

Resiliencia de los productores de café en Pluma Hidalgo, Oaxaca ante la roya: transformando residuos en nuevas oportunidades a través de la ciencia

Coffee farmers resilience in Pluma Hidalgo, Oaxaca in the face of coffee leaf rust: transforming waste into new opportunities through science

Anahí Cárdenas¹, Luis Mojica¹, Luis Jorge Coronado-Cáceres¹, Ever Sánchez Osorio² y Gustavo Castillo Herrera^{1*}

¹ Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino al Arenero #1227, Col. El Bajío Arenal, 45019 Zapopan, Jalisco, México.

² Investigador por México, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación / Instituto de Investigaciones Sociológicas de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (IISUABJO).

*Autor de correspondencia: Gustavo Castillo, gcastillo@ciatej.mx

Palabras clave:

Hemileia vastatrix, roya del café, café mexicano, ácido clorogénico, cafeína

Keywords:

Hemileia vastatrix, coffee leaf rust, mexican coffee, chlorogenic acid, caffeine

Resumen

La roya (*Hemileia vastatrix*) es la principal plaga que afecta la producción de café. El café de Pluma Hidalgo, Oaxaca, es uno de los más reconocidos en el mundo; sin embargo, su cultivo está amenazado por esta plaga y las soluciones son limitadas por las exigencias de su denominación de origen “Pluma”. Buscando revalorizar el desperdicio que se genera por la roya, este trabajo plantea como estrategia comparar el contenido de dos compuestos bioactivos —el ácido clorogénico y la cafeína— en extractos de granos sanos e infectados con roya. Se encontró que la cantidad de ácido clorogénico es significativamente mayor en los granos infectados aumentando 52.9%; sin embargo, la cafeína disminuye del 30-40% en los granos infectados. Ambos hallazgos son determinantes para alentar un estudio más profundo del papel de la roya en la producción de compuestos bioactivos con aplicaciones en la industria, beneficiando a los caficultores.

Abstract

Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) is the main pest affecting coffee production worldwide. Pluma Hidalgo's coffee, from the state of Oaxaca, is one of the most recognized globally. However, this pest threatens its cultivation, and the solutions are limited due to the demands imposed by its “Pluma” designation of origin, which was established to boost the economy and recognition of the region. Therefore, looking for an option to valorize waste generated by coffee leaf rust, this study compares the content of two bioactive components, chlorogenic acid and caffeine, in healthy and infected green coffee beans. Results show that chlorogenic acid is significantly higher in infected beans than in their healthy counterpart, increasing by 52.9%. However, caffeine content decreases by 30-40% in infected beans. Both findings encourage further investigation into the role of coffee rust in the bioactive compounds of coffee, which have applications in the industry and benefit coffee farmers.

Recibido: 03 de marzo 2025
Revisado: 15 de mayo 2025
Aceptado: 21 de mayo 2025
Publicado: 21 de julio 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

El café es una planta perteneciente a la familia *Rubiaceae*, género *Coffea*. Es el segundo producto más comercializado en el mundo, específicamente las especies *Coffea canephora* y *Coffea arabica* (Wang et al., 2024). En 1874 el café fue introducido al estado de Oaxaca. El fruto se llevó al Cerro de la Pluma en donde posteriormente se fundó el pueblo de Pluma Hidalgo en 1880 (Soto et al., 2017). En 1892 la región era la principal zona cafetalera del país (Flores & Alonzo González, 2017). Su ubicación, en el complejo de la Sierra Madre del Sur, así como su altura, clima, vegetación e hidrografía (Figura 1), contribuyeron para crear una de las variedades más reconocidas en México, el café “Pluma” (Soto et al., 2017).



Figura 1. Ubicación, territorio y paisajes de Pluma Hidalgo, Oaxaca
Fuente: Mapas obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2025)

Con el fin de otorgar reconocimiento e impulsar la economía de la región, el café de origen “Pluma” cuenta con denominación de origen desde el 2020. Dicha denominación engloba las variedades de la especie *Coffea arabica* como la Typica, Bourbon, Mondo Novo, Mango Gype, Marsellesa, Oro Azteca, Sachimor, Geisha, Java y Pluma Hidalgo. La denominación incluye al café producido en la región Pluma, que comprende 29 municipios, entre ellos se encuentra San Agustín Loxicha, San Francisco Ozolotepec, San Sebastián Coatlán y Pluma Hidalgo. El cultivo se hace exclusivamente bajo sombra y en pulicultivo. La cosecha se hace de manera manual y meticulosa una vez que el fruto alcanza la madurez (Secretaría de Economía - Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, 2020)

