canito *et al.*, 2021; Hernández-Díaz *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021). Conocer la información sobre estos agentes fitopatógenos permite estudiar y aplicar estrategias de biocontrol de forma eficiente; entre las más utilizadas se encuentra la incorporación de extractos vegetales procedentes de fuentes poco exploradas, como los subproductos agroindustriales.

Plaguicidas: problemática medioambiental y de salud pública

El manejo de plagas se basa en el principio de prevención, supresión y/o erradicación, y en cada una de ellas se pueden aplicar diferentes estrategias: biológicas, químicas, mecánicas, culturales, de manipulación genética, entre otras (Zepeda-Jazo,

2018). Entre los más usados y efectivos contra cualquier tipo de plaga se encuentran los plaguicidas químicos; sin embargo, se siguen documentando efectos secundarios tóxicos para el ser humano, la flora, la fauna y varios ecosistemas, ya que los agroquímicos pueden migrar cientos de kilómetros y afectar otras regiones (Couvidat *et al.*, 2022; Degrendele *et al.*, 2022; Ding *et al.*, 2022). Ante esto, los gobiernos se esfuerzan por crear alternativas de sustitución y de minimización de su uso. En caso contrario, respecto a la fitotoxicidad de los extractos naturales, a dosis elevadas pueden secar la planta y, si el medio es ácido, a las dosis recomendadas por los productores, no se han registrado efectos tóxicos en seres humanos y otros mamíferos (Fenibo *et al.*, 2022).

Fitoquímicos (FQ). Los FQ son metabolitos secundarios sintetizados mediante las rutas del ácido shikímico, del ácido malónico y del ácido mevalónico, y se estima que existen más de 100 000; sin embargo, los de mayor estudio, debido a sus bioactividades, son los flavonoides, terpenos, alcaloides y saponinas (Figura 4) (de la Rosa *et al.*, 2019; Khare *et al.*, 2020). La acumulación de fitoquímicos en las plantas generalmente se debe a situaciones de estrés, causadas por factores bióticos y abióticos, que desencadenan una cascada de señales bioquímicas que favorece su síntesis como mecanismo de defensa principalmente (Marranzano *et al.*, 2018). Desde la antigüedad, el ser humano ha utilizado y comercializado los FQ con fines terapéuticos para tratar una amplia variedad de patologías y dolencias. Con el avance de la tecnología y la concientización sobre el cuidado del medio ambiente, los FQ han sido objeto de estudio para demostrar su potencial biocida frente a fitopatógenos, entre otras aplicaciones, como aditivos, pigmentos y agentes antioxidantes.

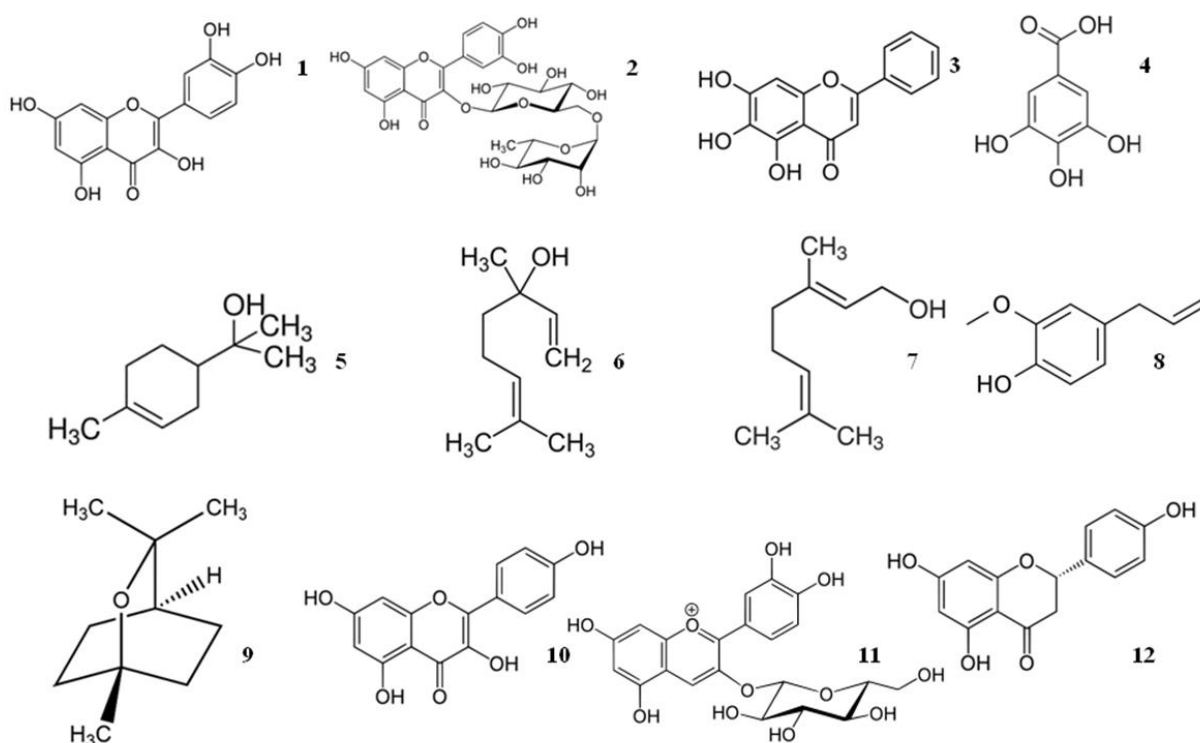


Figura 4. Estructuras moleculares de fitoquímicos antibacterianos y antifúngicos identificados en subproductos agrícolas. 1. Quercetina. 2. Rutina. 3. Baicaleína. 4. Ácido gálico. 5. Terpineol. 6. Linanool. 7. Geraniol. 8. Eugenol. 9. Eucaliptol. 10. Kaempferol. 11. Cianidina 3-O-glucósido. 12. Naringenina.

Los compuestos fenólicos pueden presentar una gran variedad de estructuras, por lo que se clasifican desde fenólicos simples hasta fenólicos muy complejos, según el número y la posición de los grupos hidroxilo unidos al anillo fenólico (Chaudhary *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2017). Dentro de este grupo de FQ se encuentran los flavonoides, ácidos fenólicos, cumarinas, ligninas y taninos. Los flavonoides son reconocidos como los más importantes y ampliamente distribuidos en las plantas, ya que se han reportado más de 5 000. Estos compuestos son de bajo peso molecular; en su estructura presentan dos anillos aromáticos de naturaleza fenólica unidos por un puente de tres átomos de carbono (C₆-C₃-C₆). Se dividen en diferentes subgrupos tales como flavonoles, flavanonas, flavonas, flavan-3-oles, isoflavonas, catequina, leucoantocianinas, chalconas y antocianinas (Lattanzio, 2013; Medina-Meza y Ganjyal, 2017; Tsao, 2010).

Por otro lado, los terpenos son compuestos orgánicos hidrofóbicos que derivan de la condensación del isopreno (hidrocarburo de cinco carbonos); pueden categorizarse en función de ello en hemiterpenos (C₅), monoterpenos (C₁₀), sesquiterpenos (C₁₅), diterpenos (C₂₀), sesterpenos (C₂₅), triterpenos (C₃₀), tetraterpenos (C₄₀) y politerpenoides (C_{>40}). Entre los tetraterpenoides se encuentran los carotenoides; el betacaroteno, en particular, es de gran relevancia, ya que es el precursor de la vitamina A. En este sentido, algunas vitaminas se consideran terpenos, como las liposolubles D y K (Pichersky y Raguso, 2018).

