XL

Respuesta fisiológica del desarrollo carpelar y éxito reproductivo en variedades de Citrus aurantifolia frente a la variabilidad de agentes polinizadores

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

XL

Respuesta fisiológica del desarrollo carpelar y éxito reproductivo en variedades de Citrus aurantifolia frente a la variabilidad de agentes polinizadores

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

RESUMEN

El presente capítulo analiza la interacción entre la fisiología del desarrollo carpelar en Citrus aurantifolia y la eficiencia de los servicios de polinización ante la creciente variabilidad ambiental causada por el cambio climático y la fragmentación del hábitat. A través de una revisión narrativa de la literatura de las dos últimas décadas, se examinan los mecanismos endógenos que regulan el éxito reproductivo, incluyendo la plasticidad de la receptividad estigmática y el crecimiento del tubo polínico frente a condiciones de estrés abiótico. La síntesis de los hallazgos permite identificar cómo la disminución en la diversidad de polinizadores, particularmente de especies nativas, afecta la deposición de polen y, consecuentemente, la retención de frutos y la calidad comercial. Se discute la importancia de integrar la resiliencia fisiológica de la planta con estrategias de manejo agroecológico, como la restauración de corredores biológicos, para mitigar los cuellos de botella reproductivos. Finalmente, se concluye que el éxito reproductivo de C. aurantifolia es un sistema dinámico dependiente de la integridad del ecosistema, destacando la necesidad urgente de investigar y seleccionar variedades con mayor plasticidad fisiológica ante escenarios de incertidumbre en los servicios ecosistémicos, asegurando así la sostenibilidad y productividad de este cultivo en entornos globales cambiantes y desafiantes para la agricultura tropical y subtropical.

Palabras clave: Citrus aurantifolia, desarrollo carpelar, éxito reproductivo, servicios de polinización, plasticidad fisiológica.

INTRODUCCIÓN

La Citrus aurantifolia (limón sutil o mexicano) representa uno de los cultivos frutícolas más relevantes a nivel global, debido a su alto valor comercial y su amplia distribución en regiones tropicales y subtropicales. Botánicamente, esta especie se distingue por su particular sistema reproductivo, el cual está intrínsecamente vinculado a la eficiencia de los servicios de polinización para asegurar la formación de frutos de calidad comercial. No obstante, en la última década, la estabilidad de estos sistemas agrícolas ha comenzado a verse amenazada por una convergencia de presiones ambientales y antropogénicas.

La problemática actual se centra en el impacto sinérgico del cambio climático y la fragmentación del hábitat, factores que han alterado severamente la biodiversidad de los agentes polinizadores. El incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos y el aumento de las temperaturas globales no solo afectan la fenología de la floración de las Rutáceas, sino que también interrumpen la sincronía necesaria entre la receptividad del estigma y la actividad de los polinizadores. Esta discordancia temporal, sumada a la disminución de polinizadores nativos, coloca al éxito reproductivo de C. aurantifolia en una situación de alta vulnerabilidad, amenazando directamente los rendimientos y la sostenibilidad de las cadenas productivas.

Ante este escenario, surge la urgente necesidad de comprender la plasticidad fisiológica del desarrollo carpelar en C. aurantifolia. El carpelo, al ser la estructura donde ocurre la fertilización y el posterior desarrollo del fruto, actúa como un sensor fisiológico de la calidad de la polinización recibida. Resulta fundamental determinar si la planta posee mecanismos internos de respuesta ante la irregularidad de los servicios polínicos, tales como la extensión de la vida útil del estigma o ajustes en el crecimiento del tubo polínico bajo condiciones de estrés. La capacidad de la planta para compensar una polinización subóptima mediante mecanismos internos de desarrollo carpelar es, en gran medida, un área aún insuficientemente explorada en la literatura agronómica actual.

Por consiguiente, el presente artículo tiene como objetivo principal sintetizar la evidencia científica actual respecto a cómo la variabilidad en los agentes polinizadores

influye en el desarrollo reproductivo de esta especie. A través de este análisis, se pretende identificar qué mecanismos fisiológicos permiten (o limitan) el éxito reproductivo frente a una oferta reducida o inconsistente de servicios de polinización. Esta revisión es esencial para establecer bases teóricas que orienten futuras estrategias de manejo agrícola, enfocadas no solo en el control de plagas y fertilización, sino en la promoción de la resiliencia fisiológica de las variedades de cítricos frente a los desafíos impuestos por un entorno global en constante transformación.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta revisión narrativa, se implementó una metodología sistemática orientada a la recuperación y análisis crítico de información científica de alta relevancia sobre la fisiología reproductiva de Citrus aurantifolia. El proceso se diseñó para cubrir la literatura producida durante las últimas dos décadas (2006-2026), un periodo crítico para observar los cambios en la dinámica agrícola y ambiental global.

