

DE RESIDUO A FITOESTIMULANTE: BORRA DE CAFÉ EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS

Diego Campero-Ávila¹, Nahomi López-de la Cruz¹, Edna Milagros Silva-García¹, Jorge Manuel Ortega-Martínez²

¹ Universidad La Salle Morelia, Preparatoria. Morelia, México.

² Universidad La Salle Morelia, Posgrado. Morelia, México.

230041@ulsamorelia.edu.mx, 230179@ulsamorelia.edu.mx,
edna_m@ulsamorelia.edu.mx, jmortegam@ulsamorelia.edu.mx

Resumen. La seguridad alimentaria, segundo Objetivo de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, es prioritaria en México, donde cerca del 60 % de la población carece de ella. Para incrementar la productividad agrícola, se ha recurrido al uso de agroquímicos, los cuales conllevan riesgos para la salud, el medio ambiente y afectan la viabilidad económica del campo por sus altos costos y mala gestión. Frente a este desafío, se investigó la interacción de la cafeína con proteínas del maíz, frijol y chile mediante acoplamiento molecular, observándose vínculos con enzimas clave en la síntesis de carbohidratos y una estimulación indirecta de fitohormonas tipo auxinas. En ensayos *in vivo*, se aplicó extracto acuoso de borra de café a plantas, logrando un desarrollo radicular superior y una germinación más eficiente en comparación con un grupo control regado solo con agua. Se alcanzó un 100 % de germinación, optimizando recursos frente a la práctica tradicional de sembrar varias semillas por punto. Además, al relacionar las fitohormonas con la temperatura, se empleó una cámara térmica que redujo el tiempo de germinación a solo 36 horas. Esta estrategia reutiliza un desecho orgánico, disminuye costos, evita impactos negativos al ambiente y representa una opción viable para cultivos de autoconsumo. La propuesta sienta las bases para futuras aplicaciones a mayor escala, contribuyendo a la sostenibilidad y la seguridad alimentaria en contextos vulnerables.

Palabras Clave: Seguridad alimentaria, Café, Agricultura sostenible.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

La seguridad alimentaria es uno de los retos más urgentes del siglo XXI. De acuerdo con la ONU, el hambre y la inseguridad alimentaria han aumentado desde 2015 (ONU, 2025). De continuar esta tendencia, en cinco años cerca de 600 millones de personas podrían padecer malnutrición crónica. En México, la FAO (2024) reporta que 6.8 % de la población enfrenta Inseguridad Alimentaria Grave (IAG), condición ligada a desnutrición, debilitamiento inmunológico y muertes anuales. Además, la dependencia de fertilizantes y plaguicidas químicos ha provocado crisis agrícola, bajos rendimientos y pérdida de biodiversidad.

2 Objetivo

Desarrollar una alternativa sustentable que optimice la eficiencia en la germinación de cultivos fundamentales en la dieta mexicana tales como el maíz, frijol y chile, mediante el uso combinado de fitoestimulantes orgánicos derivados de la borra de café, con el propósito de promover prácticas agrícolas más sostenibles, disminuir la dependencia de agroquímicos sintéticos y contribuir a la seguridad alimentaria en México.

3 Propuesta teórico-metodológica

Los procesos de germinación y desarrollo temprano en las plantas están regulados por señales endógenas, como las fitohormonas, y estímulos ambientales, como temperatura, humedad y disponibilidad de nutrientes. Las auxinas promueven el desarrollo radicular, la expansión foliar y el

crecimiento del tallo. Se distingue entre fitoestimulación, entendida como la acción de compuestos que, sin aportar nutrientes, influyen directamente en procesos fisiológicos y de diferenciación, y bioestimulación, que corresponde a la aplicación de sustancias naturales de origen biológico o mineral como extractos de algas, aminoácidos, ácidos húmicos, entre otros, que inducen respuestas de tolerancia al estrés o mejoran la disponibilidad de nutrientes. En este marco, la cafeína se clasifica como fitoestimulante, ya que modula rutas hormonales y procesos fisiológicos sin un papel nutricional directo. Sin embargo, al tratarse de un extracto completo, algunos de sus derivados podrían actuar como bioestimulantes, complementando el efecto observado. La borra de café contiene cafeína como componente principal, además de alcaloides, polifenoles, ácidos orgánicos y minerales, y su reutilización como extracto acuoso puede mejorar la eficiencia de cultivos clave en la dieta mexicana, como frijol, maíz y chile.

