



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

**PARTENOCARPIA INDUCIDA POR ÁCIDO
NAFTALENACÉTICO EN HÍBRIDOS OXG DE
PALMA ACEITERA (ELAEIS OLEIFERA X
ELAEIS GUINEENSIS JACQ.): INTEGRACIÓN
DE LA FISIOLOGÍA REPRODUCTIVA,
SEÑALIZACIÓN AUXÍNICA Y
TRANSCRIPTÓMICA FUNCIONAL**

**NAPHTHALENEACETIC ACID-INDUCED PARTHENOCARPY
IN OIL PALM OXG HYBRIDS (ELAEIS OLEIFERA × ELAEIS
GUINEENSIS JACQ.): INTEGRATION OF REPRODUCTIVE
PHYSIOLOGY, AUXIN SIGNALING, AND FUNCTIONAL
TRANSCRIPTOMICS**

Luis Villareal-Villafuerte
Director Técnico Agrícola – Propalma

Partenocarpia inducida por ácido naftalenacético en híbridos OxG de palma aceitera (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis* Jacq.): integración de la fisiología reproductiva, señalización auxínica y transcriptómica funcional

Luis Villareal-Villafuerte¹

l.villareal@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0002-9456-1727>

Director Técnico Agrícola - Propalma

RESUMEN

Los híbridos interespecíficos OxG (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) son estratégicos en la palmiticultura por su tolerancia a la Pudrición del Cogollo y la calidad de su aceite. No obstante, su limitada eficiencia reproductiva impulsó la inducción de partenocarpia mediante ácido naftalenacético (NAA) para optimizar la productividad. Esta revisión integra los avances fisiológicos, moleculares y transcriptómicos de la acción del NAA en inflorescencias de híbridos OxG. La evidencia indica que este fitorregulador actúa como sustituto funcional de las señales de fecundación, activando la vía canónica auxínica mediante receptores TIR1/AFB, la degradación de proteínas AUX/IAA y la modulación de factores ARF involucrados en el desarrollo del fruto. El *cross-talk* entre auxinas, giberelinas y citoquininas favorece la reprogramación transcripcional asociada a la división celular, expansión del ovario, establecimiento del mesocarpio y transporte de fotoasimilados. Análisis transcriptómicos recientes identifican redes génicas determinantes en la formación del fruto partenocárpico. En conclusión, la evidencia posiciona al NAA como una herramienta biotecnológica clave para integrar la fisiología reproductiva y el manejo agronómico avanzado, identificando a los enfoques multi-ómicos como áreas prioritarias para futuras investigaciones.

Palabras clave: Fisiología reproductiva, IAA, NAA, Polinización artificial, Regulador de crecimiento.

¹ Autor principal

Correspondencia: l.villareal@outlook.com

Naphthaleneacetic Acid-Induced Parthenocarpy in Oil Palm OxG Hybrids (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* Jacq.): Integration of Reproductive Physiology, Auxin Signaling, and Functional Transcriptomics

ABSTRACT

Interspecific OxG (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) hybrids are strategic in modern palm oil cultivation due to their tolerance to Bud Rot disease and high-quality oil profile. However, their limited reproductive efficiency has prompted the induction of parthenocarpy using naphthaleneacetic acid (NAA) to optimize crop productivity. This review integrates recent physiological, molecular, and transcriptomic advances regarding NAA action in female inflorescences of OxG hybrids. Current evidence indicates that this plant growth regulator acts as a functional substitute for fertilization-derived signals, triggering the canonical auxin signaling pathway via TIR1/AFB receptors, inducing AUX/IAA protein degradation, and modulating ARF transcription factors involved in fruit development. Furthermore, hormonal cross-talk among auxins, gibberellins, and cytokinins drives the transcriptional reprogramming of cell division, ovary expansion, mesocarp establishment, and photoassimilate translocation. Recent transcriptomic analyses have identified key gene regulatory networks governing parthenocarpic fruit set. In conclusion, scientific evidence positions NAA as a pivotal biotechnological tool that bridges reproductive physiology and advanced agronomic management, while highlighting functional transcriptomics and multi-omic approaches as priority areas for future research.