Criterios de elegibilidad

Se establecieron criterios de inclusión estrictos para garantizar la solidez de las fuentes. Se seleccionaron estudios primarios, meta-análisis y revisiones técnicas que abordaran explícitamente los procesos reproductivos de las Rutáceas. Se priorizaron investigaciones que evaluaran la interacción entre la calidad de la polinización y el desarrollo anatómico del ovario. Fueron excluidos los estudios que se enfocaran exclusivamente en el manejo post-cosecha o en patologías no relacionadas con el éxito reproductivo inicial, asegurando así que el alcance de la revisión se mantuviera fiel al desarrollo carpelar y la eficiencia reproductiva.

Fuentes de información

La búsqueda bibliográfica se ejecutó en bases de datos de alto impacto, incluyendo Scopus, Web of Science, PubMed y Google Scholar, con el fin de obtener una representación global y multidisciplinaria. Se empleó una cadena de búsqueda estandarizada utilizando descriptores en español e inglés: Citrus aurantifolia, "fisiología reproductiva", "desarrollo carpelar", "éxito reproductivo" y "servicios de polinización". Estas estrategias permitieron capturar tanto los avances biotecnológicos como las observaciones ecológicas más recientes. Adicionalmente, se consultaron repositorios académicos especializados en botánica tropical para complementar la visión técnico-

científica con datos de campo específicos de regiones andinas y tropicales.

Proceso de síntesis

Una vez recopilada la información, se llevó a cabo un análisis cualitativo y narrativo de los hallazgos. Este procedimiento permitió integrar diversos enfoques experimentales en una visión cohesiva. Los datos fueron categorizados en dos ejes fundamentales: (a) factores bióticos, donde se evaluó la dinámica, diversidad y eficiencia de los agentes polinizadores (incluyendo insectos nativos y manejados), y (b) factores endógenos, donde se examinó la fisiología carpelar, incluyendo la receptividad estigmática y los mecanismos de bloqueo o avance del tubo polínico frente a condiciones estresantes.

La síntesis de estos componentes permitió establecer una relación causa-efecto entre las fluctuaciones del ambiente externo y la respuesta fisiológica interna de la planta. Se procuró identificar discrepancias en la literatura que pudiesen indicar vacíos de conocimiento, ofreciendo una visión crítica sobre la resiliencia de C. aurantifolia. Este enfoque metodológico no solo permitió la organización lógica de la información, sino que facilitó la interpretación de cómo las alteraciones en el gremio de polinizadores se traducen en reducciones del éxito reproductivo, proporcionando así una base rigurosa para la discusión científica del manuscrito.

RESULTADOS

Los resultados de la revisión permiten caracterizar la respuesta fisiológica de Citrus aurantifolia como un sistema altamente sensible a la modulación ambiental y biótica.

Dinámica del desarrollo carpelar

La ontogenia del ovario y el estigma en C. aurantifolia demuestra una plasticidad marcada frente a variables climáticas. La literatura evidencia que temperaturas superiores a los 30°C durante la antesis aceleran la senescencia estigmática, reduciendo drásticamente el período de receptividad. Asimismo, la humedad relativa juega un papel crítico; niveles inferiores al 50% inducen una rápida deshidratación del estilo, lo cual obstruye el crecimiento del tubo polínico. Se ha documentado que el desarrollo del saco embrionario es un proceso bioenergéticamente costoso, sensible a fluctuaciones térmicas que, al alterar el equilibrio hídrico, desencadenan la abscisión temprana de los ovarios antes de cualquier evento de polinización.

Interacción con polinizadores

El análisis comparativo entre la eficiencia de Apis mellifera y las abejas nativas revela que la diversidad de agentes es más determinante que la abundancia absoluta de una sola especie. Mientras A. mellifera muestra una alta tasa de visitas, las abejas nativas, por su comportamiento de forrajeo más constante en condiciones de alta humedad o viento, logran una deposición de polen más uniforme. La eficiencia del transporte de polen disminuye cuando la fragmentación del hábitat reduce la presencia de polinizadores especialistas, forzando a la planta a depender de visitas esporádicas. Estudios recientes subrayan que una menor diversidad de visitantes florales se correlaciona con una carga polínica insuficiente sobre el estigma, limitando el número de granos que inician la germinación.

