

Colaboración internacional e innovación biotecnológica en aguacate: un proyecto emblemático del CIATEJ

International Scientific Collaboration and Biotechnological Innovation in Avocado: A Landmark Project at CIATEJ

Rafael Urrea López ^{1,*}, Julio Armando Massange Sánchez ¹, Alejandro Pereira Santana ², Antonia Gutiérrez Mora ¹

¹ Unidad de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), subsede Zapopan, Jalisco, México.

² SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), subsede Sureste, Mérida, Yucatán, México.

* Autor para correspondencia: rurrea@ciatej.mx

Palabras clave:

aguacate, biotecnología vegetal, colaboración internacional, innovación tecnológica, cambio climático

Keywords:

avocado, plant biotechnology, international collaboration, technological innovation, climate change

Resumen

La agricultura requiere con urgencia respuestas basadas en la innovación científica y tecnológica, así como en la articulación de actores a escala local y global para enfrentar los desafíos del rápido cambio climático. En el marco del 50 aniversario del CIATEJ, este artículo presenta uno de sus proyectos emblemáticos: una iniciativa pionera de colaboración científica binacional entre la Unidad de Biotecnología Vegetal y la Universidad de Sheffield, Reino Unido (2019–2023). Financiado mediante una convocatoria internacional altamente competitiva y ejecutado durante la pandemia de COVID-19, el proyecto se enfocó en el aguacate, cultivo estratégico para México, y refleja la consolidación científica y técnica de la Unidad. Su desarrollo fortaleció la infraestructura de investigación, consolidó redes de colaboración nacionales e internacionales, impulsó la generación y divulgación de conocimiento, la formación de recursos humanos especializados y la innovación tecnológica, materializada en una patente nacional.

Abstract

Agriculture urgently requires solutions based on scientific and technological innovation, as well as the coordinated engagement of stakeholders at local and global scales to address the challenges posed by rapid climate change. As part of CIATEJ's 50th anniversary, this article presents one of the institution's landmark projects: a pioneering binational scientific collaboration between the Plant Biotechnology Unit and the University of Sheffield, United Kingdom (2019–2023). Funded through a highly competitive international call and conducted during the COVID-19 pandemic, the project focused on avocado, a strategic crop for Mexico, and reflects the scientific and technical consolidation of the Unit. The project strengthened research infrastructure, consolidated national and international collaborative networks, promoted knowledge generation and dissemination, fostered the training of highly specialized human resources, and advanced technological innovation, culminating in the granting of a national patent.

Recibido: 14 de mayo 2026
Revisado: 01 de julio 2026
Aceptado: 10 de julio 2026
Publicado: 01 de agosto 2026



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 aumento en el consumo per cápita de aguacate, particularmente en los Estados Unidos de América, ha posicionado a este fruto entre los primeros de mayor volumen de comercialización y el de mayor valor en el mercado global de frutas tropicales. Sin embargo, este crecimiento en la producción de aguacate se está dando en un escenario marcado por la variabilidad climática, la presión sobre los recursos hídricos y la necesidad de transitar hacia sistemas productivos más sostenibles. El rápido cambio climático ha modificado la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos, como las precipitaciones (Hu et al., 2025). Esta alteración en la disponibilidad de agua representa un desafío para todos los cultivos, pero en particular para los cultivos perennes, como el aguacate. Al ser México el principal productor y exportador de aguacate a nivel mundial, con exportaciones que superan los 3 000 millones de dólares por año (SIAP, 2025), la generación de conocimiento científico, orientado a mejorar la eficiencia en el uso del agua y la resiliencia del cultivo, es una prioridad ineludible.

La biotecnología vegetal ha demostrado su utilidad para el estudio funcional de genes y el desarrollo de plantas con características mejoradas, resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia al estrés abiótico, biofortificación, biorremediación, biocombustibles, entre otros. Sin embargo, el uso de tecnologías novedosas en aguacate se enfrenta a su naturaleza recalcitrante, responsable de bajas eficiencias de transformación genética y regeneración *in vitro*, lo que ha dificultado significativamente tanto la comprensión de su biología molecular como su mejoramiento genético.