La metodología se desarrolló en dos fases experimentales. En la primera, se elaboró un extracto acuoso a partir de borra de café seca en proporción 1:5 (peso/volumen), empleado como solución de riego. Se seleccionaron frijol (*Phaseolus vulgaris*), maíz (*Zea mays*) y chile chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) por su relevancia agroalimentaria, organizando dos grupos por cultivo: uno tratado con el extracto y otro control, regado solo con agua. Los resultados mostraron que el extracto promovió la germinación y el desarrollo radicular: en maíz la germinación alcanzó el 100 % frente al 85 % del control, con un 35 % más de elongación de la raíz primaria y mayor número de raíces laterales. En frijol acortó ligeramente el tiempo de germinación y favoreció plántulas más vigorosas. En chile mejoró la germinación aún fuera de sus condiciones óptimas, con mayor número de plántulas establecidas. En la segunda fase se introdujo una variable de control térmico para evaluar la sensibilidad de la germinación al fitoestimulante, empleando una cámara programada a 24 °C, considerada óptima para el maíz (Hang et al., 1991; Rivera et al., 2025).

4 Discusión de resultados

Las semillas de maíz tratadas con extracto acuoso de borra de café evidenciaron una germinación homogénea y un crecimiento vigoroso, alcanzando las fases vegetativas V2 y V3 en apenas 14 días. Los brotes emergieron entre los días 5 y 7, anticipándose a los tiempos promedio bajo condiciones estándar, y los tallos jóvenes mostraron mayor elongación y notable firmeza estructural, lo que sugiere un desarrollo inicial más robusto y prometedor (Figura 1). En condiciones de control térmico, la germinación se completó en 36 horas sin comprometer la calidad morfológica de las plántulas. Asimismo, los estudios de docking indicaron que la cafeína activa tres rutas hormonales de estimulación: la de las auxinas, que favorece la elongación de los tallos y la biosíntesis de enlaces glucosídicos principalmente en forma de almidón. La de las citoquininas, donde se estimula la acción de enzimas oxidoreductasas que participan en la formación de ATP. Finalmente, la del ácido abscísico, en la cual proteínas oxidoreductasas que contienen átomos de hierro (Fe) contribuyen a la activación del proceso germinativo (Figura 3).

Las semillas de frijol regadas con extracto de borra de café germinaron de manera anticipada respecto al grupo control regado únicamente con agua y desarrollaron un sistema radicular más extenso, acompañado de fases vegetativas avanzadas con tallos y hojas de mayor grosor y robustez. De manera destacada, las plántulas tratadas presentaron una mayor formación de nódulos de nitrógeno en las raíces, lo que sugiere una simbiosis rizobiana más eficiente y, en consecuencia, un impulso notable en el desarrollo general de la planta (Figura 2). Los análisis de docking revelaron que la cafeína interactúa con la faseolina, proteína de reserva que participa en los procesos de germinación y diferenciación de la semilla, induciendo un cambio conformacional que facilita su degradación por endopeptidasas, lo cual favorece el crecimiento del embrión y regula el suministro progresivo de nutrientes. Además, esta interacción promueve la activación de auxinas, fitohormonas esenciales para la diferenciación celular y el establecimiento temprano de la plántula (Páez et al., 2024), (Figura 3).

Se evaluó la influencia de la cafeína presente en el extracto de borra de café sobre la germinación de semillas de chile chiltepín, un cultivo de alto valor económico y con exigencias agronómicas particulares. Aun cuando las pruebas se realizaron fuera de sus condiciones térmicas óptimas,

las plántulas lograron germinar con éxito y desarrollaron un sistema radicular notablemente robusto, lo que evidencia la eficacia del extracto incluso en contextos ambientales no endémicos (Araiza et al., 2011). Los análisis de interacción proteína–ligando mostraron la mejor afinidad con proteínas de la familia 7S, relacionadas con la respuesta a factores de estrés biótico y abiótico. En particular, la cafeína se acopló al dominio central tipo β -barrel, lo que sugiere que este alcaloide contribuye al transporte de moléculas, la señalización y el reconocimiento de ligandos necesarios para la germinación (Figura 3).