Métodos de extracción y purificación de fitoquímicos a partir de subproductos agrícolas y agroindustriales. Los métodos de extracción de FQ se basan en su capacidad para degradar estructuras celulares, como paredes y membranas, y, posteriormente, solubilizar los compuestos en el disolvente de extracción. Dependiendo de la hidrofiliidad o hidrofobicidad de las moléculas de interés, se usará el disolvente de polaridad similar; retomando el concepto de solubilidad: “*lo similar disuelve a lo similar*”. Por ello, la mayoría de los FQ se solubilizan en disolventes orgánicos como el etanol, el metanol o el agua. Por ejemplo, los flavonoides son extraíbles con soluciones hidroetanólicas al 70-80 %, con metanol o acetona. Mientras que los carotenoides y compuestos no polares, como las grasas y aceites, se disuelven en hexano, tolueno, cloruro de metileno, entre otros (Jiménez-Ortega *et al.*, 2024).

El método de extracción dependerá en gran medida del rendimiento y la pureza del compuesto. En la actualidad, se pueden emplear sistemas de maceración con regulación de temperatura, baños ultrasónicos, microondas, fluidos supercríticos, disolventes iónicos y eutécticos, solventes hidrogenados, entre otros. Las bondades son que, entre ellos, pueden acoplarse, lo que genera un mayor rendimiento de extracción, reduce el gasto energético y el tiempo de operación (Jiménez-Ortega *et al.*, 2024; Jiménez-Ortega *et al.*, 2023).

Una vez obtenidos los extractos crudos, se pueden purificar mediante cromatografía de columna, usando como fase estacionaria sílice y como fase móvil disolventes de polaridades crecientes, para ir eluyendo los metabolitos en fracciones de polaridades diferentes; posteriormente, se podrá evaluar el efecto de la fracción y/o seguir purificando para obtener cristales del compuesto de interés. Normalmente, se monitorea el factor de retención del compuesto mediante cromatografía en capa fina (TLC); si se obtienen cristales o precipitados, estos pueden analizarse mediante LC-MS/MS, GC-MS/MS, RMN, rayos X, FTIR, entre otras técnicas (Patil *et al.*, 2023). En la Figura 5 se muestra el protocolo experimental para la obtención de FQ a partir de subproductos agrícolas, resaltando las operaciones unitarias.

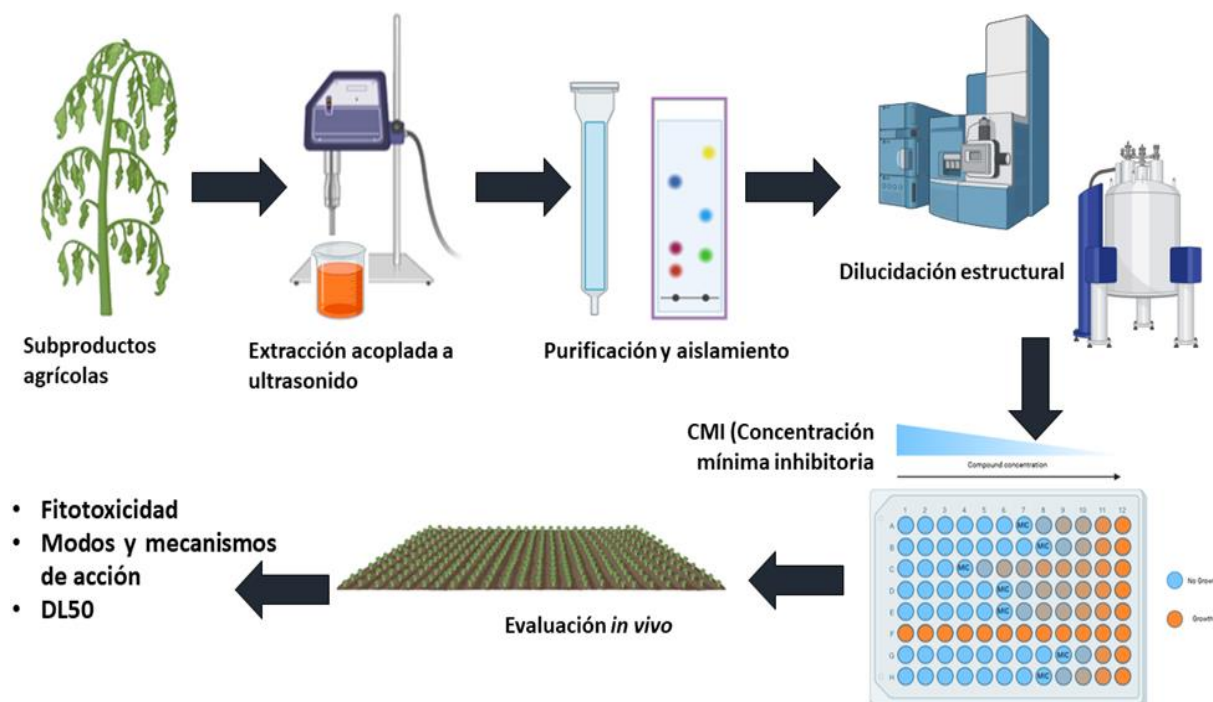


Figura 5. Proceso de obtención de fitoquímicos a partir de biomásas agrícolas y su escalamiento a escala industrial para la generación de bioplaguicidas potencialmente aplicables a los mismos cultivos. Elaborado con BioRender.

Fitoquímicos de subproductos agrícolas y agroindustriales como bioplaguicidas

Actividad antibacteriana. Dos de los mecanismos más comunes por los cuales ocurre la inhibición del crecimiento bacteriano por parte de los FQ son: 1) por daño a nivel molecular y genético o por ruptura de membranas celulares. El daño genético ocurre cuando los FQ, como los alcaloides, interactúan con las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos de las bacterias, alterando la expresión de genes encargados de la producción de flagelos y provocando una disminución de la movilidad de la bacteria, lo que conlleva un menor crecimiento y una menor capacidad de infección (Dusane *et al.*, 2014).

Por otro lado, el daño o la ruptura de la membrana celular de las bacterias se produce al interactuar con los terpenoides, que las disuelven parcial o totalmente, provocando la lisis y la muerte celular (Yang *et al.*, 2020). Los subproductos agrícolas y agroindustriales presentan FQ antibacterianos. Sin embargo, dependerá del tipo de FQ, del método de extracción, de la concentración y del tipo de bacteria, entre otros factores (Cuadro 1).

En algunos FQ presentes en hojas y tallos, los terpenos pueden causar daños irreversibles a las membranas y a las paredes celulares bacterianas, dejándolas sin la protección adecuada frente a otros agentes tóxicos para ellas. Por otro lado, los polifenoles pueden inhibir el crecimiento bacteriano al disminuir la actividad de enzimas clave implicadas en funciones biológicas (Yang *et al.*, 2020).

Algunos ejemplos sobresalientes son los de Do *et al.* (2021), quienes evaluaron la actividad antibacteriana de extractos crudos de raíces de *Scutellaria baicalensis* y de baicaleína (BAI) purificada. Los autores observaron que la bacteria *Ralstonia solanacearum* fue más susceptible a la BAI, presentando una mayor inhibición que el grupo control con cloranfenicol (CMI de 0.019 mg mL⁻¹ y 0.000044 mg mL⁻¹, respectivamente). Esto se debe a que la BAI presenta grupos hidroxilo, que podrían ser los responsables de la inhibición. Asimismo, la BAI fue más eficaz que el extracto crudo (hasta 105 veces).

Cuadro 1. Subproductos agrícolas y agroindustriales con efecto antibacteriano.