Para atender las urgentes necesidades de investigación y mejoramiento de cultivos estratégicos de México, la investigación científica requiere la articulación de capacidades mediante esquemas de colaboración para integrar conocimientos, infraestructura y recursos que permitan enfrentar retos no resueltos en cultivos de particular interés nacional. Con este fin, el CIATEJ, por medio de la Unidad de Biotecnología Vegetal, de la subsede Zapopan, impulsó una colaboración estratégica con una prestigiosa universidad en investigación del Reino Unido, para concursar por fondos internacionales para desarrollar un proyecto de colaboración científica binacional sin precedentes para la fruta tropical de mayor valor en el mercado internacional.

El proyecto: origen, contexto y relevancia estratégica

El proyecto de investigación “Improving water use and breeding pipelines in avocado” se desarrolló entre los años 2019 y 2023 como resultado de la colaboración entre el CIATEJ y la University of Sheffield (UoS), del Reino Unido. Este proyecto fue desarrollado por medio del financiamiento binacional provisto por la convocatoria del *Newton Fund*, que exigió cumplir con procesos de evaluación altamente exigen-

tes. La convocatoria *Newton Fund* es un programa de cooperación internacional del gobierno del Reino Unido que tiene como fin fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas de países socios. En el caso de la convocatoria del *Newton Fund* de 2018, el financiamiento fue otorgado de manera conjunta por parte del Reino Unido, a través del Biotechnology and Biological Sciences Research Council (BBSRC), y por parte de México, mediante el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL) de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología (SICYT) del estado de Jalisco.

La obtención de fondos en tan reconocida convocatoria binacional representa un indicador relevante de la madurez científica del equipo participante. El otorgamiento de fondos por parte de la convocatoria *Newton Fund* es, al mismo tiempo, un reconocimiento de las capacidades institucionales de producción de conocimiento, con criterios de excelencia científica y pertinencia social, y también de su capacidad para la gestión y administración transparentes de recursos.

Este proyecto de investigación se formuló para atender una problemática crítica para el contexto agrícola mexicano: la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua y acelerar los procesos de mejoramiento genético en aguacate. A pesar de la importancia económica del aguacate y de la disponibilidad de la secuencia de su genoma (Rendón-Anaya et al., 2019), en la actualidad pocas herramientas moleculares han sido usadas en su estudio y mejoramiento genético. Antes del proyecto solo un estudio reportaba el uso de biobalística para la transformación transitoria de callos embrionarios (Chaparro-Pulido et al., 2014), un estudio reportaba el uso de *Agrobacterium rhizogenes* para la producción de plantas compuestas (Prabhu et al., 2017) y ocho estudios informan el uso de *Agrobacterium* para explorar transformaciones estables (Cruz-Hernández et al., 1998; Efendi 2003; Raharjo et al., 2003, 2008; Palomo-Ríos et al., 2011, 2012, 2017; Ahmed et al., 2012). Sin embargo, la caracterización funcional de genes de aguacate se ha reportado mediante la sobreexpresión heteróloga exclusivamente, en particular en plantas modelo (Ziv et al., 2014) y ninguna por silenciamiento transitorio o estable. Mayores detalles del panorama previo al proyecto se pueden consultar en el Review que publicamos (Tamayo-Ramos et al., 2022). Los escasos reportes y las bajas eficiencias alcanzadas en los dos mayores cuellos de botella que enfrenta el estudio del aguacate, la transformación y la regeneración, representaron un gran reto a superar.

Este cultivo enfrenta crecientes presiones derivadas del rápido cambio climático y de la disponibilidad de recursos hídricos. Para ello, el proyecto debió iniciar afrontando uno de los principales cuellos de botella del estudio de la biología y el mejoramiento biotecnológico de especies perennes: la naturaleza recalcitrante a la transferencia de genes. Superar esta restricción es fundamental, ya que ha dificultado

tado tanto la caracterización funcional de genes como el mejoramiento genético de nuevas variedades en cultivos perennes como el aguacate. En este contexto, la generación de metodologías alternativas de transferencia de genes representó un objetivo central con implicaciones científicas y tecnológicas de amplio alcance.

Más allá de una participación simultánea de actores de diferentes países, la colaboración en este proyecto logró una articulación efectiva en el diseño experimental, la ejecución de actividades en condiciones retadoras y la generación de resultados. La ejecución de este proyecto enfrentó diferentes adversidades. Una de las más relevantes, aquellas derivadas de la pandemia de COVID-19, lo que exigió creatividad y adaptaciones en el trabajo, una estrecha coordinación con los colaboradores nacionales e internacionales y la reorganización de las actividades experimentales. Lejos de limitar el desarrollo del proyecto, este contexto desafiante puso de manifiesto la resiliencia del equipo de investigación y contribuyó al fortalecimiento de las redes de colaboración, lo que permitió el avance del proyecto para cumplir con los objetivos planteados.

