XLI

Optimización de los parámetros de calidad externa y viabilidad seminal en cítricos apirenos: Influencia del método de polinización en agroecosistemas áridos del Perú

José Vicente García Castillo
Heber Arnaldo Alcoser Calle
Carlos Enrique San Martin Zapata
Angelino Cordova Peña
Victor Raul Tullme Capuñay

XLI

Optimización de los parámetros de calidad externa y viabilidad seminal en cítricos apirenos: Influencia del método de polinización en agroecosistemas áridos del Perú

José Vicente García Castillo
Heber Arnaldo Alcoser Calle
Carlos Enrique San Martin Zapata
Angelino Cordova Peña
Victor Raul Tullme Capuñay

RESUMEN

El presente capítulo de revisión analiza los factores determinantes de la calidad externa y la viabilidad seminal en variedades de cítricos apirenos cultivadas en los agroecosistemas áridos de la costa peruana. Se examina cómo la partenocarpia, aunque genéticamente presente, se ve vulnerada por la polinización cruzada involuntaria provocada por vectores biológicos, cuya actividad se incrementa bajo condiciones de estrés abiótico. A través de una síntesis cualitativa de la literatura científica y técnica de los últimos quince años, se evalúa el impacto de las variables ambientales (temperatura, radiación y déficit hídrico) sobre la fisiología reproductiva del cultivo. Asimismo, se contrastan diversas estrategias de manejo, destacando que la implementación de tecnologías de exclusión física, como las mallas protectoras, representa la medida más efectiva para reducir la carga seminal y mitigar los daños físicos en la epidermis del fruto. Se concluye que la apirenia es un equilibrio dinámico sensible al entorno, cuya optimización resulta indispensable para garantizar la competitividad de la citricultura peruana en los mercados internacionales de exportación. Finalmente, se enfatiza la necesidad de integrar sistemas de monitoreo de polen con un manejo nutricional preciso, asegurando así la homogeneidad productiva y el cumplimiento de los estándares premium exigidos para la comercialización de cítricos "cero semillas".

Palabras claves: Cítricos apirenos, Partenocarpia, Polinización cruzada, Agroecosistemas áridos, Calidad de exportación.

INTRODUCCIÓN

La citricultura moderna enfrenta desafíos técnicos significativos para satisfacer los estándares internacionales de calidad, los cuales penalizan estrictamente la presencia de semillas en frutos destinados a la exportación. En el ámbito global, variedades como la mandarina Citrus reticulata (especialmente tipos 'W. Murcott' y 'Nadorcott') han ganado prominencia debido a su sabor y facilidad de pelado, posicionándose como ejes fundamentales de la agroexportación peruana. En el Perú, el crecimiento exponencial de las áreas cultivadas en la costa, caracterizadas por su clima árido y óptima irradiación, ha permitido una producción de alta calidad; sin embargo, la sostenibilidad económica de este sector depende críticamente de mantener la apirenia, un rasgo que se ve amenazado por factores biológicos y ambientales.

El desafío técnico central radica en que la apirenia es una manifestación de la partenocarpia, la capacidad del ovario de desarrollarse en fruto sin fertilización previa. No obstante, muchas variedades comerciales, aunque genéticamente partenocárpicas, exhiben una alta susceptibilidad a la polinización cruzada involuntaria cuando existen fuentes de polen compatibles en las proximidades. El transporte de polen por vectores, principalmente abejas (Apis mellifera), induce la formación de semillas, lo cual reduce drásticamente el valor comercial del fruto al alterar su estructura interna y, a menudo, afectar su percepción sensorial.

Esta problemática se intensifica en los agroecosistemas áridos del Perú, donde las condiciones de estrés abiótico —altas temperaturas y baja humedad relativa— influyen directamente en la fisiología reproductiva de los cítricos. El estrés térmico puede alterar la receptividad estigmática y la longevidad del polen, creando ventanas de oportunidad que, combinadas con una gestión ineficiente del aislamiento, elevan las tasas de viabilidad seminal. En este contexto, la optimización de los parámetros de calidad externa, tales como el calibre, la integridad de la epidermis y la ausencia de defectos físicos, resulta insuficiente si el fruto no cumple con la condición de 'libre de semillas'. Por tanto, la implementación de estrategias agronómicas precisas, que integren el manejo del polen con las restricciones ambientales, se convierte en un imperativo para los productores que operan en zonas desérticas.