Keywords: Artificial pollination, IAA, NAA, Plant growth regulator, Reproductive physiology.

Artículo recibido 20 mayo 2026

Aceptado para publicación: 20 junio 2026



INTRODUCCIÓN

Los híbridos interespecíficos OxG (*Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis*) constituyen una innovación genética estratégica para la sostenibilidad de la agroindustria palmera en América Latina, destacándose por su resistencia parcial a la Pudrición del Cogollo (PC) y la producción de aceites con alto contenido de ácidos grasos insaturados. Este avance genético representa un hito fitosanitario decisivo para las regiones tropicales húmedas productoras de palma aceitera (Torres et al., 2020).

Sin embargo, su máximo aprovechamiento está condicionado por severas limitaciones reproductivas, tales como la esterilidad parcial masculina, una reducida viabilidad del polen y una baja eficiencia en la fecundación natural. Este comportamiento asincrónico restringe el flujo óptimo de polen viable en plantaciones comerciales (Forero et al., 2021). Estas restricciones biológicas provocan que una proporción considerable de flores femeninas no complete exitosamente el proceso reproductivo, lo que se traduce en caídas significativas en la conformación y en el rendimiento del potencial de aceite de los racimos (Barcelos et al., 2015; Hormaza et al., 2022; Rincón et al., 2017; Romero et al., 2021; Montoya et al., 2023).

Desde una perspectiva de la fisiología vegetal, la fecundación natural genera señales hormonales endógenas primordiales dominadas por auxinas, giberelinas y citoquininas que estimulan la división celular, la expansión celular y el establecimiento de sumideros metabólicos en el ovario (Taiz et al., 2018; Figueiredo y Köhler, 2018). La dinámica espacial de estos fitorreguladores es consistente con la diferenciación temprana de los tejidos reproductivos en el ovario (Blázquez et al., 2020).

En cambio, ante la deficiencia de polinización en los híbridos OxG, estas señales disminuyen drásticamente, lo que activa mecanismos de aborto floral destinados a evitar inversiones energéticas y nutricionales innecesarias (Leyser, 2018; Napier y Kepinski, 2018). Esta respuesta de senescencia programada actúa como una salvaguarda metabólica ante la ausencia de señales cigóticas (Romero et al., 2021).

Para superar esta limitante, la aplicación exógena de ácido naftalenacético (NAA) ha emergido como una de las estrategias agronómicas más exitosas, al actuar como una auxina sintética de alta estabilidad, el NAA imita las señales fisiológicas producidas normalmente por las semillas en desarrollo, estimulando el crecimiento del ovario en ausencia de fecundación efectiva e induciendo

la partenocarpia (Thomas et al., 1973; Montoya et al., 2023). Sin embargo, la homogeneidad en la aplicación de este compuesto en las inflorescencias femeninas es un factor determinante para uniformizar la arquitectura del racimo (Chávez et al., 2024).

Este fenómeno de partenocarpia inducida resulta crucial para la agroindustria, dado que favorece la formación de frutos con una elevada proporción de mesocarpio, el tejido responsable de acumular la mayor parte del aceite de interés comercial. Recientemente, la transcriptómica ha permitido revelar que la respuesta celular al NAA trasciende el simple crecimiento, involucrando una profunda reprogramación de redes moleculares asociadas con la percepción hormonal, la regulación transcripcional y el desarrollo del fruto (Saddik et al., 2021; Montoya et al., 2023). En este contexto, la presente revisión tiene como objetivo integrar el conocimiento científico disponible sobre los mecanismos fisiológicos, moleculares y agronómicos asociados a la acción del NAA en híbridos OxG, enfatizando su rol biotecnológico para garantizar la productividad sostenible del cultivo de palma aceitera.

Bases fisiológicas y mecanismos moleculares de la señalización auxínica inducida por NAA

En el ciclo reproductivo de las angiospermas, la transición de una flor funcional a un fruto en crecimiento depende de una intensa actividad hormonal desencadenada por la doble fecundación, en condiciones normales, el incremento local de ácido indol-3-acético (IAA) y la subsecuente biosíntesis de giberelinas y citoquininas actúan coordinadamente para evitar el aborto floral, estimulando la división celular temprana y estableciendo nuevos sumideros metabólicos (Figueiredo y Köhler, 2018; Weijers y Wagner, 2016; Pandolfini, 2009; Su et al., 2011; An et al., 2020; Robert et al., 2021).