Colaboración internacional y cooperación técnico-científica

La colaboración internacional en este proyecto fue un componente estructural desde su concepción hasta su desarrollo. Lo que se corresponde con dinámicas de la investigación científica hoy en día, que buscan la articulación cada vez más a través de redes que permitan integrar diversas capacidades, compartir infraestructura, así como acceder a fondos de financiamiento internacional altamente competidos.

La relación entre el CIATEJ y UoS se estableció y desarrolló bajo principios de cooperación técnico-científica basados en el intercambio de conocimientos especializados, metodologías experimentales y capacidades tecnológicas. Esta colaboración entre un centro público de investigación de México y una de las 15 mejores universidades del Reino Unido, de acuerdo con el *QS World University Rankings*, permitió abordar el problema de investigación desde perspectivas complementarias, generando sinergias que difícilmente podrían haberse alcanzado de manera aislada por cada institución.

El financiamiento mediante la convocatoria binacional *Newton Fund* desempeñó un papel fundamental, obviamente al aportar los recursos necesarios para la ejecución operativa, pero también al establecer un proceso de evaluación exigente que garantizó altos estándares de calidad científica, con enfoque técnico, científico y social. El *Newton Fund* hace parte del programa Oficial de Asistencia para el Desarrollo del Reino Unido y se alinea con objetivos de desarrollo y bienestar global, promoviendo la generación de conocimiento aplicable a problemáticas estratégicas y la consolidación de redes de investigación de largo plazo.

Resultados, productos y fortalecimiento institucional

A pesar de las limitaciones impuestas por la pandemia de COVID-19, el proyecto de investigación mantuvo una productividad constante. Lo que demuestra la capacidad de adaptación del equipo de trabajo, así como la solidez de las condiciones institucionales del CIATEJ y UoS. Más allá del cumplimiento de metas establecidas, los resultados alcanzados reflejan un proceso de generación de conocimiento articulado con el crecimiento y desarrollo de capacidades y la consolidación de infraestructura científica.

En términos de producción académica, el proyecto de investigación ha generado a la fecha nueve artículos publicados en revistas de investigación arbitradas (Tamaño-Ramos et al., 2022; Salazar-González et al., 2023; Hernández-Delgado et al., 2023; Urrea-López & Gatica-Arias, 2024; Sánchez-Pérez et al., 2025; Ramírez-Preciado et al., 2025; Burton et al., 2025; Urrea-López, 2026; Urrea-López et al., 2026), productos que trascienden más allá de meros indicadores, sino que son contribuciones al avance del conocimiento en biotecnología vegetal, en particular en el desarrollo de herramientas para la sobreexpresión de genes en especies perennes de naturaleza recalcitrante y de genómica comparativa de aguacate. Publicaciones en revistas científicas que hacen parte del *Journal Citation Reports*, por lo que cuentan con aval internacional al superar procesos de evaluación por pares. Publicaciones en las que el CIATEJ es autor de correspondencia, con lo que se fortalecen la visibilidad y posicionamiento institucional.

En este proyecto de investigación, la formación de recursos humanos constituyó un eje central. Por lo que se impulsó la incorporación de estudiantes de licenciatura y posgrado, provenientes de diversas instituciones nacionales e internacionales, para consolidar un entorno académico dinámico y altamente competitivo. La activa participación de las y los estudiantes en el proyecto les permitió la adquisición de competencias técnicas y la integración en redes de investigación; de esta forma, el proyecto contribuyó al fortalecimiento de la comunidad científica. Al día de hoy se han graduado siete estudiantes de posgrado con trabajos de investigación integrados directamente a los objetivos del proyecto. Asimismo, la participación de estudiantes de licenciatura amplió el alcance formativo y contribuyó a la construcción de trayectorias académicas tempranas.

La difusión de resultados no se ha limitado a artículos de investigación en inglés en revistas especializadas, también se han presentado en 26 oportunidades conferencias y carteles en diversos eventos académicos en español, la mayoría de ellos en México. Esta amplia difusión ha promovido la socialización de resultados, el intercambio de ideas y la construcción de redes académicas. En el ámbito de divulgación, a la fecha se han publicado ocho artículos dirigidos a público no es-

pecializado, contribuyendo a la comunicación social del conocimiento en un área donde la percepción pública resulta determinante.