Subproducto	Extracto	Fitoquímico	Fitopatógeno	MIC	Inhibición (%)	Referencia
Raíces de escutelaria	Etanólico	Baicaleína	<i>A. avenae</i> subsp. <i>Cattlyae</i> <i>A. tumefaciens</i> <i>B. glumae</i> <i>C. michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i> <i>P. carotovora</i> subsp. <i>carotovora</i> <i>D. chrysanthemi</i> <i>P. syringae</i> pv. <i>lachrymans</i> <i>X. arboricola pruni</i> <i>P. syringae</i> pv. <i>actinidiae</i> KW11 <i>R. solanacearum</i>	19 µg mL ⁻¹	75 - 94	Do <i>et al.</i> , 2021
Dátil de palma	Acuoso	Ácido protocatecúico Tiroso Ácido vanílico Ácido <i>p</i> -cumárico Ácido siringico Ácido gálico	<i>X. campestris</i> <i>E. amylovora</i> <i>E. toletana</i> <i>C. michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i> <i>C. michiganensis</i> subsp. <i>insidiosus</i> <i>R. radiobacter</i> <i>P. savastanoi</i> <i>P. syringae</i>	3.13 mg mL ⁻¹	100	Mrabet <i>et al.</i> , 2017
Piel de granada	Acuoso	Flavonoides y taninos	<i>X. campestris</i> <i>C. michiganensis</i>	5 mg mL ⁻¹	100	Elshafie <i>et al.</i> , 2021
Pseudotallo de plátano y hojas de cempasúchil	Acuoso	α-Terpenilo Poliacetilenos Politienilos Cumarinas	<i>P. syringae</i> pv. <i>spinaciae</i> <i>P. syringae</i> pv. <i>tomato</i>	100 mg mL ⁻¹	37 - 40	Mitra y Paul, 2016
Corteza y hoja de pino y olivo	Acetona	Terpenos Cariofileno β-Cubeneno Cembreno Tunbergol	<i>A. tumefaciens</i> <i>E. carotovora</i> <i>C. fascians</i> <i>P. solanacearum</i>	0.41 mg mL ⁻¹	100	Badawy y Faraj, 2019

Actualmente, la ciencia y la tecnología desarrollan nuevos métodos que maximizan la extracción de FQ de subproductos, ya que normalmente estos se encuentran unidos a estructuras lignificadas poliméricas (en tallos y raíces), como celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que vuelve todo un desafío extraerlos. Para ello, es necesario romper la pared celular y los enlaces de tipo éster y éter entre los FQ y los polímeros, para que se disuelvan en el disolvente. Para estos casos, es necesaria la utilización de procesos ácidos y alcalinos acoplados a métodos de extracción emergentes, como ultrasonido-microondas, entre otros (Santos-Zea *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020).

Por otro lado, si los subproductos son hojas, pulpas y bagazos, se pueden extraer directamente mediante tratamientos hidrotérmicos, ya que normalmente los compuestos fenólicos y terpenos se localizan en las vacuolas y en los tricomas.

Por ejemplo, los pretratamientos térmicos pueden incrementar el rendimiento de extracción de FQ. En el dátil de palma (*Phoenix dactylifera*) se facilita la liberación de polifenoles. La temperatura de extracción tiene un papel fundamental, ya que a mayor temperatura se libera una mayor cantidad de compuestos, como el hidroximetilfurfural, y, en consecuencia, en la mayoría de los casos, se observa una mayor inhibición de fitopatógenos. Asimismo, se observó que el incremento de 140 a 160 °C disminuyó hasta en un 50 % la CMI, contra *Xanthomonas campestris*, *Erwinia amylovora*, *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *C. michiganensis* subsp. *insidiosus*, *Rhizobium radiobacter*, *Pseudomonas savastanoi* y *Pseudomonas syringae* (Mrabet *et al.*, 2017).

Adicionalmente, se ha observado que el extracto acuoso de piel de granada (*Punica granatum*), rico en flavonoides y taninos, presentó actividad contra *X. campestris* y *C. michiganensis*, con una CMI de 5 mg mL⁻¹. Dicha concentración presentó una inhibición cercana al 100 % en ambas bacterias, similar a la de los controles con kanamicina (0.05 mg mL⁻¹) y tetraciclina (0.16 mg mL⁻¹) (Elshafie *et al.*, 2021).

Cabe mencionar que extractos de pseudotallo de plátano (*Musa paradisiaca*) y de hojas de cempasúchil (*Tagetes erecta*) presentaron actividad inhibitoria *in vivo* contra *P. syringae*, lo que disminuyó la gravedad de la enfermedad en plantas de jitomate (*S. lycopersicum*), espinaca (*Spinacia oleracea*), pepino (*Cucumis sativum*) y cebada (*Hordeum vulgare*). Se observó una reducción del 38 % de la enfermedad a una concentración de 100 mg mL⁻¹. Si bien la aplicación de los extractos no disminuyó por completo la gravedad de la enfermedad, sí demostró coadyuvar al tratamiento en sinergia con otro extracto de mayor actividad (Mitra y Paul, 2016). Esto sugiere que los extractos vegetales pueden ser potenciales productos biocidas a nivel *in vivo*, por lo que se sugiere continuar la investigación sobre fitotoxicidad, dosificación y tratamientos.

Por otro lado, extractos hidrofílicos de hojas y corteza de pino (*Pinus* spp.) y olivo (*Olea europea*), mostraron ser ricos en monoterpenos, esteroides, diterpenos, sesquiterpenos, resinas y polifenoles. Los cuales presentaron actividad inhibitoria contra *Agrobacterium tumefaciens*, *Erwinia carotovora*, *Corynebacterium fascians* y *P. solanacearum*. El extracto más efectivo en todas las bacterias fue el de corteza de olivo, en el que se obtuvo la menor CMI frente a la bacteria *C. fascians* (0.41 mg mL⁻¹) (Badawy y Faraj, 2019).

Extractos de subproductos de la industria del vino, como el orujo y las semillas de uva (*Vitis vinifera*), obtenidos mediante métodos emergentes, inhibieron *P. syringae* pv. *Syringae* con una CMI > 1 mg mL⁻¹, inferior a la del control (ditianona), lo cual se debe a la presencia de antocianinas y ácidos grasos (Tacchini *et al.*, 2019).

Actividad antifúngica. La actividad antifúngica se evalúa mediante diferentes técnicas, como la inhibición de la esporulación (%), la inhibición del micelio (%), la mínima concentración inhibitoria (MCI) y la mínima concentración fungicida (MCF). Al igual que en las bacterias, el mecanismo de inhibición de los FQ en los hongos también se relaciona con la irrupción de la membrana fúngica, en la que, al disolverla o romperla, quedan expuestos los organelos internos, lo que activa una serie de rutas de muerte celular y propicia la inhibición del crecimiento. Otro mecanismo es que, una vez que los FQ traspasan la membrana fúngica, alteran negativamente la respiración celular mitocondrial, lo que ocasiona un desequilibrio metabólico y, al tener menos energía, no pueden llevar a cabo sus funciones metabólicas vitales, lo que, en consecuencia, disminuye su crecimiento y propagación. Otros mecanismos son la inhibición de las bombas de flujo, que remueven sustancias tóxicas intracelulares; la inhibición de la síntesis de proteínas y del material genético; la promoción de la disfunción mitocondrial; y la inhibición de la división celular (Al Aboody y Mickymaray, 2020; Peng *et al.*, 2012).

Subproductos agrícolas para manejo de hongos

Subproductos de la industria vinícola. Los extractos de orujo de uva son abundantes en antocianinas, polifenoles y ácidos grasos. Sin embargo, su eficacia depende del método de extracción (Mendoza *et al.*, 2013; Tacchini *et al.*, 2019). Por ejemplo, extractos de semillas de uva obtenidos mediante ultrasonido presentaron una mayor cantidad de FQ, siendo efectivos contra *Sclerotinia minor* y *S. sclerotiorum*, con una CMI >15 µg mL⁻¹ en ambos hongos (Tacchini *et al.*, 2019).