En los híbridos OxG, la aplicación exógena de ácido naftalenacético (NAA) compensa la ausencia de estas señales embrionarias; gracias a su elevada estabilidad fisiológica, esta auxina sintética se moviliza a través de transportadores celulares y actúa como un sustituto funcional prolongado de las auxinas naturales (Davies, 2016; Napier y Kepinski, 2018; Thomas et al., 1973; Romero et al., 2021) (Tabla uno). A diferencia del IAA nativo, el NAA elude la degradación enzimática rápida por las vías de la IAA-oxidasa, prolongando su vida útil a nivel celular (Vanneste y Friml, 2020).

A nivel molecular, la capacidad del NAA para inducir la partenocarpia radica en su integración directa con la ruta canónica de señalización auxínica, una vez dentro de la célula, el NAA interactúa con los receptores de la familia TIR1/AFB, los cuales forman parte del complejo ubiquitina ligasa SCF (SKP1-Cullin-F-box) (Leyser, 2018; Quareshy et al., 2018). La tasa de ocupación de estos correceptores nucleares logra modular la intensidad del estímulo partenocárpico (Salehin et al., 2021). Esta interacción incrementa la afinidad del receptor por las proteínas represoras AUX/IAA, promoviendo su rápida ubiquitinación y posterior degradación mediante el sistema proteasomal (Napier y Kepinski, 2018). Este aclaramiento de represores ocurre en un margen de minutos tras la absorción efectiva del fitorregulador (Galli et al., 2024). La eliminación de estas proteínas represoras constituye el punto de control central de la señalización, ya que libera a los Factores de Respuesta a Auxinas (ARF), permitiéndoles unirse a regiones promotoras del ADN y desencadenar una reprogramación transcripcional masiva en los tejidos reproductivos (Weijers y Wagner, 2016; Leyser, 2018; Montoya et al., 2023).

La especificidad de los ARF activados determina la diferenciación morfofuncional del mesocarpio en desarrollo (Kato et al., 2022). La activación sostenida de la red ARF se traduce inmediatamente en respuestas fisiológicas orientadas al desarrollo del fruto partenocárpico, por otro lado, se estimula la capacidad mitótica del ovario mediante la expresión de ciclinas y quinasas, multiplicando aceleradamente las células que conformarán el mesocarpio (Montoya et al., 2023).

Simultáneamente, el NAA induce la expansión celular al activar hidrolasas, expansinas y xiloglucano endotransglucosilasas que facilitan el aflojamiento de la pared celular, a la par que promueve la diferenciación vascular que probablemente contribuye el transporte de fotoasimilados (Davies, 2016; Taiz et al., 2018; An et al., 2020). Con la remodelación de estos polímeros estructurales disminuye la presión de turgencia del tejido y se permite la inducción de entrada de agua (Du et al., 2023). Estudios transcriptómicos actuales confirman que la acción del NAA es consistente con una red de regulación fitohormonal que activa el crecimiento celular y establece un diálogo cruzado (*cross-talk*) con las rutas de giberelinas, citoquininas y etileno para sostener el desarrollo del racimo (Apriyanto et al., 2023; Sharif et al., 2022).

Tabla 1. - Comparación fisiológica entre la fecundación natural y la partenocarpia inducida por NAA en híbridos OxG.

Variable	Fecundación	Partenocarpia inducida por NAA
Fuente inicial de señal hormonal.	Embrión y endospermo en desarrollo.	Aplicación exógena de NAA.
Producción de auxinas.	Endógena.	Exógena (auxina sintética).
Desarrollo de semilla.	Presente.	Ausente o reducido.
Activación de genes de crecimiento.	Inducida por fecundación.	Inducida por señal hormonal artificial.
División celular del ovario.	Sí.	Sí.
Expansión celular.	Sí.	Sí.
Formación de mesocarpio.	Sí.	Sí.
Desarrollo de frutos.	Dependiente de fecundación.	Independiente de fecundación.
Contenido potencial de aceite.	Alto.	Alto.
Riesgo de aborto floral.	Bajo tras fecundación exitosa.	Bajo tras aplicación homogénea en la inflorescencia.
Dependencia de polinización/inducción.	Alta.	Alta.
Aplicabilidad en híbridos OxG.	Limitada por fertilidad y viabilidad natural.	Alta.