Entre los resultados más significativos obtenidos mediante el proyecto de investigación se encuentra una innovación tecnológica estratégica para el análisis funcional de genes en especies leñosas, para soslayar una barrera que limita el uso de herramientas biotecnológicas en una amplia diversidad de especies perennes de gran tamaño. Esta innovación contribuye a las políticas de desarrollo tecnológico e innovación soberana impulsadas por la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del gobierno de México. El Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) otorgó al CIATEJ la patente por el método de infiltración al vacío localizado en plantas de gran tamaño para la transferencia de genes *in planta* (Urrea-López, 2025). Esta innovación no solo resuelve una limitación importante para la infiltración localizada de material genético directamente en tejidos maduros, sino que preserva el contexto fisiológico de la planta. Esto se logra mediante los principios de ciencia abierta, por lo que facilita el acceso del método a laboratorios con acceso limitado a recursos interesados en impulsar la investigación en especies perennes de gran tamaño.

Adicionalmente, este proyecto de investigación desempeñó un papel relevante en el fortalecimiento de las capacidades de la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ, tanto en la adquisición de equipamiento especializado (~\$1.3 millones), que amplía las capacidades experimentales y competitividad no solo de la Unidad de Biotecnología Vegetal, sino de toda la institución.

En conjunto, todos estos resultados sitúan al proyecto como un caso emblemático que articula generación de conocimiento, desarrollo tecnológico, formación de capacidades y colaboración internacional. Lo que a su vez refleja una práctica científica alineada con los retos contemporáneos, donde la relevancia social, la excelencia científica y la cooperación internacional convergen como ejes fundamentales.

Impacto científico, tecnológico y social

El impacto de este proyecto de investigación trasciende más allá de la generación de productos académicos, al contribuir de manera integrada al avance del conocimiento, al desarrollo tecnológico y al fortalecimiento de capacidades institucionales. Desde el punto de vista científico, el proyecto amplió el catálogo de herramientas disponibles para el estudio funcional de genes en aguacate. El desarrollo de metodologías de sobreexpresión transitoria de genes en tejidos de plantas adultas representa un avance relevante, al permitir evaluaciones más rápidas y bajo condiciones fisiológicas realistas en especies perennes.

En el ámbito tecnológico, estos avances impactan directamente en el fitomejoramiento del aguacate. La posibilidad de evaluar genes candidatos sin depender de sistemas de regeneración completos reduce significativamente los tiempos experimentales y abre nuevas rutas para la caracterización funcional de genes en especies recalcitrantes. Asimismo, la innovación tecnológica de infiltración localizada por vacío permitirá explorar estrategias intermedias que pueden facilitar la adopción tecnológica en contextos regulatorios estrictos. Las metodologías de transformación transitoria, desarrolladas en el proyecto, permiten evaluar la función génica en tejidos vegetales sin requerir necesariamente la generación de plantas transgénicas estables. Esta característica amplía las posibilidades experimentales para especies recalcitrantes como el aguacate y, al mismo tiempo, introduce una dimensión relevante en términos de percepción social y aceptación de herramientas biotecnológicas aplicadas a la agricultura.

El impacto también se manifiesta en el fortalecimiento de infraestructura y en la formación de capital humano, generando efectos acumulativos en la capacidad institucional. Desde una perspectiva social y productiva, el proyecto se vincula con la sostenibilidad agrícola, particularmente en relación con el uso eficiente del agua y la resiliencia del cultivo frente al cambio climático.

Discusión: articulación entre ciencia, tecnología y sociedad

El proyecto permite examinar, desde una perspectiva de Ciencia–Tecnología–Sociedad, cómo la producción de conocimiento se configura en la intersección entre agendas científicas, capacidades institucionales, mecanismos de financiamiento y problemáticas socioambientales.

La colaboración internacional fue central en la configuración del proyecto. La interacción entre el CIATEJ y UoS no se limitó al intercambio de técnicas o datos, sino que implicó la alineación de estándares experimentales, criterios de validación y marcos interpretativos. Las colaboraciones interinstitucionales son enriquecedoras porque constituyen espacios de circulación de saberes que influyen en la definición de prioridades, en la selección de metodologías y en la evaluación de resultados. En este proceso, las capacidades locales se fortalecen mediante el intercambio y la complementariedad.