5 Conclusiones y perspectivas futuras

El extracto acuoso de borra de café se confirma como un fitoestimulante eficaz, capaz de favorecer la germinación y el desarrollo inicial de distintas especies mediante la modulación de rutas hormonales clave, en particular las reguladas por auxinas. La cafeína, compuesto predominante en este residuo, parece desempeñar un papel decisivo al conferir mayor tolerancia frente a condiciones de estrés, posiblemente mediante la activación de proteínas asociadas a la expresión génica dependiente de auxinas.

A futuro, se plantea profundizar en los mecanismos moleculares implicados, mediante el análisis de la expresión génica inducida por auxinas en especies de interés agronómico. También se propone optimizar el protocolo experimental para su aplicación en cultivos estratégicos, favoreciendo prácticas agrícolas más sostenibles, resilientes y de bajo costo.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen a José Ángel Flores Jiménez y Emerson Jeshua Gómez Córdova por su colaboración en la investigación y sistematización de los antecedentes teóricos que sustentaron este proyecto.

7 Referencias

1. Araiza Lizarde, N., Araiza Lizarde, E., & Martínez Martínez, JG (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de Plántula de Chiltepín (*Capsicum annuum* L variedad glabriusculum) en invernadero. *Revista colombiana de biotecnología*, 13 (2), 170-175.
2. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024. (2024). En *FAO; IFAD; WHO; WFP; UNICEF; eBooks*. <https://doi.org/10.4060/cd1254es>
3. Hang, C. C., Åström, K. J., & Ho, W. K. (1991, March). Refinements of the Ziegler– Nichols tuning formula. In *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)* (Vol. 138, No. 2, pp. 111-118). IET Digital Library.
4. Organización de las Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible. 2 Hambre cero. (2024) ONU. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
5. Páez, S. V., Durango, D., & Quiñones, W. (2024). In vivo and in silico evaluation of the phytoalexin-eliciting activity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) of jasmonoyl-l-isoleucine analogs having a pyrazolidin-3-one ring. *RSC Advances*, 14(53), 39325-39336. <https://doi.org/10.1039/d4ra06461e>
6. Rivera Torriente, W. G., Menocal Díaz, L. J., López Pubillones, L. A., & Acosta Granado, J. C. (2025). Estudio de la relación entre variables fenológicas de desarrollo del maíz para un mayor rendimiento.



Figura 1. Resultados experimentales en semillas de maíz regadas con extracto acuoso de borra de café. Elaboración propia



Figura 2. Resultados experimentales en semillas de frijol regadas con extracto acuoso de borra de café. Elaboración propia

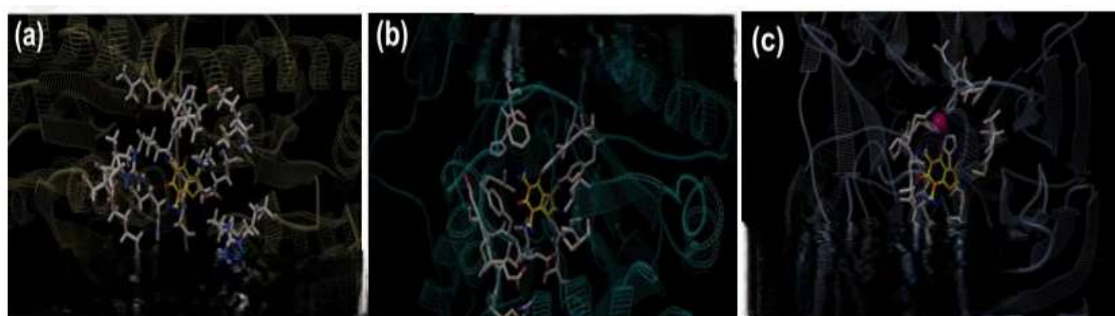


Figura 3. Resultados de Docking molecular entre la cafeína y las fitohormonas del maíz (a), del frijol (b) y del chiltepin (c). Elaboración propia