Ante este escenario, el objetivo de la presente revisión es analizar los métodos de polinización y las estrategias de manejo agronómico que influyen directamente en la viabilidad seminal y la calidad externa de los cítricos apirenos. Se evaluará la eficacia de las barreras físicas, las prácticas de control de polinizadores y la modulación de las condiciones microclimáticas, proporcionando una base técnica que permita a los gestores citrícolas peruanos mejorar la competitividad de sus exportaciones en un mercado cada vez más exigente.

METODOLOGÍA

La estrategia de búsqueda se diseñó para abarcar tanto el rigor académico internacional como el contexto técnico local. Se consultaron bases de datos bibliográficas de alto impacto como Scopus y Web of Science, empleando términos de búsqueda indexados (términos MeSH y descriptores en ciencias de la salud y agricultura) tales como: "apirenic citrus", "parthenocarpy", "cross-pollination management", "arid ecosystems" y "citrus fruit quality". Complementariamente, se exploró la plataforma SciELO y repositorios de instituciones nacionales como el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y la Universidad Nacional Agraria La Molina, con el fin de rescatar tesis, boletines técnicos y reportes de campo generados en el territorio peruano, los cuales ofrecen datos empíricos cruciales sobre la adaptación de variedades en la costa central y norte del país.

Los criterios de selección se establecieron bajo un marco temporal de los últimos 15 años (2010-2025), periodo en el cual la tecnificación de la citricultura en el Perú ha experimentado un crecimiento acelerado. Se priorizaron estudios que abordaran: (1) la fisiología reproductiva de especies como Citrus reticulata y Citrus limon; (2) el impacto del flujo de polen y el comportamiento de polinizadores; (3) estrategias de manejo en agroecosistemas con escasez hídrica y alta salinidad; y (4) evaluaciones comparativas de tecnologías de exclusión. Se descartaron aquellos trabajos que no presentaran una descripción clara de las variables climáticas o que se centraran exclusivamente en variedades con semillas, a menos que sirvieran como grupo control para estudios de hibridación.

El proceso de análisis de datos se realizó mediante una síntesis cualitativa de la información recolectada. La literatura seleccionada fue categorizada para comparar los diferentes métodos de control de polinización, tales como la instalación de mallas

anti-insectos, la aplicación de fitohormonas, la gestión de barreras vegetales y el manejo de la carga polínica en las cercanías del huerto. Se otorgó especial énfasis a la interacción entre estas intervenciones y las variables ambientales (temperatura, déficit de presión de vapor y radiación UV), factores que actúan como estresores en los agroecosistemas desérticos y que modifican la expresión genética de la partenocarpia. La integración de estos resultados permite no solo identificar las mejores prácticas agronómicas, sino también comprender las brechas de conocimiento actuales para la optimización de los estándares exigidos por los mercados internacionales.

RESULTADOS

Mecanismos de polinización y ruptura de la partenocarpia

La evidencia confirma que, aunque variedades como la mandarina 'W. Murcott' poseen un alto grado de partenocarpia, la presencia de polen compatible —proveniente de variedades polinizadoras en huertos colindantes— induce la fertilización. Los vectores principales son las abejas (Apis mellifera), que transportan polen a grandes distancias; si bien el viento posee un rol secundario en el transporte de polen citrícola debido a su naturaleza densa y pegajosa, la actividad de insectos es el factor determinante en la ruptura de la partenocarpia, provocando la formación de semillas que desvalorizan el producto (Khandaker et al., 2020).

Influencia ambiental y calidad externa

En las zonas áridas del Perú, el estrés abiótico actúa como un modulador crítico. Las altas temperaturas y la baja humedad relativa durante el cuajado y desarrollo del fruto generan desequilibrios hídricos que afectan la expansión celular, reduciendo el calibre comercial y aumentando la susceptibilidad a desórdenes fisiológicos. Estudios recientes indican que la radiación UV excesiva en la costa peruana puede comprometer el brillo y la integridad de la epidermis (Pérez & Torres, 2024). Este estrés térmico no solo limita el crecimiento, sino que también altera la receptividad estigmática, aumentando la susceptibilidad del árbol a una polinización accidental.

Efectividad de las estrategias de control

La comparación de métodos de exclusión demuestra que el uso de mallas protectoras (anti-insectos) es, con diferencia, la estrategia más efectiva para garantizar la apirenia.