El financiamiento binacional de la convocatoria *Newton Fund* actuó como un dispositivo que estructuró la investigación, es decir, más allá de su función como fuente de recursos. La participación en este tipo de esquemas implicó responder a criterios de evaluación rigurosos, cumplir con objetivos definidos y articular resultados verificables. Todo esto contribuyó a orientar la investigación hacia la convergencia

entre excelencia científica y relevancia social, influyendo en el diseño experimental y en la priorización de líneas de trabajo.

Los estudiantes involucrados en el proyecto no solo adquirieron habilidades técnicas, sino que se integraron a comunidades de práctica, internalizando normas, metodologías y dinámicas de colaboración propias de la investigación contemporánea. Este proceso genera efectos positivos que trascienden la duración del proyecto, al fortalecer la continuidad de líneas de investigación y expandir las redes científicas.

En relación con la innovación tecnológica producida por este proyecto, como es el desarrollo de una metodología de infiltración localizada por vacío para la sobreexpresión transitoria de genes, se evidencia que la innovación surge de la interacción entre conocimiento básico, limitaciones experimentales y necesidades prácticas, que se puede sintetizar en palabras del dicho popular que dice: “nunca un mar calmo hizo buenos marineros”. El enfrentar retos técnicos, desde un punto de vista de recursividad y uso prudente de los recursos, puede contribuir a innovaciones que promuevan el acceso general que contribuya al desarrollo científico de especies perennes tradicionalmente excluidas.

La dimensión regulatoria y de adopción representa un elemento clave para comprender el alcance de estos desarrollos. La biotecnología vegetal se inserta en un entorno donde la aceptación social, los marcos normativos y las percepciones públicas influyen en la implementación de innovaciones. Es por lo que las estrategias basadas en la expresión transitoria de genes desarrolladas en este proyecto, al no implicar necesariamente la integración estable de material genético, abren espacios para la investigación y posibles aplicaciones, particularmente en contextos regulatorios restrictivos.

La divulgación científica cada vez adquiere más relevancia como mecanismo de mediación entre la comunidad científica y la sociedad. La comunicación de resultados no es un proceso unidireccional, sino un espacio en el que se construyen significados, se negocian percepciones y se facilita la apropiación social del conocimiento. En campos como la biotecnología, esta dimensión es fundamental para promover la comprensión pública y generar condiciones favorables para la adopción de innovaciones. Es por lo que las 26 participaciones en conferencias y carteles, y los ocho artículos de divulgación, todos ellos publicados en español, constituyen una contribución significativa de parte del proyecto.

Finalmente, este proyecto de investigación puede interpretarse como un ejemplo de articulación entre la investigación científica y una visión más amplia de desarrollo, en la que la generación de conocimiento se vincula con el fortalecimiento de capacidades institucionales, la innovación tecnológica y la atención de problemáticas prioritarias. Este proyecto es una evidencia de cómo la ciencia contemporánea se configura

como un proceso en el que interactúan actores, instituciones y contextos diversos, y en el que su impacto depende de la integración efectiva de estas dimensiones.

Conclusiones

El proyecto titulado “Improving water use and breeding pipelines in avocado” constituye un ejemplo representativo de cómo la investigación científica se articula con la innovación tecnológica y la atención de problemáticas estratégicas en el sector agroalimentario. Uno de sus principales aportes radica en haber contribuido a superar limitaciones técnicas en la biotecnología de especies leñosas, mediante el desarrollo de enfoques alternativos para la caracterización funcional de genes, con implicaciones tanto científicas como aplicadas.

Desde una perspectiva institucional, el proyecto evidencia la consolidación de la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ como un actor capaz de participar en colaboraciones internacionales altamente competitivas. Asimismo, al tratarse de un proyecto de investigación internacional, desarrollado bajo un esquema formal de financiamiento binacional exigente, sentó las bases para la estructuración de nuevas colaboraciones internacionales de mayor alcance, contribuyendo al fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas institucional.

Desde el enfoque Ciencia–Tecnología–Sociedad, el proyecto ejemplifica cómo la investigación puede orientarse hacia la solución de problemas complejos, integrando dimensiones científicas, tecnológicas y sociales.