***Nota.** La partenocarpia inducida mediante NAA reproduce parcialmente las señales fisiológicas generadas por semillas en desarrollo, permitiendo activar procesos de crecimiento del fruto aún en ausencia de fecundación efectiva. Adaptado de Thomas et al. (1973), Romero et al. (2021), Figueiredo y Köhler (2018) y Montoya et al. (2023).*

Interacción hormonal cruzada (*cross-talk*): Sinergia molecular entre auxinas, giberelinas y citoquininas

Aunque la aplicación de ácido naftalenacético (NAA) constituye el factor desencadenante primario para la inducción de la partenocarpia, estudios en fisiología demuestran que esta auxina sintética no opera de manera aislada dentro de las células del ovario. Por el contrario, la percepción del NAA a través de los receptores TIR1/AFB activa una extensa red de comunicación multihormonal o *cross-talk*. Este diálogo molecular es fundamental porque el crecimiento de un órgano tan complejo como el fruto de la palma aceitera requiere la orquestación temporal y espacial de múltiples reguladores. De tal forma que la señalización auxínica constituye uno de los principales reguladores que coordinan activamente la biosíntesis y las respuestas asociadas a las giberelinas, las citoquininas y el etileno (An et al., 2020; Kumar et al., 2021; Sharif et al., 2022).

El primer nivel de interacción hormonal ocurre entre las auxinas y las giberelinas durante las etapas tempranas, donde la regulación transcripcional concertada activa las enzimas giberelina-20-oxidasas que impulsan el cuajado artificial del fruto (Martínez-Bello et al., 2021). Después de la percepción del ácido naftalenacético (NAA) por los receptores TIR1/AFB y la consecuente degradación de las proteínas AUX/IAA, los factores de respuesta a auxinas (ARF) regulan la expresión de numerosos genes implicados en el desarrollo del ovario, incluyendo aquellos asociados con la biosíntesis y la señalización de giberelinas (He y Yamamuro, 2022; Baral et al., 2025).

Diversos estudios han demostrado que estas interacciones favorecen el establecimiento del fruto mediante la coordinación de programas transcripcionales que controlan la división y diferenciación celular, reproduciendo parcialmente las señales fisiológicas que normalmente son inducidas por la fecundación (Dorcey et al., 2009; Figueiredo y Köhler, 2018).

El incremento de la actividad giberelínica potencia posteriormente la expansión celular al promover la degradación de las proteínas DELLA, principales represoras de esta vía de señalización, permitiendo la activación de genes relacionados con la extensibilidad de la pared celular, el crecimiento del ovario y la diferenciación de los tejidos del fruto. Esta cooperación funcional entre auxinas y giberelinas constituye uno de los mecanismos fisiológicos centrales que sostienen el desarrollo partenocárpico, al incrementar la capacidad de crecimiento del mesocarpio y establecer un órgano metabólicamente activo con elevada demanda de fotoasimilados, condición indispensable para la posterior acumulación de aceite en los híbridos interespecíficos OxG (Dorcey et al., 2009; Fuentes et al., 2012; Saito et al., 2023).

De manera concurrente, la red auxínica interactúa con las citoquininas, las cuales desempeñan un papel insustituible en el establecimiento de la capacidad potencial de crecimiento del ovario y promueven la proliferación celular masiva durante los primeros estadios del desarrollo del fruto, mientras que las giberelinas se especializan en la expansión volumétrica de las células y, el NAA modula las respuestas celulares a las citoquininas, acelerando el ciclo de división mitótica en los tejidos parenquimáticos que darán origen al mesocarpio. En conjunto, la tríada conformada por auxinas (que dirigen el proceso y establecen el patrón de desarrollo), citoquininas (que multiplican el número de células) y giberelinas (que expanden dichas células) conforma una red hormonal

integrada y finamente sintonizada mediante complejos mecanismos de retroalimentación positiva (Su et al., 2011; An et al., 2020; Vandusseldorp et al., 2022), esta interacción se puede observar en la tabla dos.