Los caficultores de la región se enfrentan a diversos desafíos como la degradación del suelo, deforestación y enfermedades como la plaga de la roya (*Hemileia vastatrix*), que es una de las principales amenazas para la producción de café. La roya es un hongo biotrópico que ataca las hojas del cafeto causando lesiones anaranjadas. El hongo ocasiona la disminución de la fotosíntesis, que deriva en la muerte de las hojas y la defoliación del cafeto, provocando la carencia de frutos y la disminución de la calidad de estos (Prado et al., 2021; Santiago-Santiago et al., 2023). La dispersión de la roya es favorecida por el viento, la lluvia, la sombra y altas densidades de cultivo que permiten el contacto directo entre las plantas (Mora, 2016), características que coinciden con los requisitos de la denominación de origen del café “Pluma”. Adicionalmente, la mayoría del cultivo en Pluma Hidalgo se lleva a cabo de forma orgánica, limitando la opción de aplicar funguicidas en los cafetales y haciendo aún más difícil el control de la roya (Soto et al., 2017).

La incidencia de las plagas, además del poco financiamiento, asesoría técnica y poca visión empresarial, por la falta de políticas públicas, ha orillado a los caficultores a abandonar sus tierras y buscar otras opciones para sustentarse como trabajar de jornaleros para grandes fincas o migrar al centro del país o al extranjero. Esto, además de repercutir en la economía, también afecta el aspecto social, cultural y la biodiversidad de la región de Pluma Hidalgo (Soto et al., 2017; Thomé Ortiz, 2018). Una estrategia para disminuir el desperdicio y agregar valor a los desechos ocasionados por la planta es recuperar los metabolitos secundarios con potencial bioactivo presentes en los granos de café infectados (Figura 2).

A



B



Figura 2. Frutos de café (A) sanos y (B) infectados con roya
Fuente: elaboración propia

Dos de los principales metabolitos secundarios con potencial bioactivo en el café son el ácido clorogénico y la cafeína. El ácido clorogénico es un compuesto fenólico con alto potencial antioxidante, además, tiene propiedades antiinflamatorias, antidiabéticas y antineurodegenerativas (Tajik et al., 2017). Por otro lado, la cafeína es un alcaloide que ha probado tener propiedades antiinflamatorias, antidepresivas y neuroestimulantes (Hosny et al., 2019; Hwang et al., 2016; Khadrawy et al., 2018).

El ácido clorogénico tiene aplicaciones en suplementos dietéticos, como conservador de alimentos y en cosméticos por sus propiedades anti-envejecimiento y antioxidantes. En el 2024 su mercado alcanzó la cifra de 150 millones de dólares y se prevee que en el 2031 aumente a \$203 millones de dólares (Verified Market Research, 2024). De igual manera, la cafeína es utilizada en bebidas energéticas, en fármacos para aliviar el dolor y aumentar la concentración, así como en cosméticos. En el 2024 el mercado de la cafeína tuvo un valor de 934 millones de dólares y se espera que para el 2030 incremente a \$1,320 millones de dólares (Research and Markets, 2024).

Existe la posibilidad de que su expresión se vea afectada por el estrés al que se somete la planta por el hongo de la roya, ya que los metabolitos secundarios actúan como sistema de defensa ante una amenaza abiótica o biótica (Sharma et al., 2022). Con el objetivo encontrar una alternativa a la pérdida que enfrentan los productores de café de Pluma Hidalgo por el desecho que genera la roya, se comparó el contenido de ácido clorogénico y cafeína en extractos de grano sano (GS) y grano infectado (GR) obtenidos mediante lixiviación en tres solventes diferentes y cuantificados por cromatografía de capa fina de alta resolución (HPTLC).

Materiales y métodos

La metodología general se muestra en la Figura 3, en donde se describe el tratamiento que se les dio a los granos de café verde, para llevar a cabo la obtención e identificación de los compuestos con potencial biológico.