Los desarrollos metodológicos generados en el proyecto continuarán aplicándose en estudios que buscan el silenciamiento de genes con el fin de ampliar las herramientas disponibles para la caracterización funcional de genes en aguacate, orientados a profundizar la comprensión de procesos biológicos y en particular aquellos asociados a la respuesta al estrés y otros rasgos que sean de interés agronómico. En el futuro, este conocimiento podría apoyar estrategias de mejoramiento genético del cultivo como la selección de materiales con mayor tolerancia al estrés y mejor desempeño agronómico, e incluso para acelerar el mejoramiento genético aplicando la biotecnología en el proceso, pero no en el producto.

En el marco del 50 aniversario del CIATEJ, este proyecto representa una forma de hacer ciencia que articula excelencia académica, pertinencia social e innovación tecnológica.

Agradecimientos

Agradecimiento a los organismos financiadores Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL) y Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología (SICYT) del estado de Jalisco, México (Convenio 7270-2018).

Referencias

- Ahmed, M. F., Kantharajah, A. S., & Holford, P. (2012). Genetic Transformation Studies on Avocado Cultivar “Hass” (*Persea americana*). *American Journal of Plant Sciences*, 03(09), 1225–1231. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.39148>
- Burton, M. A., Rodríguez-López, C. E., Cetz-Chel, J. E., Urrea-López, R., & Pereira-Santana, A. (2025). Beyond the trinity: unraveling a fourth clade in the PEBP gene family in plants. *Plant Cell Reports*, 44(6), 122. <https://doi.org/10.1007/s00299-025-03505-x>
- Chaparro-Pulido, C. A., Montiel, M. M., Palomo-Ríos, E., Mercado, J. A., & Pliego-Alfaro, F. (2014). Development of an efficient transient transformation protocol for avocado (*Persea americana* Mill.) embryogenic callus. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 50(2), 292–298. <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9564-2>
- Cruz-Hernández, A., Witjaksono, Litz, R. E., & Gomez-Lim, M. (1998). *Agrobacterium tumefaciens* - Mediated transformation of embryogenic avocado cultures and regeneration of somatic embryos. *Plant Cell Reports*, 17(6–7), 497–503. <https://doi.org/10.1007/s002990050431>
- Efendi, D. (2003). Transformation and cryopreservation of embryogenic avocado (*Persea americana* Mill.) cultures [tesis de doctorado, University of Florida]. Repositorio institucional UF. <http://purl.fcla.edu/fcla/etd/UFE0001339>
- Hernández-Delgado, H. E., Zamora-Briseño, J. A., Figueroa-Yáñez, L. J., & Urrea-López, R. (2023). Vacuum-Forced Agroinfiltration for *In planta* Transformation of Recalcitrant Plants: Cacao as a Case Study. *Journal of Visualized Experiments*, (201), e66024. <https://doi.org/10.3791/66024>
- Hu, W. fei, Qin, Y. bo, Lin, J. jiang, Chen, T. ting, Li, S. feng, Chen, Y. tiao, Xiong, J., & Fu, G. fu. (2025). Unraveling the nexus of drought stress and rice physiology: mechanisms, mitigation, and sustainable cultivation. *Plant Stress*, 17, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100973>
- Palomo-Ríos, E., Barceló-M., Barceló-Muñoz, A., Pliego, C., Blanco-Portales, R., Caballero-Repullo, J. L., Ruano-Rosa, D., López-Herrea, C., Mercado, J. A., & Pliego-Alfaro, F. (2011). Transformación vía *Agrobacterium tumefaciens* para inducir tolerancia a la podredumbre blanca del aguacate. *Proceedings VII World Avocado Congress 2011*, 2011(September), 1–7.
- Palomo-Ríos, E., Barceló-Muñoz, A., Mercado, J. A., & Pliego-Alfaro, F. (2012). Evaluation of key factors influencing *Agrobacterium*-mediated transformation of somatic embryos of avocado (*Persea americana* Mill.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 109(2), 201–211. <https://doi.org/10.1007/s11240-011-0086-5>