Finalmente, esta interacción hormonal cruzada cumple una función protectora esencial: la supresión de las señales de senescencia. En ausencia de una fecundación exitosa, el ovario experimenta una caída dramática en los niveles de promotores de crecimiento, lo que habitualmente desencadena la síntesis de etileno y ácido abscísico, hormonas que instruyen a la planta a ejecutar el aborto floral para evitar inversiones metabólicas innecesarias (Figueiredo y Köhler, 2018; Zheng et al., 2023).

Sin embargo, la aplicación exógena de NAA, y la consecuente activación de giberelinas y citoquininas, reprime drásticamente los genes asociados con la biosíntesis de etileno y con la formación de la zona de abscisión en el pedicelo, de este modo, el *cross-talk* inducido artificialmente no solo estimula la construcción de nuevos tejidos, sino que inactiva los programas celulares de muerte celular programada y senescencia, asegurando la viabilidad y permanencia del fruto partenocárpico en el racimo de la planta (An et al., 2020; Sharif et al., 2022; Méndez et al., 2024).

Tabla 2. - Principales grupos génicos regulados por NAA en híbridos OxG.

Grupo génico	Función biológica principal	Impacto fisiológico
TIR1/AFB.	Percepción de auxinas.	Inicio de señalización hormonal.
AUX/IAA.	Represión transcripcional.	Regulación de respuesta auxínica.
ARF.	Activación génica dependiente de auxinas.	Desarrollo del ovario.
MYB.	Regulación del crecimiento y diferenciación.	Desarrollo reproductivo.
WRKY.	Regulación transcripcional y señalización.	Integración hormonal.
MADS-box.	Desarrollo floral y fructificación.	Formación de órganos reproductivos.
Expansinas.	Remodelación de pared celular.	Expansión celular.
Ciclinas/CDK.	Control del ciclo celular.	División celular.
Transportadores de azúcares.	Movilización de fotoasimilados.	Establecimiento de sumideros.
Genes de metabolismo energético.	Producción de ATP y respiración.	Crecimiento del fruto.
Genes asociados al mesocarpio.	Desarrollo de tejido oleaginoso.	Acumulación de aceite.

Nota. Adaptado de Montoya et al. (2023), Apriyanto et al. (2023), Leyser (2018) y Weijers y Wagner (2016).

Evidencia transcriptómica y desarrollo celular

Los análisis transcriptómicos recientes confirman que el NAA utiliza la maquinaria fisiológica natural de las auxinas al activar la vía canónica en los tejidos reproductivos de las inflorescencias del híbrido OxG, evidenciando alteraciones significativas en la expresión de los genes que codifican para los receptores TIR1/AFB y las proteínas represoras AUX/IAA, esto evidencia la liberación de los factores de respuesta ARF (Leyser, 2018; Montoya et al., 2023). La tasa de transcripción diferencial de estos componentes nucleares correlaciona de manera directa con la sensibilidad epigenética del tejido floral (Inoue et al., 2024).

Una vez activa, la red ARF regula la expresión diferencial de genes cruciales para el ciclo celular, proteínas reguladoras de la mitosis, síntesis de ADN y organización del citoesqueleto (Weijers y Wagner, 2016; Montoya et al., 2023). La modulación de los microtúbulos corticales durante esta fase dirige el plano de división celular necesario para estructurar la densidad del futuro mesocarpio (Li et al., 2025).

Consecuentemente, se transcribe un complejo enzimático para la remodelación de la pared celular incluyendo expansinas, pectinasas y xiloglucano endotransglucosilasas que facilita el incremento del volumen celular, la combinación de una elevada actividad mitótica con una intensa expansión celular promovida por la señalización auxínica genera las condiciones fisiológicas necesarias para el desarrollo de frutos partenocárpicos (An et al., 2020). La sobreexpresión coordinada de estas familias multigénicas induce el ablandamiento controlado de la lámina media del ovario (De-Caroli et al., 2023).