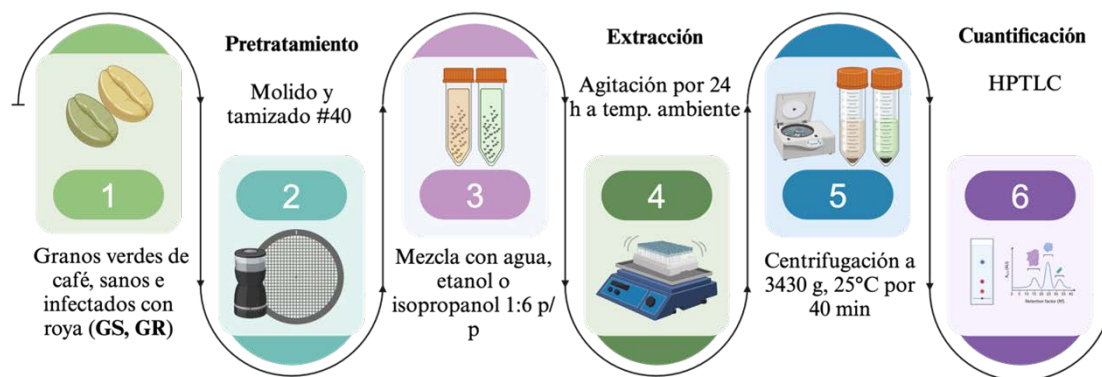


Figura 3. Descripción de la metodología utilizada para el tratamiento, extracción y cuantificación de ácido clorogénico y cafeína de granos de café verdes sanos e infectados con *H. vastatrix*
Fuente: Elaboración propia

Muestras

El fruto de café se recolectó de manera manual en los cultivos del municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, en el mes de octubre en estado de maduración temprana. Para el estudio se utilizaron granos sanos e infectados con roya de la especie *Coffea arabica* var. Pluma Hidalgo. Los granos se despulparon y se deshidrataron en un horno de convección a 50 °C por 3 h. Se molieron y se tamizaron en una malla # 40. Las muestras se almacenaron a -18 °C hasta su uso.

Extracción por lixiviación de compuestos bioactivos

Los granos sanos e infectados se mezclaron con agua, etanol o isopropanol en una relación 1:6 p/p. Las combinaciones se mantuvieron en movimiento durante 24 h, utilizando un agitador orbital a temperatura ambiente. Posteriormente, se centrifugaron a 3430 g por 40 min a 25 °C. El sobrenadante se decantó y se almacenó a -18 °C hasta su uso.

Análisis mediante cromatografía de capa fina de alta resolución (HPTLC)

Para la determinación del contenido de cafeína y ácido clorogénico se realizó un análisis por HPTLC. Se utilizaron estándares de ácido clorogénico (5-CQA) y cafeína para preparar las curvas de calibración en cada solvente en concentraciones de 7 - 500 µg/mL. Las ecuaciones de regresión para cuantificar ácido clorogénico en agua, etanol



e isopropanol fueron $y = -0.14x^2 + 85.56x - 954.24$ ($R^2 = 0.99$), $y = 0.013x^2 + 22.78 + 98.46$ ($R^2 = 0.99$) y $y = -0.016x^2 + 20.29x + 121.36$ ($R^2 = 0.99$). Mientras que las obtenidas para cuantificar cafeína fueron las siguientes en agua, etanol e isopropanol respectivamente: $y = -0.0694x^2 + 51.697x - 135.01$ ($R^2 = 0.99$), $y = -0.1076x^2 + 60.902x + 673.28$ ($R^2 = 0.99$) y $y = -0.0081x^2 + 16.928x + 427.05$ ($R^2 = 0.99$).

De cada extracto diluido se inyectaron 2 μ L en una placa de aluminio recubierta por gel de sílice de 10x10 cm. Posteriormente, se depositó la placa en una cámara previamente saturada con la primera fase móvil: acetato de etilo, tolueno, diclorometano, ácido fórmico y agua en relación 11:1.75:0.75:0.65:0.65 v/v/v/v/v para la determinación de cafeína. Una vez que se eluyó la mitad de la placa se aplicó la segunda fase móvil: hexano, acetato de etilo y ácido fórmico en relación 10:5:0.150 v/v/v para la identificación de ácido clorogénico. El contenido de cafeína se determinó a 275 nm y el de ácido clorogénico a 325 nm por espectometría UV en el equipo CAMAG equipado con el software Wincats.

Resultados y discusión

En las muestras de café obtenidas del municipio de Pluma Hidalgo se analizó la relación entre la cantidad de frutos y el resto de la planta. Se hizo un balance de materia, separando los frutos de las hojas y ramas del mismo tamaño para cuantificarlos y así calcular la relación en peso/peso. Los resultados indicaron que la infección causada por la roya del café podría estar provocando una disminución en la producción de frutos hasta de un 18% en comparación con el cafeto sano (Figura 4). En estudios previos se ha reportado que la roya llega a reducir el rendimiento del cafeto entre el 10 y 20 % o hasta el 70 % e incluso causa la muerte de este (Aristizábal & Johnson, 2022; Salazar-Navarro et al., 2024). Esto se debe principalmente a la pérdida de la actividad fisiológica de la planta como la fotosíntesis, respiración y transpiración en las hojas que no permiten el correcto desarrollo del fruto (Santiago-Santiago et al., 2023).