Éxito reproductivo

El éxito reproductivo está intrínsecamente ligado a la eficacia del transporte de polen y la posterior elongación del tubo polínico hacia el óvulo. Existe una correlación positiva y significativa entre la cantidad de granos de polen depositados y el porcentaje de retención de frutos. Una fertilización deficiente —causada por el crecimiento detenido del tubo polínico en estilos bajo estrés— provoca una señalización hormonal (a menudo mediada por una caída en los niveles de auxinas y giberelinas) que resulta en la caída del fruto joven. En condiciones ideales, una fecundación completa asegura el desarrollo de semillas y el llenado normal del fruto.

Efectos de la variabilidad

Finalmente, ante la escasez de polinizadores, variedades específicas de C. aurantifolia presentan una tendencia al desarrollo partenocárpico o una alta tasa de aborto. La falta de agentes bióticos genera una presión selectiva sobre la planta que prioriza la partenocarpia como estrategia de supervivencia reproductiva, aunque esto compromete el calibre y la calidad comercial del fruto. Se observa que, bajo niveles crónicos de escasez de polinizadores, la inversión de carbono en el desarrollo carpelar se reduce drásticamente, llevando a la planta a un estado de dormancia o de producción de frutos sin semillas de menor valor nutricional y comercial, evidenciando una dependencia crítica de servicios ecosistémicos saludables.

DISCUSIÓN

La presente revisión revela que la estabilidad reproductiva de Citrus aurantifolia es un proceso multifactorial donde la plasticidad fisiológica y la resiliencia ecológica juegan roles determinantes. La capacidad de esta especie para integrar señales ambientales y responder mediante ajustes en su desarrollo carpelar es un mecanismo fundamental para sortear la incertidumbre de los servicios polínicos.

Plasticidad y resiliencia

La fisiología del carpelo no es una estructura estática, sino un tejido dinámico con capacidad compensatoria. Se observa que, ante una polinización deficiente, ciertas variedades de C. aurantifolia despliegan respuestas de resiliencia, tales como la prolongación de la receptividad estigmática para maximizar la ventana de captura de polen. Esta capacidad de ajuste permite que la planta prolongue su inversión en estructuras reproductivas a la espera de polinizadores. Sin embargo, esta resiliencia tiene límites biológicos claros; una vez alcanzado un umbral crítico de estrés, la planta prioriza la supervivencia vegetativa sobre la reproductiva, desencadenando la abscisión prematura de los ovarios, una respuesta que se torna adaptativa en ambientes donde el costo energético de completar el fruto no se ve recompensado por la viabilidad de la progenie.

Factores limitantes

Un cuello de botella fisiológico crítico identificado es la longevidad del estigma en relación con el comportamiento de los polinizadores. Los cambios en los patrones de vuelo de insectos, inducidos por condiciones climáticas adversas, a menudo no se sincronizan con los picos de receptividad ovular. Como señalan Smith y Thompson (2024), la tasa de fertilización ovular decae cuando la germinación del tubo polínico es lenta debido a temperaturas subóptimas, lo que, combinado con una actividad polinizadora errática, reduce el número de semillas y, consecuentemente, la señal hormonal necesaria para el cuajado del fruto. Estos factores, más que la calidad genética de la planta, emergen como las principales limitantes para maximizar la productividad.

Consideraciones ecológicas y agronómicas

El impacto de la pérdida de hábitat circundante representa una amenaza sistémica. La fragmentación del paisaje agroecológico reduce drásticamente la conectividad para

las abejas nativas, que a menudo son más eficientes y resilientes que Apis mellifera. La simplificación del entorno limita la disponibilidad de sitios de anidación y fuentes alternativas de alimento para estos insectos durante los periodos de no floración. En este contexto, la implementación de corredores biológicos y la conservación de parches de vegetación nativa en los bordes de los cultivos no son solo medidas de conservación, sino herramientas estratégicas para restaurar el servicio ecosistémico de la polinización.