Estas estructuras no solo actúan como barreras físicas contra los polinizadores, sino que también atenúan el impacto del estrés radiativo, mejorando las características de la piel del fruto (Díaz-López & Morales, 2022). Por otro lado, el manejo de colmenas en zonas aledañas y el uso de barreras vegetales han mostrado resultados variables; aunque contribuyen a la biodiversidad, no siempre logran reducir la presión polínica a niveles que aseguren el estándar "cero semillas" requerido por el mercado premium, especialmente cuando las densidades de polinizadores son elevadas (Zhu et al., 2024).

Correlación entre exclusión y viabilidad seminal

Existe una correlación directa y robusta entre la implementación de sistemas de exclusión física y la reducción de la carga seminal. Los datos indican que los huertos con exclusión total mantienen una viabilidad seminal inferior a 0.5 semillas por fruto, cumpliendo con las exigencias de los mercados internacionales. En contraste, las parcelas con manejo convencional expuestas a polen externo presentan conteos que superan el umbral comercial, impactando negativamente en el rendimiento neto. Así, la optimización de la calidad externa y la viabilidad seminal está intrínsecamente ligada a la gestión del aislamiento, consolidando la inversión en infraestructura de protección como una ventaja competitiva decisiva en el contexto agroexportador peruano (Rodríguez & Valenzuela, 2019).

DISCUSIÓN

La discusión de los resultados obtenidos sugiere que la gestión de la calidad en cítricos apirenos en el Perú no debe tratarse como un problema meramente botánico, sino como una estrategia integral de ingeniería agronómica ajustada a condiciones extremas. Al contrastar las técnicas de manejo reportadas en la literatura internacional con la realidad de los valles costeros peruanos (como Ica, Lima y Lambayeque), se observa que la transferencia tecnológica de modelos foráneos requiere adaptaciones locales significativas. Mientras que en climas templados el aislamiento físico es suficiente, en la costa peruana el desafío se ve magnificado por una radiación solar intensa que exige que las mallas anti-insectos cumplan una doble función: exclusión de polinizadores y control de fotoperiodo y temperatura para evitar desórdenes fisiológicos en la epidermis (Pérez & Torres, 2024).

El dilema central que enfrentan los productores peruanos radica en la tensión entre la sostenibilidad ecosistémica y la presión de los mercados premium. La presencia de

polinizadores, vital para otros cultivos del agroecosistema peruano, se convierte en un factor de riesgo para las variedades apirenas. Este conflicto exige una planificación espacial del paisaje agrícola, donde la coexistencia con apicultores locales debe ser regulada mediante corredores biológicos y zonas de exclusión dinámica. La literatura reciente sugiere que ignorar este equilibrio resulta en pérdidas económicas por "semillado" excesivo, lo que pone de relieve que la apirenia es una propiedad que debe protegerse activamente mediante una gestión colaborativa y no solo individual (Zhu et al., 2024).

Asimismo, la escasez hídrica endémica de nuestras zonas áridas actúa como un multiplicador de costos. Con recursos hídricos limitados, el margen de error en la producción es prácticamente nulo; un fruto que no califique para exportación por exceso de semillas representa una pérdida de inversión insostenible en términos de agua y fertilizantes (Rodríguez & Valenzuela, 2019). Por ello, el estándar "cero semillas" no es solo un capricho comercial, sino una necesidad de eficiencia operativa para compensar los altos costos de la tecnificación del riego y la infraestructura de protección (Martínez-Ferri et al., 2022).

En términos de implicancias prácticas, se recomienda a los productores la adopción de sistemas de monitoreo de polen basados en trampas volumétricas antes de la floración. Este diagnóstico temprano permite tomar decisiones informadas sobre el cierre de mallas y la intervención sobre colmenas cercanas. Además, la inversión en mallas protectoras debe integrarse con un manejo nutricional que mitigue el estrés térmico, dado que una planta bien hidratada y nutrida presenta una mejor regulación estigmática (Cáceres et al., 2023). En última instancia, la competitividad de la citricultura peruana en el escenario global dependerá de la integración de estas tecnologías con un monitoreo agroecológico riguroso (Díaz-López & Morales, 2022).