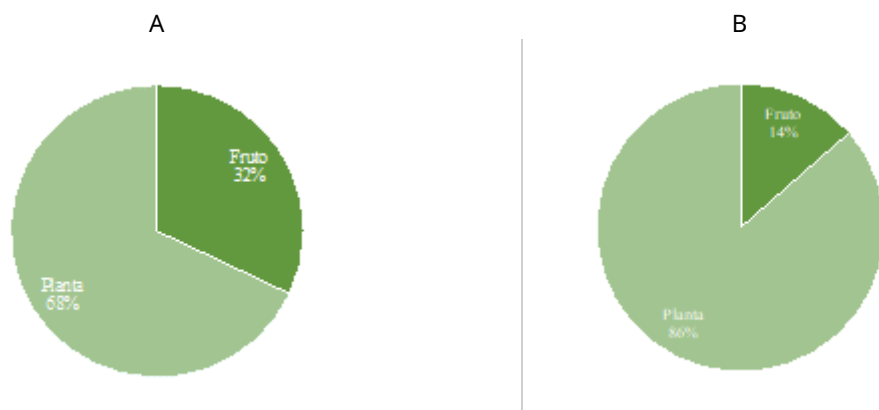


Figura 4. Representación del fruto en relación a la planta del café en estado (A) sano y (B) infectado con roya
Fuente: elaboración propia

A los granos sanos e infectados se les midió el contenido de ácido clorogénico y cafeína mediante la técnica HPTLC descrita en la metodología. La placa del cromatograma realizado con los extractos en etanol se presentan en la Figura 5. El factor de retención para la banda característica del ácido clorogénico fue de $R_F = 0.06$, $R_F = 0.03$ y $R_F = 0.10$ en etanol, isopropanol y agua respectivamente. De igual manera, la cafeína se identificó en $R_F = 0.24$ en etanol e isopropanol y en $R_F = 0.28$ en agua.

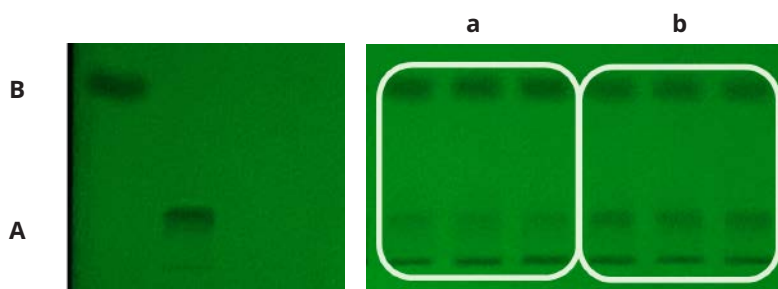


Figura 5. Extracto de placa de HPTLC en donde se observan las bandas de ácido clorogénico (A) y de cafeína (B) de extractos de grano de café verde sano (a) e infectado (b) extraído en etanol. Las bandas de mayor intensidad indican una concentración más alta que del compuesto que las más ténues. Las muestras fueron cargadas por triplicado

Fuente: elaboración propia

El contenido de ácido clorogénico en los extractos en agua e isopropanol no mostraron diferencias significativas entre su estado sano e infectado. La extracción en etanol fue la más efectiva, cuantificando 0.533 ± 0.015 mg/g y 0.815 ± 0.021 mg/g de ácido clorogénico en grano sano e infectado respectivamente. El aumento del 52.9 % en el contenido de este ácido puede ser el resultado de la activación del sistema de defensa de la planta ante la presencia del hongo roya (Figura 6). Se ha reportado que los compuestos fenólicos, como el ácido clorogénico, aumentan en plantas infectadas con hongos, incrementando la resistencia y favoreciendo el crecimiento de la planta, como es el caso del tomate infectado con *Rhizoctonia* (Rashad et al., 2022). Además, el ácido clorogénico se ha relacionado con la actividad anti-fúngica de extractos de plantas, inhibiendo el crecimiento de hongos como *Candida albicans*, *Cryptococcus gattii* y *Botrytis cinerea* (Barreto et al., 2024; Zhang et al., 2024).