Subproductos de *Solanum lycopersicum*. Extractos hidrofílicos de hojas y tallos de jitomate presentaron inhibición *in vivo* contra *Colletotrichum coccodes*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, *Glomerella cingulata* y *Rhizoctonia solani*. El extracto de las hojas presentó inhibición contra *R. solani*, con una CMI de $< 0.31 \text{ mg mL}^{-1}$ (Kim *et al.*, 2019). Por otro lado, los extractos hidroetanólicos de hojas de jitomate fueron efectivos contra *Aspergillus niger* (CMI 0.90 mg mL^{-1}) y *Penicillium funiculosum* (CMI 0.45 mg mL^{-1}). La inhibición se debió a la presencia de flavonoides y ácidos fenólicos, abundantes en disolventes polares como el etanol. El mejor efecto observado fue contra *P. funiculosum*, con una CMI menor al ketoconazol (CMI 2.50 mg mL^{-1}) (Añibarro-Ortega *et al.*, 2020).

Subproductos de *Jatropha curcas*. Es bien sabido que *Jatropha* es una fuente relevante de grasas y aceites para diversas industrias. Uno de sus principales subproductos es la semilla, que es una estructura resiliente a los tratamientos de extracción convencionales; sin embargo, presenta FQ antifúngicos. Por ejemplo, Haq *et al.* (2021), evaluaron el extracto metanólico de semillas desgrasadas de *J. curcas* frente a *C. coccodes*, *R. solani*, *Bipolaris oryzae* y *Fusarium fujikuroi*. De los hongos evaluados, *B. oryzae* fue el más susceptible con una CMI de 1.5 mg mL^{-1} , siendo aún más eficaz que el control (anfotericina B). Esta actividad se debe a la presencia de flavonoides, que pueden intervenir en el material genético de los hongos, afectando la síntesis de proteínas de valor fisiológico y disminuyendo su crecimiento. Por otro lado, *Lasiodiplodia theobromae*, *Curvularia lunata*, *Fusarium semitectum*, *C. capsici* y *C. gloeosporioides* mostraron ser susceptibles al extracto etanólico de la semilla desgrasada de *Jatropha* con una CMI de 500 mg mL^{-1} (Saetae y Suntornsuk, 2010).

Subproductos de *Punica granatum*. La granada es un fruto altamente apreciado por los consumidores; no obstante, durante su periodo de maduración se desprenden grandes cantidades de subproductos, como hojas, orujo y cáscaras, que, por su composición, han mostrado capacidad antifúngica. Por ejemplo, la aplicación del extracto etanólico de piel de granada contra *F. oxysporum*, *A. niger*, *F. graminearum*, *F. culmorum* y *A. alternata* presentó una CMI de 0.31 mg mL^{-1} , siendo los flavonoides y taninos los responsables de la bioactividad (Hlima *et al.*, 2019). En cambio, los extractos acuosos presentaron menor actividad contra *F. oxysporum* y *P. digitatum*, con una CMI de 10 mg mL^{-1} , lo cual puede deberse a la menor capacidad de extracción del agua, que presenta una polaridad mayor que la del etanol (Elshafie *et al.*, 2021).

Otros extractos de subproductos de granada evaluados contra *P. italicum*, *B. cinerea* y *R. stolonifer* presentaron una inhibición del crecimiento micelial (ICM) en *P. italicum* del 28.46 y 42.50 % en *B. cinerea* y *R. stolonifer*. En cuanto a la inhibición de germinación de esporas (IGE), en *P. italicum* presentó inhibición del 17.86 %, mientras que en *B. cinerea* y *R. stolonifer* del 30.5 %. Referente al tipo de subproducto, hojas, semillas y cáscara presentaron una IGE de 32.16, 38.60 y 43 %, y una ICM de 17.13, 29.93 y 32.25 %, respectivamente. En cuanto a las concentraciones empleadas de 500, 1 000 y 1 500 ppm, presentaron una IGE de 40.99, 49.20 y 61.78 % y una ICM de 27.05, 33.86 y 45 %, respectivamente (Tehrani *et al.*, 2011). Por otro lado, la extracción acuosa (asistida por microondas) de piel de granada, en combinación con cáscara y semilla de aguacate, evaluada frente a *P. expansum* y *A. niger*, presentó un CMI de 25 mg mL^{-1} (Skenderidis *et al.*, 2021).

Otros subproductos. Extractos obtenidos con varios disolventes, como diclorometano, acetato de etilo, acetona y metanol, de lúpulo derivado de la industria cervecera se evaluaron contra *F. culmorum*, *F. equiseti*, *F. semitectum*, *F. oxysporum*, *P. purpurogenum*,

B. cinerea, *Mucor hiemalis* y *A. ochraceus*. Cabe mencionar que *F. culmorum* presentó la menor CMI en todos los extractos (0.5 mg mL^{-1}) (Bartmańska *et al.*, 2018).

Por otro lado, el agua residual y el sólido sin aceite derivado de la lavanda (*Lavandula angustifolia*) presentaron, en su composición, compuestos fenólicos y terpenos. Los extractos etanólicos de ambos subproductos presentaron actividad antifúngica contra *A. niger*, *A. alternata* y *P. chrysogenum*, con una CMI de $0.08 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ (agua residual) y de $0.50 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ (residuo sólido). Cabe mencionar que ambos extractos presentaron CMI inferior al del aceite esencial de lavanda ($0.75 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$), y el agua residual presentó CMI inferior al de antifúngicos sintéticos, como la caspofungina ($0.24 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$) y la kanamicina (Ciocarlan *et al.*, 2021). La investigación sugiere que el agua residual del proceso de destilación del aceite esencial tiene un amplio efecto bactericida, probablemente debido a su alto contenido de compuestos hidrofóbicos (terpenos) e hidrofílicos (flavonoides).

Semillas y hojas de papaya (*Carica papaya*) presentaron, en su composición, saponinas, flavonoides y carotenoides, los cuales demostraron ser activos contra *Fusarium* spp. y *C. gloeosporioides*. Los extractos etanólicos de hojas de papaya frente a *Fusarium* spp. presentaron una CMI de 0.625 mg mL^{-1} y $>10 \text{ mg mL}^{-1}$ en *C. gloeosporioides* (Chávez-Quintal *et al.*, 2011). Extractos de cáscaras de cítricos obtenidos mediante hidrodestilación fueron evaluados frente a *R. solani*, *C. lunata*, *F. oxysporum*, *Helminthosporium oryzae*, *A. niger*, *Cladosporium herbarum* y *Trichoderma viride*. Obteniendo la CMI más baja sobre *A. niger* ($6.25 \text{ } \mu\text{L mL}^{-1}$) (Vasudeva y Sharma, 2012). En el Cuadro 2 se presentan otros ejemplos de la actividad antifúngica de FQ de subproductos agrícolas y agroindustriales.

Sustentabilidad, toxicidad y escalabilidad de bactericidas y fungicidas a base de fitoquímicos

De acuerdo con los 12 principios de la química verde (Anastas y Eghbali, 2010), la producción de bioplaguicidas puede considerarse verde, ya que el consumo de energía es mínimo, se reduce la generación de residuos y los productos finales no son peligrosos. Así mismo los productos bio-rationales, ejercen protección contra microorganismos e insectos, y son efectivos en bajas concentraciones. Son biodegradables y no dejan residuos, en contraste con los químicos (Fenibo *et al.*, 2022). Antes de su venta en el mercado, es necesario evaluar la fitotoxicidad para sugerir dosis y vías de administración. Sin embargo, los productos bioracionales no presentan toxicidad en mamíferos cuando se aplican en las concentraciones recomendadas. Además, para su comercialización deben tramitar estrictos controles de sanidad y seguridad. La industria de productos bioracionales está en constante crecimiento. Algunos éxitos comerciales han sido Aza-Direct con azadiractina, Timorex Gold con aceite de árbol del té y Regalia MAXX con extracto de *Reyniutria sachalinensis*, entre otros.