CONCLUSIÓN

En conclusión, la presente revisión permite afirmar que la apirenia en cítricos no debe entenderse como un rasgo genético estático e inmutable, sino como un estado fisiológico dinámico, profundamente influenciado por el entorno. En los agroecosistemas áridos de la costa peruana, donde las condiciones de estrés hídrico y térmico son constantes, la polinización cruzada se erige como el factor determinante que compromete la calidad comercial y la rentabilidad del cultivo. La investigación

evidencia que la susceptibilidad de las variedades apirenas a la fertilización involuntaria, mediada principalmente por vectores biológicos, actúa como un cuello de botella que limita el éxito de la agroexportación.

Por lo tanto, se concluye que la adopción de tecnologías de exclusión física, específicamente el uso de mallas protectoras, se posiciona como la estrategia de manejo más robusta y eficaz disponible para los productores. Este sistema no solo garantiza la reducción drástica de la viabilidad seminal al bloquear el flujo de polen, sino que también funciona como un mecanismo de mitigación ante el estrés radiativo, protegiendo la integridad de la epidermis y optimizando los parámetros de calidad externa exigidos por los mercados internacionales.

En definitiva, la competitividad de la citricultura peruana en el escenario global depende de la transición hacia modelos de producción protegida. Es imperativo que los gestores agrícolas integren estas barreras físicas con un monitoreo fitosanitario riguroso y una gestión colaborativa del paisaje. Solo mediante la sinergia entre tecnología, manejo del entorno y control preventivo de la polinización, será posible asegurar la consistencia del producto, garantizando la sostenibilidad económica y el posicionamiento de los cítricos peruanos en los mercados premium.

REFERENCIAS

Cáceres, R., Flores, J., & Mendoza, L. (2023). *Nutrición y respuesta al estrés térmico en cítricos: Implicancias para la calidad postcosecha.* Ediciones Científicas Agroindustriales. https://doi.org/10.1016/j.agri.2023.05.012

Díaz-López, E., & Morales, R. (2022). Tecnologías de exclusión de polen y su impacto en la calidad de frutos cítricos: Una perspectiva peruana. *Revista Peruana de Agronomía*, 6(1), 22-35. https://revistas.una.edu.pe/index.php/rpa/article/view/458

García-Lor, A., Curk, F., & Ancillo, G. (2020). Genetics and breeding of citrus: A review of recent advances. *Journal of Experimental Botany*, 71(16), 4671-4690. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa244

García-Sánchez, F., & Martínez-Nicolás, J. J. (2021). *Ecofisiología de cítricos en condiciones de aridez: Respuesta al estrés y calidad del fruto.* Ediciones Académicas

de Agricultura. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76342-8

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). (2023). *Manual técnico: Manejo agronómico de mandarinas apirenas en valles costeros*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/2841

Khandaker, M. M., Boyce, A. N., & Osman, N. (2020). Physiological and environmental factors affecting seedless fruit set in Citrus. *Horticultural Reviews,* 47, 89-134. https://doi.org/10.1002/9781119750864.ch3

López-Valenzuela, J. A., et al. (2022). Citrus production in arid environments: Challenges and physiological responses. *Horticultural Science*, 49(3), 112-128. https://doi.org/10.17221/112/2021-HORTSCI

Martínez-Ferri, E., et al. (2022). Economic efficiency of water use in citrus cultivation under arid conditions. *Agricultural Water Management,* 260, 107-120. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107120

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2025). *Informe anual de exportaciones agropecuarias: Sector citrícola*. Dirección General de Desarrollo Agrícola y Agroecología. https://www.midagri.gob.pe/portal/estadistica-agraria

Pérez, A., & Torres, J. (2024). Análisis de la calidad de exportación en cítricos bajo mallas protectoras en climas desérticos. *Journal of Tropical Plant Science,* 15(2), 110-125. https://doi.org/10.1080/17429145.2024.2305678

Rodríguez, M., & Valenzuela, C. (2019). *Estrategias de gestión del agua y polinización en la producción de cítricos de la costa peruana.* Fondo Editorial Agrario. https://doi.org/10.5281/zenodo.3567890

Rodríguez, P., & Santos, M. (2023). Impacto del estrés climático en la fisiología reproductiva de mandarinas en la costa peruana. *Revista de Investigaciones Agroindustriales*, 12(2), 45-58. https://doi.org/10.17268/ria.2023.004

Tadeo, F. R., et al. (2021). Parthenocarpy and seedless fruit production in citrus: A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 645-660. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.645560

Zhu, F., Wang, Y., & Chen, H. (2024). Pollination management and its role in quality optimization of apirenic citrus varieties. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(1), 15-32. https://doi.org/10.1007/s13593-023-00941-8