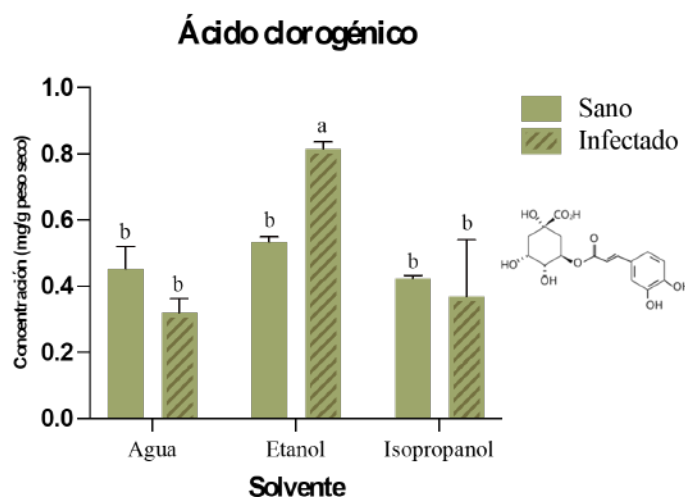


Figura 6. Niveles de ácido clorogénico en granos sanos e infectados con roya extraídos en agua, etanol e isopropanol. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tuckey ($p > 0.05$, $n = 3$)
Fuente: elaboración propia

Se ha reportado que el ácido 4,5-dicafeoilquínico (4,5-diCQA), un isómero del ácido clorogénico, aumenta significativamente en las hojas de café infectadas con roya del café (Leitão et al., 2011). Un caso similar podría estar ocurriendo en el grano del café, en donde, además del ácido clorogénico más abundante (5-CQA), se estén sintetizando otros isómeros en respuesta a la infección. La técnica utilizada para cuantificar ácido clorogénico no permite la separación completa de los isómeros extraídos, por lo que se podrían estar estimando compuestos menos polares que el 5-CQA, con más afinidad al etanol, por ejemplo, isómeros con dos moléculas de ácido cafeico como el 3,4-diCQA o el 3,5-diCQA (Magaña et al., 2021) o el mismo 4,5-diCQA.

Por otro lado, el isopropanol fue el solvente que presentó un mejor rendimiento en la extracción de la cafeína, en el que se cuantificaron 5.360 ± 0.184 mg/g y 3.173 ± 0.402 mg/g de cafeína en el grano sano y en el infectado respectivamente. A este solvente le sigue el agua y el etanol, que al contrario que en el caso del ácido clorogénico, este último fue el de menor rendimiento para la cafeína. Sin embargo, existe una tendencia que se observa en todos los extractos: la cafeína disminuye significativamente en el grano con roya en relación a su contraparte sana (Figura 7).

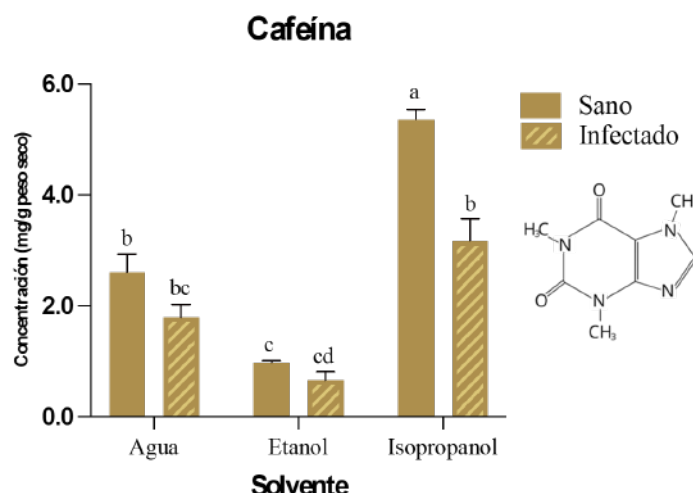


Figura 7. Niveles de cafeína en granos sanos e infectados con roya extraídos en agua, etanol e isopropanol. Letras diferentes indican diferencias significativas por la prueba de Tuckey ($p > 0.05$, $n=3$)
Fuente: elaboración propia

En agua la reducción de cafeína fue de 31.23 %; en etanol, de 32.96 %, mientras que en isopropanol se disminuyó un 40.80 %. En agua y en etanol el cambio es bastante similar, mientras que en isopropanol se obtuvo una diferencia mayor que se puede atribuir a la preferencia de la cafeína por este solvente, incrementando la afinidad y recuperación de este compuesto. En varios estudios se ha demostrado que el uso de solventes menos polares que el agua, como diclorometano, cloroformo (Shalmashi & Golmohammad, 2010) e isoprpropanol, aumentan la recuperación de la cafeína debido a la disponibilidad de grupos hidroxilo para formar enlaces con la cafeína, mejorando su solubilidad (Azevedo et al., 2008; Kopcak & Mohamed, 2005).