- Palomo-Ríos, E., Cerezo, S., Mercado, J. A., & Pliego-Alfaro, F. (2017). *Agrobacterium*-mediated transformation of avocado (*Persea americana* Mill.) somatic embryos with fluorescent marker genes and optimization of transgenic plant recovery. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 128(2), 447–455. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1122-2>
- Prabhu, S. A., Ndlovu, B., Engelbrecht, J., & Van Den Berg, N. (2017). Generation of composite *Persea americana* (Mill.) (avocado) plants: A proof-of-concept-study. *PLoS ONE*, 12(10), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185896>
- Raharjo, S. H. T., Witjaksono, N. F. N., Gomez-Lim, M. A., Padilla, G., & Litz, R. E. (2008). Recovery of avocado (*Persea americana* Mill.) plants transformed with the antifungal plant defensin gene PDF1.2. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 44(4), 254–262. <https://doi.org/10.1007/s11627-008-9117-2>
- Raharjo, S., Witjaksono, Efendi, D., Suarez, I., Gasca-Vazquez, I., Gomez-Lim, M. A., & Litz, R. E. (2003). Genetic Transformation of Avocado. *Proceedings V World Avocado Congress*, 115–118. <https://doi.org/10.1201/9780203910979.ch23>
- Ramírez-Preciado, J. A., Rodríguez-Gandarilla, M. G., Tapia-Campos, E., & Urrea-López, R. (2025). Enhancing transient gene expression in mature leaves of Mexican lime (*Citrus aurantifolia*) through *Agrobacterium*-mediated transformation. *Plant Biotechnology Reports*, 19, 167–180. <https://doi.org/10.1007/s11816-025-00966-0>
- Rendón-Anaya, M., Ibarra-Laclette, E., Méndez-Bravo, A., Lan, T., Zheng, C., Carretero-Paulet, L., Perez-Torres, C. A., Chacón-López, A., Hernandez-Guzmán, G., Chang, T. H., Farr, K. M., Brad Barbazuk, W., Chamala, S., Mutwil, M., Shivhare, D., Alvarez-Ponce, D., Mitter, N., Hayward, A., Fletcher, S., & Herrera-Estrella, L. (2019). The avocado genome informs deep angiosperm phylogeny, highlights introgressive hybridization, and reveals pathogen-influenced gene space adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(34), 17081–17089. <https://doi.org/10.1073/pnas.1822129116>
- Salazar-González, J. A., Castro-Medina, M., Bernardino-Rivera, L. E., Martínez-Terrazas, E., Casson, S. A., & Urrea-López, R. (2023). *In-planta* transient transformation of avocado (*Persea americana*) by vacuum agroinfiltration of aerial plant parts. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 152(3), 635–646. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02436-9>
- Sánchez-Pérez, C. R., Castaño, E., Rodríguez-López, C. E., Urrea-López, R., & Pereira-Santana, A. (2025). Heavy Metal-Associated Proteins in Plants: Ge-

- nome-Wide Identification and Functional Insights from Angiosperms and Ancestral Plants. *Journal of Molecular Evolution*, 93(4), 527–542. <https://doi.org/10.1007/s00239-025-10260-w>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2025). *Panorama Agroalimentario 2025*. https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_dgsiap/2025.pdf
- Tamayo-Ramos, D. I., Salazar-González, J. A., Casson, S. A., & Urrea-López, R. (2022). Old and new horizons on *Persea americana* transformation techniques and applications. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 150(2), 253–266. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02268-7>
- Urrea-López, R. (2025). *Sistema y método de infiltración localizada por vacío*, Mexican Patent MX2023015160A. <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&t-doc=E&id=MX/a/2023/015160>
- Urrea-López, R. (2026). Localized Vacuum Infiltration as a Size-Independent Platform for *In Planta* Transient Gene Expression: Highlight of Patent MX2023015160A. *Recent Patents on Biotechnology*. <https://doi.org/10.2174/0118722083490752260714052319>
- Urrea-López, R., & Gatica-Arias, A. (2024). Addressing the UN sustainable development goals of woody plants through genetic engineering. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 158(3). <https://doi.org/10.1007/s11240-024-02849-8>
- Urrea-López, R., Salazar González, J. A., & Massange-Sánchez, J. A. (2026). Localized vacuum agroinfiltration: expanding transient gene expression to large woody perennials. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 164, 36. <https://doi.org/10.1007/s11240-026-03362-w>
- Ziv, D., Zviran, T., Zezak, O., Samach, A., & Irihimovitch, V. (2014). Expression profiling of *FLOWERING LOCUS T-like* gene in alternate bearing “Hass” avocado trees suggests a role for *PaFT* in avocado flower induction. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110613>