En cuanto a su toxicidad, son moléculas con una alta DL50, pero, por ser de origen natural, no significa que no sean tóxicas. Principalmente, los FQ con perfiles de toxicidad generalmente más elevados que otros, son los aceites esenciales y alcaloides en estado puro. Incluso derivados comerciales como el spinosad, azadirachtin, tujona, pulegona, timol, mentol, entre otros, son tóxicos si se administran a altas concentraciones. El mercado de productos naturales crece cada día y se espera que la tendencia se mantenga. Por ejemplo, desde los años 90 el consumo de plaguicidas en Europa fue de 460 000 t, mientras que en Estados Unidos fue de más de 406 000 t (Rufo *et al.*, 2024). Esto sugiere un incremento constante en el sector, por lo que la rentabilidad y la escalabilidad de la producción de bioplaguicidas a base de subproductos agrícolas podrían constituir una buena opción técnico-industrial.

Cuadro 2. Subproductos agrícolas y agroindustriales con efecto antifúngico.

Subproducto	Extracto	Fitoquímico	Fitopatógeno	MIC	Inhibición (%)	Referencia
Hojas y tallos de jitomate	Hexánico, diclorometano, acetona, metanólico	Ácido linolénico Ácido cafeico	<i>C. coccodes</i> <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>Lycopersici</i> <i>G. cingulata</i> <i>R. solani</i>	<0.31 mg mL ⁻¹	51.2 - 69.8	Kim <i>et al.</i> , 2019
Aceites y extractos de semilla de <i>J. curcas</i>	Acuoso, hexánico, metanólico	Flavonoides Saponinas Taninos Esteroides Glucósidos	<i>C. coccodes</i> <i>R. solani</i> <i>B. oryzae</i> <i>F. fujikuroi</i>	1.5 mg mL ⁻¹	80	Haq <i>et al.</i> , 2021
Semillas de <i>J. curcas</i>	Etanólico	Ésteres de forbol	<i>F. oxysporum</i> <i>L. theobromae</i> <i>C. lunata</i> <i>F. semitectum</i> <i>C. capsici</i> <i>C. gloeosporioides</i>	500 mg L ⁻¹	50	Saetae y Suntornsuk, 2010
Piel de granada (<i>P. granatum</i>)	Etanólico	Flavonoides Antocianinas	<i>F. oxysporum</i> <i>A. niger</i> <i>F. graminearum</i> <i>F. culmorum</i> <i>A. alternata</i>	0.312 mg mL ⁻¹	100	Hlima <i>et al.</i> , 2019
	Acuoso	Taninos Flavonoides Polisacáridos	<i>F. oxysporum</i> <i>P. digitatum</i> <i>B. cinerea</i>	10 mg mL ⁻¹	42	Elshafie <i>et al.</i> , 2021
Lúpulo gastado	Diclorometano Acetato de etilo Acetona Metanol	Flavonoides	<i>F. culmorum</i> <i>F. equiseti</i> <i>F. semitectum</i> <i>F. oxysporum</i> <i>P. purpurogenum</i> <i>B. cinerea</i> <i>M. hiemalis</i> <i>A. ochraceus</i> <i>P. expansum</i> <i>A. niger</i>	0.5 mg mL ⁻¹	50	Bartmańska <i>et al.</i> , 2018
Cáscara y semilla de aguacate y granada	Acuoso	Procianidina Catequinas Quercetina Ácido cafeoilquinico Ácido cumárico	<i>A. niger</i> <i>A. alternata</i> <i>P. chrysogenum</i>	25 mg mL ⁻¹	100	Skenderidis <i>et al.</i> , 2021
Lavanda	Acuoso	Eucaliptol Linalool Óxido de linalool Terpin-1-en-4-ol α -terpineol	<i>A. niger</i> <i>A. alternata</i> <i>P. chrysogenum</i>	0.08 µg mL ⁻¹	100	Ciocarlan <i>et al.</i> , 2021
Cáscara, hojas y semillas de granada	Acuoso Metanólico	Punicalagina Ácido elágico	<i>P. italicum</i> <i>B. cinerea</i> <i>R. stolonifer</i>	500 ppm	40.99	Tehranifar <i>et al.</i> , 2011
Orujo de uva	Metanólico Etanólico	Ácido gálico Ácido protocatéquico Ácido vanílico, Ácido elágico, Quercetina Kaempferol Ácido <i>p</i> -cumárico Ácido siringico Epicatequina Catequina	<i>B. cinerea</i>	35.7 µg mL ⁻¹	50	Mendoza <i>et al.</i> , 2013
Orujo gastado de uva y semilla de uva	Etanólico	Antocianinas Malvidina-3-O-glucósido Delfinidina-3-O-glucósido Cianidina-3-O-glucósido	<i>S. minor</i> <i>S. sclerotiorum</i>	>15 µg mL ⁻¹	50	Tacchini <i>et al.</i> , 2019
Hojas y tallos de jitomate	Hidroetanólico	Ácido <i>p</i> -cumárico hexósido Ácido 5-O - cafeoilquinico Ácido 5- <i>p</i> -cumaroilquinico Ácido 5-O-feruloilquinico Quercetina-pentosil-rutinósido Rutina, Quercetina-dexosihexosil-hexósido Kaempferol-3-O-rutinósido	<i>P. funiculosum</i> <i>A. niger</i>	0.45 mg mL ⁻¹	100	Añibarro-Ortega <i>et al.</i> , 2020

Continuación Cuadro 2.

Subproducto	Extracto	Fitoquímico	Fitopatógeno	MIC	Inhibición (%)	Referencia
Hojas y semillas de papaya	Etanólico	Triterpenos Flavonoides Alcaloides Saponinas	<i>Fusarium</i> spp. <i>C. gloeosporioides</i>	0.625 mg mL ⁻¹	50	Chávez-Quintal <i>et al.</i> , 2011
Cáscara de cítricos	Acuoso	Alcaloides Aceites esenciales D-limoneno (+)-Linalool β-Mirceno α-Pineno Sabineno δ-3-Careno	<i>R. solani</i> <i>C. lunata</i> <i>F. oxysporum</i> <i>H. oryzae</i> <i>A. niger</i> <i>C. herbarum</i> <i>T. viride</i>	6.25 µg mL ⁻¹	100	Vasudeva y Sharma, 2012
Corteza y hoja de pino y olivo	Acetona	Terpenos Cariofileno β-Cubeneno Cembrene Tunbergol	<i>B. cinerea</i>	0.071 mg mL ⁻¹	50	Badawy y Faraj, 2019

Un proceso para minimizar los recursos y maximizar los rendimientos de extracción consiste en utilizar diseños de optimización de superficie de respuesta, que permiten generar ecuaciones cuadráticas para su análisis mediante un ANOVA y comparar los niveles de cada tratamiento, por ejemplo, temperatura, tiempo (min), relación sólido-líquido, entre otras variables de proceso. El análisis arroja la temperatura, el tiempo y la relación sólido-líquido que hipotéticamente maximizan la extracción de FQ; para comprobarlo, es necesario evaluar el rendimiento de extracción bajo estas condiciones.

Situación de los fitoquímicos en México

La mayor parte de los agroquímicos en el mercado son plaguicidas químicos de las familias organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretroides; existen algunos fabricados comercialmente, elaborados a partir de productos naturales, principalmente aceites esenciales o nutraceuticos, que han resultado ser igual o mayormente eficientes que los convencionales. Sin embargo, estos productos de origen natural pueden resultar más costosos, lo que limita su uso. Por ello, es necesario buscar nuevas fuentes rentables y disponibles de FQ, como los subproductos agrícolas y agroindustriales.