Aunque la cafeína es un metabolito secundario, en cafetos no resistentes a la roya, como la variedad Pluma Hidalgo, no existe evidencia de que se incremente este alcaloide como respuesta al hongo. A pesar de que un metabolito secundario suele cumplir un papel en la defensa de las plantas contra amenazas bióticas y abióticas, estas moléculas no siempre se acumulan en consecuencia al estrés, en ocasiones disminuyen, como es el caso de las saponinas en la quinoa en condiciones de sequía o el nivel de antocianinas en plantas sensibles al estrés inducido por salinidad o la presencia de metales pesados (Ramakrishna & Ravishankar, 2011). Por otro lado, se ha encontrado que el estrés biótico generado por hongos en distintos cultivos también disminuye la expresión metabolitos como la fitoalexina en habas infectadas con *Botrytis fabae* (Buzi et al., 2003) o la rutina, el kaempferol-3-glucosido y el ácido 3-feruolquínico en variedades de trigo no resistente al hongo *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. Las plantas se reprograman metabólica en respeusta al patógeno como una medida para controlar la infección, muchas veces suprimiendo vías de expresión genética relacionadas (Mashabela et al., 2023; Villajuana-Bonequi et al., 2019).



La cantidad de cafeína en los granos de café disminuye desde su etapa temprana hasta su punto de maduración debido a la baja expresión de genes relacionados al metabolismo de este alcaloide, reduciendo su contenido hasta en un 50% (Perrois et al., 2015). A pesar de que los granos sanos e infectados con roya fueron cosechados en la misma etapa de maduración, el hongo de la roya podría estar afectando los genes que codifican la expresión de metabolitos secundarios como la cafeína, ralentizando su producción como sucedería naturalmente en el fruto maduro.

A pesar del decremento de la cafeína en las muestras infectadas con *H. vastatrix*, el contenido de este alcaloide en los granos con roya aún es valioso y se podría recuperar para su mercado actual. Estudios similares han reportado un contenido de cafeína de 9.86 mg/g y 8.19 mg/g en granos de café verde (Bobková et al., 2022; Claro Gomes et al., 2023), que si bien es mayor que el obtenido en el presente trabajo, el rendimiento podría aumentar mejorando las condiciones de extracción. Además, el impacto de la roya en la disminución de la cafeína es un hallazgo importante que se puede extrapolar hacia la investigación de la ruta de síntesis de los alcaloides del café y puede desencadenar el desarrollo de un café libre de cafeína desde su cultivo.

Este trabajo brinda a los productores de café la posibilidad de conocer el potencial de los desperdicios provocados por la roya, al identificar en ellos compuestos bioactivos de interés industrial. Además, el método de extracción es sencillo y los solventes utilizados son comunes, por lo que el proceso podría implementarse en las comunidades de una manera simple y replicable para obtener extractos ricos en componentes que puedan utilizarse en productos como bebidas y cosméticos artesanales o, en su defecto, que pueden optar por vender los granos a la industria para obtener compuestos bioactivos.

Conclusiones

Este trabajo ha sido de gran importancia dado que se encontró que el contenido de ácido clorogénico no disminuye a pesar de la infección con roya, siendo el etanol el solvente que maximiza su recuperación. Por otra parte, la cafeína sí es afectada negativamente por la roya, observando una disminución de hasta un 41%, lo que es de llamar la atención. Estos hallazgos alientan a realizar futuros estudios donde se profundice en las posibles rutas metabólicas y de síntesis que se ven afectadas por el hongo para la generación de estos compuestos y sus isómeros, o incluso de otros metabolitos de importancia biológica e industrial.

Los extractos obtenidos emplean metodologías sencillas y de fácil implementación para los productores de Pluma Hidalgo, haciendo posible su incorporación a los productos que ya fabrican actualmente en la comunidad, elevando su valor al aprovechar un desperdicio. En reuniones de retroalimentación con productores, donde se han

compartido estos resultados, los productores han mostrado interés por aprender a convivir con la roya, reutilizando los cultivos infectados, que de otra manera se convertirían en un desperdicio, lo que beneficia a los caficultores al ofrecer una alternativa de uso a la pérdida económica ocasionada por la plaga. De esta manera se apoya la prevalencia del cultivo de café en la zona de Pluma Hidalgo, Oaxaca y puede ser impulsada en México y en otras regiones cafetaleras afectadas por la roya.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflictos de interés.

Financiamiento

La investigación se desarrolló en el marco del proyecto CONAHCYT-FORDECYT 29247 y CONAHCYT ciencia de frontera 320885.

Agradecimientos

A la comunidad del municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, por proporcionarnos la materia prima y acceder a trabajar en el proyecto. A CONAHCYT-Mexico por el apoyo con la beca CVU1260321.