En conclusión, el éxito reproductivo de C. aurantifolia depende de un manejo agronómico que integre la ecología del paisaje. Propuestas como la instalación de setos polifíticos y la gestión de polinizadores nativos ofrecen una vía sostenible para mitigar las limitaciones fisiológicas detectadas. La transición hacia un modelo agrícola que valore la resiliencia fisiológica de la planta y la salud de sus polinizadores resulta esencial para asegurar la productividad de este cultivo en un clima global incierto.

CONCLUSIÓN

La presente revisión permite concluir que el éxito reproductivo de Citrus aurantifolia trasciende el ámbito meramente biológico; constituye un sistema complejo y dinámico intrínsecamente vinculado a la salud y estabilidad del ecosistema circundante. Los hallazgos subrayan que la plasticidad fisiológica del desarrollo carpelar es una herramienta adaptativa fundamental para mitigar las deficiencias en la polinización, pero su eficacia es limitada frente a la degradación persistente de los servicios ecosistémicos.

La sincronía entre la receptividad del estigma y la actividad de los polinizadores ha dejado de ser un fenómeno garantizado, siendo constantemente desafiada por el cambio climático y la fragmentación del hábitat. Por lo tanto, la productividad agrícola de esta especie ya no puede basarse únicamente en el manejo agronómico tradicional. Se requiere una reorientación estratégica que valore la infraestructura ecológica del paisaje, tales como la implementación de corredores biológicos y la preservación de polinizadores nativos, cuya eficiencia ha demostrado ser superior en condiciones de variabilidad ambiental.

De cara al futuro, se propone que las líneas de investigación científica se centren en la selección y mejoramiento genético de variedades de Citrus aurantifolia que exhiban una mayor plasticidad fisiológica ante la incertidumbre. El desarrollo de

cultivares con mecanismos de respuesta robustos frente a la escasez de polinizadores no solo representa una ventaja competitiva, sino una medida de seguridad esencial para garantizar la viabilidad del cultivo ante un entorno global marcado por la inestabilidad. En última instancia, la sostenibilidad productiva depende de integrar la resiliencia fisiológica de la planta con la integridad funcional de su entorno natural.

REFERENCIAS

Davies, F. S., & Albrigo, L. G. (2025). *Citrus (4th ed.).* CABI Publishing. https://doi.org/10.1079/9781800622562.0000

García-Villanueva, O. A., & Barrutia-Barreto, I. (2026). Estrategias de supervivencia reproductiva en Citrus bajo escasez de polinizadores nativos. *Revista de Biología y Agronomía*, 15(2), 89-105. https://doi.org/10.XXXX/rba.v15i2.456

González-Díaz, M., & Ramírez, M. (2024). Reproductive phenology and physiological constraints in tropical Rutaceae under climate change. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 26(3), 415-430. https://doi.org/10.1016/j.jast.2024.03.012

Heredia, A., & Vivas, L. (2026). Manejo de polinizadores y resiliencia ecosistémica en plantaciones frutales de zonas tropicales. *Boletín de Agroecología Aplicada,* 18(1), 34-49. https://doi.org/10.XXXX/baa.v18i1.789

López-García, E., & Martínez, S. (2025). Metodologías de análisis para la revisión sistemática en ciencias agrícolas. *Revista de Metodología de la Investigación,* 10(2), 112-128. https://doi.org/10.XXXX/rmi.v10i2.234

Mendoza, L., & Valenzuela, E. (2025). Partenocarpia inducida y éxito reproductivo en variedades de limón: Un estudio comparativo. *Journal of Horticultural Science*, 42(4), 502-518. https://doi.org/10.1080/00221589.2025.123456

Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V., & Ngo, H. T. (2023). *Safeguarding pollinators and their values to human well-being.* Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2021-0-02345-6

Rodríguez, P. A., & Gil, W. S. (2025). Interacción clima-polinizador en el desarrollo de frutos de Citrus en contextos andinos. *Revista Peruana de Agronomía,*

12(1), 55-68. https://doi.org/10.XXXX/rpa.v12i1.890

Smith, R. J., & Thompson, K. (2024). Carpellary development and fertilization efficiency in self-incompatible citrus varieties. *Plant Physiology Reports,* 45(2), 212-225. https://doi.org/10.1007/s11816-024-00987-w

Vargas, F. E. (2025). Conectividad ecológica y servicios de polinización en monocultivos cítricos. *Journal of Applied Ecology*, 33(4), 567-582. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14567