En México, los volúmenes de generación de residuos son extremadamente grandes, ya que se trata de uno de los países mayores productores de cultivos como el chile, el maíz, el aguacate, el agave y el jitomate, que generan semillas, cáscaras, fibras, hojas y tallos. Hablando en términos comerciales, su alta disponibilidad en la región puede generar ventajas competitivas. Por esta razón, con este enfoque de economía circular se busca recuperar los subproductos y, posteriormente, obtener moléculas funcionales para la agricultura (Gopinath *et al.*, 2018). Cabe mencionar que las disposiciones finales tradicionales de subproductos agrícolas (quemados agrícolas, contaminación de efluentes y de cuerpos de agua) no generan valor agregado, sino que pueden perjudicar el medio ambiente y la salud de los trabajadores (Koul, 2023). México, es uno de los países con mayor producción agrícola, por lo que puede aprovechar esta ventaja y generar nuevas industrias en las que se procesen los residuos y se aíslen y purifiquen los FQ; sin embargo, para ello es necesario que el sector científico del país promueva, evalúe y divulgue la información, con la finalidad de llamar la atención del sector privado y realizar la transferencia de tecnología correspondiente para la generación de productos bioracionales.

Sin duda, los FQ, extraídos de fuentes naturales, como los residuos agrícolas y agroindustriales, pueden llegar a ser fuentes sostenibles y optimizables. Por lo que se recomienda seguir indagando en nuevos recursos agrícolas, como cáscaras y semillas, ricos en compuestos fenólicos, principalmente flavonoides, y en terpenos, cuyos usos como

potenciales biofungicidas y biobactericidas han sido sugeridos por diversas investigaciones, y que permiten dilucidar aplicaciones comerciales (Duque-Acevedo *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El análisis de la literatura evidencia que los subproductos agrícolas y agroindustriales constituyen una fuente abundante, diversa y aún subexplotada de fitoquímicos con actividad bactericida y fungicida frente a organismos fitopatógenos de relevancia agrícola. En particular, los compuestos fenólicos —principalmente flavonoides y ácidos fenólicos—, así como los terpenos y los aceites esenciales, han demostrado múltiples mecanismos de acción eficaces, incluyendo la alteración de las membranas celulares, la inhibición enzimática y la interferencia con procesos metabólicos esenciales en bacterias y hongos. En numerosos casos, estos metabolitos presentan concentraciones inhibitorias comparables o incluso superiores a las de plaguicidas químicos convencionales, lo que confirma su potencial tecnológico e industrial.

Desde una perspectiva de frontera del conocimiento, la valorización de residuos agrícolas mediante la obtención de fitoquímicos se alinea con los principios de la economía circular y la química verde, ofreciendo una estrategia dual que permite, por un lado, mitigar el impacto ambiental asociado a la disposición inadecuada de subproductos y, por otro, generar insumos bioracionales con valor agregado para la agricultura sostenible. Las tendencias actuales apuntan al uso de métodos de extracción más eficientes y sostenibles —como ultrasonido, microondas, fluidos supercríticos y disolventes eutécticos naturales— así como al diseño de procesos optimizados mediante metodologías estadísticas, lo que representa una línea de investigación con alto potencial de desarrollo tecnológico.

No obstante, persisten áreas aún poco estudiadas que requieren atención. Entre ellas destacan la evaluación sistemática de efectos sinérgicos o cooperativos entre fitoquímicos presentes en extractos complejos, la elucidación detallada de relaciones estructura–actividad y la validación de la eficacia biocida en condiciones *in vivo* y a escala de invernadero o de campo. Asimismo, la integración de análisis de sustentabilidad, toxicidad y escalabilidad industrial sigue siendo limitada en muchos estudios, lo que dificulta la transición de estos sistemas del laboratorio a aplicaciones comerciales. En este contexto, futuras investigaciones deberán enfocarse en cerrar estas brechas, consolidando los fitoquímicos derivados de subproductos agrícolas como alternativas viables, seguras y competitivas para el manejo integrado de plagas en el campo mexicano.

Limitaciones. El presente manuscrito de revisión presenta ciertas limitaciones inherentes al marco metodológico adoptado. En primer lugar, la revisión se restringió a publicaciones indexadas en bases de datos científicas de acceso académico, lo que pudo excluir información relevante contenida en reportes técnicos, patentes, tesis, documentos de carácter industrial no disponibles públicamente. Asimismo, el período temporal considerado, aunque suficiente para identificar tendencias recientes, puede haber limitado la inclusión de estudios pioneros o de desarrollos tecnológicos muy recientes aún no indexados.

Conflicto de interés. Los autores declaran que no hay conflicto de intereses en la realización de este trabajo.

Financiamiento. No se obtuvo financiamiento para la elaboración de este manuscrito.

Agradecimientos. Luis Alfonso Jiménez-Ortega agradece a la SECIHTI por el apoyo económico brindado para estudios de posgrado, CVU: 942432.

Contribución de los autores. LAJO: Concepción y visualización del estudio, preparación, revisión y edición del manuscrito. OVB: preparación del manuscrito. LACG: preparación del manuscrito. EPGG: preparación del manuscrito. KVS: preparación del manuscrito. RSGE: Concepción y visualización del estudio, revisión y edición del manuscrito. JBH: Concepción y visualización del estudio, revisión y edición del manuscrito.

REFERENCIAS

- Al Aboody MS and Mickymaray S. 2020. Anti-Fungal Efficacy and Mechanisms of Flavonoids. *Antibiotics*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/antibiotics9020045>
- Anastas P and Eghbali N. 2010. Green Chemistry: Principles and Practice. *Chemical Society Reviews* 39(1): 301-312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Anaya-Esparza LM, de la Mora ZV, Vázquez-Paulino O, Ascencio F and Villarruel-López A. 2021. Bell peppers (*Capsicum annum* L.) losses and wastes: Source for food and pharmaceutical applications. *Molecules* 26(17). <https://doi.org/10.3390/molecules26175341>
- Añibarro-Ortega M, Pinela J, Ćirić A, Martins V, Rocha F, *et al.* 2020. Valorization of table tomato crop by-products: Phenolic profiles and in vitro antioxidant and antimicrobial activities. *Food and Bioprocess Technology* 124: 307-319. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.006>
- Badawy M and Faraj H. 2019. Chemical composition and activity of bark and leaf extracts of *Pinus halepensis* and *olea europaea* grown in al-jabel al-akhdar region, libya against some plant phytopathogens. *Journal of Applied Biotechnology and Bioengineering* 3(3): 331-342.
- Bapat MS, Singh H, Shukla SK, Singh PP, Vo DVN, *et al.* 2022. Evaluating green silver nanoparticles as prospective biopesticides: An environmental standpoint. *Chemosphere* 286. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131761>
- Bartmańska A, Walecka-Zacharska E, Tronina T, Popłoński J, Sordon S, *et al.* 2018. Antimicrobial properties of spent hops extracts, flavonoids isolated therefrom, and their derivatives. *Molecules* 23(8). <https://doi.org/10.3390/molecules23082059>
- Campos DA, Gómez-García R, Vilas-Boas AA, Madureira AR and Pintado MM. 2020. Management of fruit industrial by-products—a case study on circular economy approach. *Molecules* 25(2). <https://doi.org/10.3390/molecules25020320>
- Chaudhary P, Sharma A, Singh B and Nagpal AK. 2018. Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology* 55(8): 2833-2849. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>
- Chávez-Quintal P, González-Flores T, Rodríguez-Buenfil I and Gallegos-Tintoré S. 2011. Antifungal activity in ethanolic extracts of *Carica papaya*. cv. maradol leaves and seeds. *Indian Journal of Microbiology* 51(1): 54-60. <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0086-5>
- Ciocarlan A, Lupascu L, Aricu A, Dragalin I, Popescu V, *et al.* 2021. Chemical composition and assessment of antimicrobial activity of *Lavender* essential oil and some by-products. *Plants* 10(9): 1829. <https://doi.org/10.3390/plants10091829>
- CIPF Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. 2021. Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas (Vol. 1). Available online: <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb4769es>. Consulta, marzo 2025.
- Couvidat F, Bedos C, Gagnaire N, Carra M, Ruelle B, *et al.* 2022. Simulating the impact of volatilization on atmospheric concentrations of pesticides with the 3D chemistry-transport model CHIMERE: Method development and application to S-metolachlor and folpet. *Journal of Hazardous Materials* 424, 127497. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127497>
- De Benedetti S, Girlando V, Pasquali M and Scarafoni A. 2021. Valorization of okara by enzymatic production of anti-fungal compounds for plant protection. *Molecules* 26(16). <https://doi.org/10.3390/molecules26164858>
- de la Rosa LA, Moreno-Escamilla JO, Rodrigo-García J and Alvarez-Parrilla E. 2019. Chapter 12 - Phenolic Compounds. *In*: E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables* (pp. 253-271). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00012-9>
- Degrendele C, Klánová J, Prokeš R, Příbylová P, Šenk P, *et al.* 2022. Current use pesticides in soil and air from two agricultural sites in South Africa: Implications for environmental fate and human exposure. *Science of The Total Environment* 807, 150455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150455>
- Di Canito A, Mateo-Vargas MA, Mazziere M, Cantoral J, Foschino R, *et al.* 2021. The role of yeasts as biocontrol agents for pathogenic fungi on postharvest grapes: A review. *Foods* 10(7). <https://doi.org/10.3390/foods10071650>
- Ding Y, Huang H, Chen W, Zhang Y, Chen W, *et al.* 2022. Background levels of OCPs, PCBs, and PAHs in soils from the eastern Pamirs, China, an alpine region influenced by westerly atmospheric transport. *Journal of Environmental Sciences* 115: 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.022>
- Do HTT, Nguyen TH, Nghiem TD, Nguyen HT, Choi GJ, *et al.* 2021. Phytochemical constituents and extracts of the roots of *Scutellaria baicalensis* exhibit in vitro and in vivo control efficacy against various phytopathogenic microorganisms. *South African Journal of Botany* 142: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.034>