Referencias

- Aristizábal, L. F., & Johnson, M. A. (2022). Monitoring Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*) on Commercial Coffee Farms in Hawaii: Early Insights from the First Year of Disease Incursion. *Agronomy*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051134>
- Azevedo, A. B. A. de, Mazzafera, P., Mohamed, R. S., Melo, S. A. B. V. de, & Kieckbusch, T. G. (2008). Extraction of caffeine, chlorogenic acids and lipids from green coffee beans using supercritical carbon dioxide and co-solvents. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25, 543–552. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000300012>
- Barreto, V. H. N. S., da Silva Mazzeti, C. M., Rodrigues, B. M., Simões de Souza, H., Correa, A. D., Mello, M. de A., Ramalho de Oliveira, C. F., Orlandi Sardi, J. de C., Cardoso, C. A. L., La Flor Ziegler Sanches, F., Rodrigues Macedo, M. L., Santos, E. F. dos, & Rafacho, B. P. M. (2024). Mangaba (*hancornia speciosa*): Exploring potent antifungal and antioxidant properties in lyophilised fruit pulp extract through in vitro analysis. *Natural Product Research*, 0(0), 1–7. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2372839>
- Bobková, A., Demianová, A., Poláková, K., Capcarová, M., Lidíková, J., Árvay, J., Hegedúsová, A., Bobko, M., Jurčaga, L., & Belej, I. (2022). Variability of



- caffeine content in green and roasted *Coffea arabica* regarding the origin, post-harvest processing, and altitude, and overview of recommended daily allowance. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 57(12), 989–998. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2159739>
- Buzi, A., Chilosi, G., Timperio, A. M., Zolla, L., Rossall, S., & Magro, P. (2003). Polygalacturonase Produced by *Botrytis Fabae* as Elicitor of Two Furanoacetylenic Phytoalexins in *Vicia Faba* Pods. *Journal of Plant Pathology*, 85(2), 111–116. <https://www.jstor.org/stable/41998133>
- Claro Gomes, W. P., Gonçalves Bortoleto, G., & Melchert, W. R. (2023). Spectrophotometry and chromatography analyses combined with chemometrics tools to differentiate green coffee beans into special or traditional. *Journal of Food Science*, 88(12), 5012–5025. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16807>
- Flores, R., & Alonzo González, R. (2017). Prospectiva del café Pluma Hidalgo: Orígenes, crisis varietal del producto, actores, estrategia de solución. En R. Félix & R. Alonzo, *Políticas públicas y desarrollo sustentable* (pp. 103–134). Editorial Gasca e Investigadores de México
- Hosny, E. N., Sawie, H. G., Elhadidy, M. E., & Khadrawy, Y. A. (2019). Evaluation of antioxidant and anti-inflammatory efficacy of caffeine in rat model of neurotoxicity. *Nutritional Neuroscience*, 22(11), 789–796. <https://doi.org/10.1080/1028415X.2018.1446812>
- Hwang, J.-H., Kim, K.-J., Ryu, S.-J., & Lee, B.-Y. (2016). Caffeine prevents LPS-induced inflammatory responses in RAW264.7 cells and zebrafish. *Chemico-Biological Interactions*, 248, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2016.01.020>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). *Mapa Digital de México en línea*. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAyLjE0NTY1LHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dDEsMXNlcnZpY2lvcw==>
- Khadrawy, Y. A., Sawie, H. G., Hosny, E. N., & Mourad, H. H. (2018). Assessment of the antidepressant effect of caffeine using rat model of depression induced by reserpine. *Bulletin of the National Research Centre*, 42(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s42269-018-0034-1>
- Kopcak, U., & Mohamed, R. S. (2005). Caffeine solubility in supercritical carbon dioxide/co-solvent mixtures. *The Journal of Supercritical Fluids*, 34(2), 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2004.11.016>
- Leitão, S., Guerra-Guimaraes, L., Bronze, M., Boas, L., Sá, M., Almeida, M., & Silva, M. do C. (2011). *Chlorogenic Acid Content in Coffee Leaves: Possible Role in Coffee Leaf Rust Resistance* [sesión de conferencia]. 23rd International Conference on Coffee Science.

- Magaña, A. A., Kamimura, N., Soumyanath, A., Stevens, J. F., & Maier, C. S. (2021). Caffeoylquinic acids: Chemistry, biosynthesis, occurrence, analytical challenges, and bioactivity. *The Plant Journal : For Cell and Molecular Biology*, 107(5), 1299–1319. <https://doi.org/10.1111/tpj.15390>
- Mashabela, M. D., Tugizimana, F., Steenkamp, P. A., Piater, L. A., Dubery, I. A., & Mhlongo, M. I. (2023). Metabolite profiling of susceptible and resistant wheat (*Triticum aestivum*) cultivars responding to *Puccinia striiformis* f. Sp. *Tritici* infection. *BMC Plant Biology*, 23(1), 293. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04313-9>
- Mora, G. (2016). *Roya del cafeto. Hemileia vastatrix Berkeley & Broome. Ficha técnica N 40*. <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafeto/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20cafeto.pdf>
- Perrois, C., Strickler, S. R., Mathieu, G., Lepelley, M., Bedon, L., Michaux, S., Husson, J., Mueller, L., & Privat, I. (2015). Differential regulation of caffeine metabolism in *Coffea arabica* (Arabica) and *Coffea canephora* (Robusta). *Planta*, 241(1), 179–191. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2170-7>
- Prado, E., Libert-Amico, A., & Bolaños-González, M. (2021). *Las variedades de café en México ante el desafío de la Roya La importancia socioecológica del café bajo sombra*. Boletín informativo. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12709.31201>
- Ramakrishna, A., & Ravishankar, G. A. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 6(11), 1720–1731. <https://doi.org/10.4161/psb.6.11.17613>
- Rashad, Y. M., Abdalla, S. A., & Sleem, M. M. (2022). Endophytic *Bacillus subtilis* SR22 Triggers Defense Responses in Tomato against *Rhizoctonia* Root Rot. *Plants*, 11(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/plants11152051>
- Research and Markets. (2024). *Caffeine Market Size, Competitors, Trends & Forecast to 2030*. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5896322/caffeine-market-product-type-coffee-energy>
- Salazar-Navarro, A., Ruiz-Valdiviezo, V., Joya-Dávila, J., & Gonzalez-Mendoza, D. (2024). Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*) Disease in Coffee Plants and Perspectives by the Disease Control. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 93(5), 923–949. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.049612>
- Santiago-Santiago, M., Sánchez-Viveros, G., Hernández-Adame, L., Chiquito-Contreras, C. J., Salinas-Castro, A., Chiquito-Contreras, R. G., & Hernández-Montiel, L. G. (2023). Essential Oils and Antagonistic Microorganisms as Eco-Friendly Alternatives for Coffee Leaf Rust Control. *Plants*, 12(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/plants12203519>



- Secretaría de Economía - Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. (4 de febrero 2020). *Declaración de protección de la denominación de origen Pluma*. Diario Oficial de la Federación. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5585437>
- Shalmashi, A., & Golmohammad, F. (2010). Solubility of caffeine in water, ethyl acetate, ethanol, carbon tetrachloride, methanol, chloroform, dichloromethane, and acetone between 298 and 323 K. *Latin American Applied Research*, 40(3), 283–285. Recuperado de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932010000300012&lng=es&tlng=es.
- Sharma, D., Shree, B., Kumar, S., Kumar, V., Sharma, S., & Sharma, S. (2022). Stress induced production of plant secondary metabolites in vegetables: Functional approach for designing next generation super foods. *Plant Physiology and Biochemistry*, 192, 252–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.09.034>
- Soto, A., Carbajal, G., & Martínez-Jiménez, R. (2017). *Capítulo 3: Escenarios productivos y alternativas de mejora en los cafetaleros de Pluma Hidalgo, Oaxaca, en verano de 2016*.
- Tajik, N., Tajik, M., Mack, I., & Enck, P. (2017). The potential effects of chlorogenic acid, the main phenolic components in coffee, on health: A comprehensive review of the literature. *European Journal of Nutrition*, 56(7), 2215–2244. <https://doi.org/10.1007/s00394-017-1379-1>
- Thomé Ortiz, H. (2018). Plan de negocios de un circuito agroturístico del café Pluma como estrategia de desarrollo territorial en el municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, México. *Agro Productividad*, 11(8). <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i8.1107>
- Villajuana-Bonequi, M., Matei, A., Ernst, C., Hallab, A., Usadel, B., & Doehlemann, G. (2019). Cell type specific transcriptional reprogramming of maize leaves during *Ustilago maydis* induced tumor formation. *Scientific Reports*, 9(1), 10227. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46734-3>
- Wang, Z., Xie, C., Wu, Y., Liu, H., Zhang, X., Du, H., Li, X., & Zhang, C. (2024). Integrated Metabolomics and Transcriptomics Analyses Reveal the Regulatory Mechanisms of Anthocyanin and Carotenoid Accumulation in the Peel of *Coffea arabica*. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/ijms251910754>
- Zhang, H., Ji, H., & Liu, C. (2024). Antifungal metabolites of biocontrol strain LB-1 and their inhibition mechanism against *Botrytis cinerea*. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1444996>