- Duque-Acevedo M, Belmonte-Ureña LJ, Cortés-García FJ and Camacho-Ferre F. 2020. Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation* 22, e00902. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902>
- Dusane DH, Hosseini Doust Z, Asadishad B and Tufenkji N. 2014. Alkaloids modulate motility, biofilm formation and antibiotic susceptibility of uropathogenic *Escherichia coli*. *PLoS One* 9(11): e112093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112093>
- Dwivedi N, Mahdi AA, Deo S, Ahmad MK and Kumar D. 2022. Assessment of genotoxicity and oxidative stress in pregnant women contaminated to organochlorine pesticides and its correlation with pregnancy outcome. *Environmental Research* 204, 112010. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112010>
- Elshafie HS, Caputo L, De Martino L, Sakr SH, De Feo V, *et al.* 2021. Study of bio-pharmaceutical and antimicrobial properties of pomegranate *Punica granatum* L.) leathery exocarp extract. *Plants* 10(1): 153. <https://doi.org/10.3390/plants10010153>
- FAO. 2017. La alimentación y la agricultura. Available online: <https://www.fao.org/3/i7454s/i7454s.pdf> (Consulta: marzo, 2025).
- FAO. 2026. FAOSTAT Statistical Database. Available online: <https://www.fao.org/faostat/es/#data> (Consulta: enero, 2026).
- FAO. 2021. Llegó el día Mundial de la Alimentación: Nutras acciones son nuestro futuro. Available online: <https://www.fao.org/mexico/noticias/detail-events/en/c/1444449/> (Consulta: marzo, 2025).
- Fenibo EO, Ijoma GN, Nurmahomed W and Matambo T. 2022. The potential and green chemistry attributes of biopesticides for sustainable agriculture. *Sustainability* 14(21). <https://doi.org/10.3390/su142114417>
- Germán-Soto BG, Heredia JB, Leyva-López N, Gutiérrez-Grijalva EP, García-Carrasco M, *et al.* 2024. Bioaccessibility and antioxidant capacity of alkaloids from microencapsulated extract of eggplant (*Solanum melongena* L.) Biomass. *Horticulturae* 10(12). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121242>
- Gopinath A, Bahurudeen A, Appari S and Nanthagopalan P. 2018. A circular framework for the valorization of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. *Journal of Cleaner Production* 203: 89-108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252>
- Haq A, Mushtaq S, Khan A, Islam A, Khan H, *et al.* 2021. Evaluation of phytochemical, bioactive, and antifungal potential of *Jatropha curcas* seed oil and de-oiled seed cake extracts against phytopathogenic fungi. *Journal of Plant Pathology* 103(3): 863-873. <https://doi.org/10.1007/s42161-021-00864-8>
- Hernández-Díaz JA, Garza-García JJ, Zamudio-Ojeda A, León-Morales JM, López-Velázquez JC, *et al.* 2021. Plant-mediated synthesis of nanoparticles and their antimicrobial activity against phytopathogens. *Journal of Food Science and Agriculture* 101(4): 1270-1287. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10767>
- Hlima HB, Bohli T, Kraiem M, Ouederni A, Mellouli L, *et al.* 2019. Combined effect of *Spirulina Platensis* and *Punica Granatum* peel extracts: phytochemical content and antipathogenic activity. *Applied sciences* 9(24): 5475. <https://doi.org/10.3390/app9245475>
- Jiménez-Ortega LA, Bastidas-Bastidas PdJ, Angulo-Escalante MA, Mota-Morales JD and Heredia JB. 2024. Optimized extraction of glycosylated flavonoids from pepper (*Capsicum annum* L.) agricultural biomass residues through ultrasonic pulse-assisted natural deep eutectic solvents. *ACS Sustainable Resource Management* 1(1): 165-177. <https://doi.org/10.1021/acssusresmg.3c00001>
- Jiménez-Ortega LA, Kumar-Patra J, Kerry RG, Das G, Mota-Morales JD, *et al.* 2024. Synergistic antioxidant activity in deep eutectic solvents: extracting and enhancing natural products. *ACS Food Science y Technology* 4(12): 2776-2798. <https://doi.org/10.1021/acsfscitech.4c00488>
- Jiménez-Ortega LA, Mota-Morales JD, Contreras-Angulo LA and Heredia JB. 2023. Sustainable Extraction of Flavonoids from Agricultural Biomass and Agro-industrial By-products: Natural Deep Eutectic Solvent Synthesis, Extraction, and Chromatographic Analysis. In: CN Aguilar Gonzalez, R Gómez-García y M Kuddus (Eds.), *Food Waste Conversion* (pp. 67-78). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3303-8_4
- Khare S, Singh NB, Singh A, Hussain I, Niharika K, *et al.* 2020. Plant secondary metabolites synthesis and their regulations under biotic and abiotic constraints. *Journal of Plant Biology* 63(3): 203-216. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09245-7>
- Kim DS, Kwack Y, Lee JH and Chun C. 2019. Antimicrobial activity of various parts of tomato plants varied with different solvent extracts. *Plant Pathology* 35(2): 149-155. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.07.2018.0132>
- Koul O. 2023. Chapter 1 - Biopesticides: Commercial Opportunities and Challenges. In: O Koul (Ed.), *Development and Commercialization of Biopesticides* (pp. 1-23). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95290-3.00009-1>
- Lattanzio V. 2013. Phenolic Compounds: Introduction. In: KG. Ramawat y JM. Méricillon (Eds.), *Natural Products*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6_57
- Marranzano M, Rosa RL, Malaguarnera M, Palmeri R, Tessitori M, *et al.* 2018. Polyphenols: Plant sources and food industry applications. *Current Pharmaceutical Design* 24(35), 4125-4130. <https://doi.org/10.2174/1381612824666181106091303>
- Medina-Meza G and Ganjyal G. 2017. Fruit Processing By-Products: A Rich Source for Bioactive Compounds and Value Added Products. In: AK. Anal (Ed.), *Food Processing By-Products and their Utilization* (pp. 11-26). John Wiley y Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118432921.ch2>
- Mendoza L, Yañez K, Vivanco M, Melo R and Cotoras M. 2013. Characterization of extracts from winery by-products with antifungal activity against *Botrytis cinerea*. *Industrial Crops and Products* 43: 360-364. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.048>
- Mitra J and Paul P. 2016. A potent biocide formulation inducing SAR in plants. *Journal of Plant Diseases and Protection* 124. <https://doi.org/10.1007/s41348-016-0067-3>

- Moustafa MAM, Awad M, Amer A, Hassan NN, Ibrahim EDS, *et al.* 2021. Insecticidal activity of lemongrass essential oil as an eco-friendly agent against the black cutworm *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae). *Insects* 12(8). <https://doi.org/10.3390/insects12080737>
- Mrabet A, García-Borrego A, Jiménez-Araujo A, Fernández-Bolaños J, Sindic M, *et al.* 2017. Phenolic extracts obtained from thermally treated secondary varieties of dates: Antimicrobial and antioxidant properties. *LWT - Food Science and Technology* 79: 416-422. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.064>
- Nayak A and Bhushan B. 2019. An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management* 233: 352-370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.041>
- Pacifico D, Lanzanova C, Pagnotta E, Bassolino L, Mastrangelo AM, *et al.* 2021. Sustainable use of bioactive compounds from *Solanum tuberosum* and Brassicaceae wastes and by-products for crop protection—A review. *Molecules* 26(8). <https://doi.org/10.3390/molecules26082174>
- Patil RH, Patil MP and Maheshwari VL. 2023. Extraction and Isolation of Secondary Metabolites from Apocynaceae Plants. *In*: R. H. Patil, M. P. Patil, y V. L. Maheshwari (Eds.), *Apocynaceae Plants: Ethnobotany, Phytochemistry, Bioactivity and Biotechnological Advances* (pp. 37-50). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5406-3_4
- Peng L, Yang S, Cheng YJ, Chen F, Pan S, *et al.* 2012. Antifungal activity and action mode of pinocembrin from propolis against *Penicillium italicum*. *Food Science and Biotechnology* 21(6): 1533-1539. <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0204-0>
- Pichersky E and Raguso RA. 2018. Why do plants produce so many terpenoid compounds?. *New Phytologist* 220(3): 692-702. <https://doi.org/10.1111/nph.14178>
- Ravichandra NG. 2013. Fundamentals of plant pathology. Available online: <https://books.google.com.mx/books?id=TvsWPMcW-fsC> (accessed on 21/03/2025).
- Rojas-Rojas MM, Valencia-Sandoval K, Ybarra-Moncada MC and Brambila-Paz JdJ. 2021. Competitiveness and innovation in the pulquera industry, an economic analysis. *Nova Scientia* 13(26). <https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2810>
- Rufo E, Brouwer R and van Beukering P. 2024. The social costs of pesticides: a meta-analysis of the experimental and stated preference literature. *Scientific Reports* 14(1): 31905. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83298-3>
- Sadler CR, Grassby T, Hart K, Raats M, Sokolović M and Timotijević L. 2021. Processed food classification: Conceptualization and challenges. *Trends in Food Science and Technology* 112: 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.059>
- Saetae D and Suntornsuk W. 2010. Antifungal activities of ethanolic extract from *Jatropha curcas* seed cake. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 20(2): 319-324. <https://doi.org/10.4014/jmb.0905.05035>
- Santos-Zea L, Vilella-Castrejón J and Gutiérrez-Urbe JA. 2018. Bound Phenolics in Foods. *In*: JM Mérillon y KG Ramawat (Eds.). *Bioactive Molecules in Food* (pp. 1-18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54528-8_13-1
- Setubal JC, Moreira LM and da Silva ACR. 2005. Bacterial phytopathogens and genome science. *Current Opinion in Microbiology* 8(5): 595-600. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2005.08.015>
- SIAP. 2026. Cierre de la producción agrícola. Available online: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/s> (Consulta: enero, 2026).
- Singh B, Singh JP, Kaur A and Singh N. 2017. Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: A review. *Food Research International* 101: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.026>
- Skenderidis P, Leontopoulos S, Petrotos K, Mitsagga C and Giavasis I. 2021. The *in vitro* and *in vivo* synergistic antimicrobial activity assessment of vacuum microwave assisted aqueous extracts from pomegranate and avocado fruit peels and avocado seeds based on a mixtures design model. *Plants* 10(9): 1757. <https://doi.org/10.3390/plants10091757>
- Tacchini M, Burlini I, Bernardi T, De Risi C, Massi A, *et al.* 2019. Chemical characterization, antioxidant and antimicrobial screening for the revaluation of wine supply chain by-products oriented to circular economy. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 153(6): 809-816. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1549614>
- Tang L and Luo X. 2021. Can agricultural insurance encourage farmers to apply biological pesticides? Evidence from rural China. *Food Policy* 105: 102174. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102174>
- Tehrani A, Selahvarzi Y, Kharrazi M and Bakhsh VJ. 2011. High potential of agro-industrial by-products of pomegranate (*Punica granatum* L.) as the powerful antifungal and antioxidant substances. *Industrial Crops and Products* 34(3): 1523-1527. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.05.007>
- Teigiserova DA, Hamelin L and Thomsen M. 2019. Review of high-value food waste and food residues biorefineries with focus on unavoidable wastes from processing. *Resources, Conservation and Recycling* 149: 413-426. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.003>
- Tilay A, Bule M, Kishenkumar J and Annapure U. 2008. Preparation of ferulic acid from agricultural wastes: its improved extraction and purification. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(17): 7644-7648. <https://doi.org/10.1021/jf801536t>
- Tsao R. 2010. Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients* 2(12): 1231-1246. <https://doi.org/10.3390/nu2121231>
- UN. 2021. Sustainable development Goals. Zero Hunger. Available online <https://www.un.org/sustainabledevelopment/hunger/>. Consulta, marzo 2025.
- Vasseghian Y, Almomani F, Le VT, Moradi M and Dragoi EN. 2022. Decontamination of toxic Malathion pesticide in aqueous solutions by Fenton-based processes: Degradation pathway, toxicity assessment and health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 423: 127016. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127016>

- Vasudeva N and Sharma T. 2012. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of *Citrus limettioides* Tanaka. Journal of Pharmaceutical Technology and Drug Research 1(1). <https://doi.org/10.7243/2050-120X-1-2>
- Wang Z, Li S, Ge S and Lin S. 2020. Review of distribution, extraction methods, and health benefits of bound phenolics in food plants. Journal of Agricultural and Food Chemistry 68(11): 3330-3343. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06574>
- Xu D, Xue M, Shen Z, Jia X, Hou X, *et al.* 2021. Phytotoxic secondary metabolites from fungi. Toxins 13(4). <https://doi.org/10.3390/toxins13040261>
- Yang MT, Kuo TF, Chung KF, Liang YC, Yang CW, *et al.* 2020. Authentication, phytochemical characterization and anti-bacterial activity of two *Artemisia* species. Food Chemistry 333: 127458. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127458>
- Zepeda-Jazo I. 2018. Manejo sustentable de plagas agrícolas en México. Agricultura, sociedad y desarrollo 15: 99-108. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&id=S1870-54722018000100099&ynrm=iso