Reprogramación del metabolismo lipídico y dinámica de la fuerza del sumidero en el mesocarpio

El desarrollo masivo de tejido parenquimático, desencadenado por la aplicación exógena de ácido naftalenacético (NAA), tiene implicaciones directas y profundas sobre la arquitectura, demanda energética e hídrica del híbrido OxG. La diferenciación vascular que favorece la organización del tejido vascular e incrementa la capacidad conductiva del fruto en desarrollo y transforma al ovario en un sumidero metabólico (*sink*) altamente competitivo (Davies, 2016; Taiz et al., 2018). Según

Epron et al., (2022), la densidad tridimensional de estos nuevos haces fibrovasculares determina la velocidad de translocación hídrica hacia el racimo induciendo un mayor hidro-potencial celular.

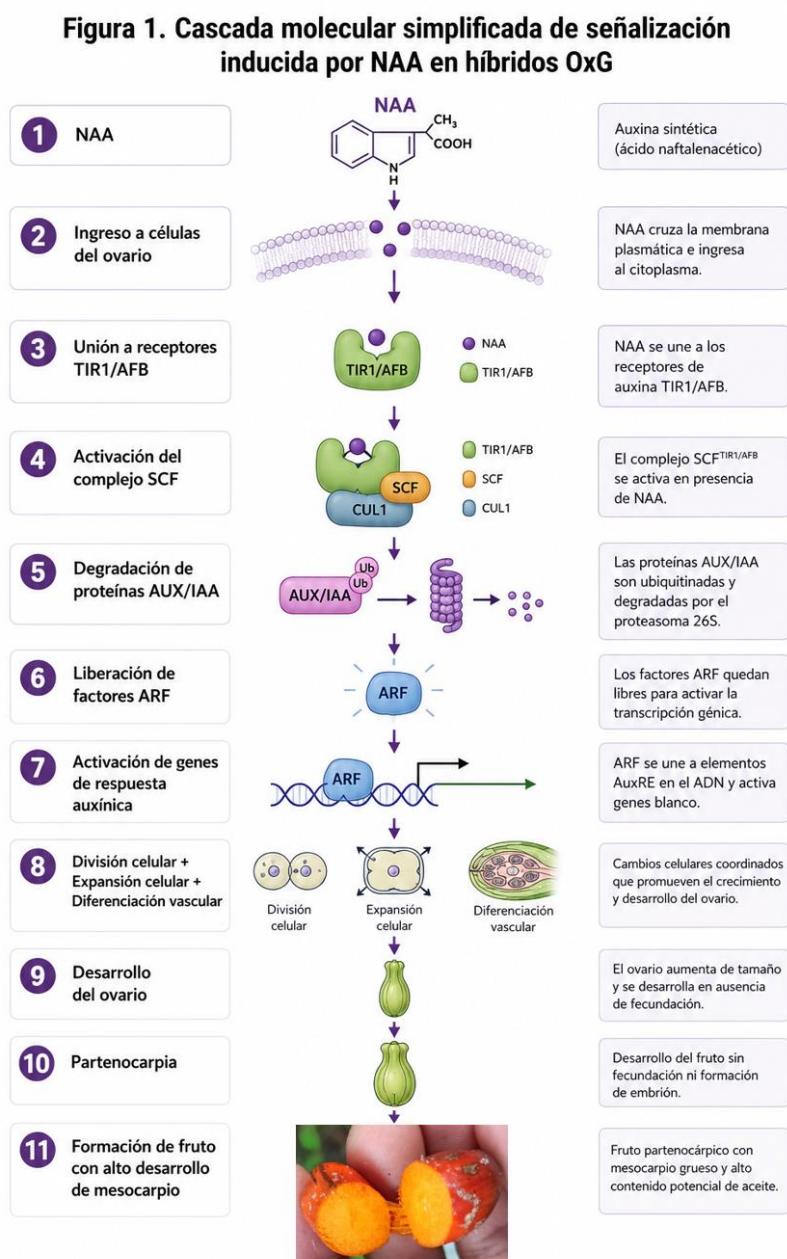
El incremento en la "fuerza del sumidero" (*sink strength*) podría favorecer un gradiente osmótico y de presión que favorece la movilización masiva y la descarga de fotoasimilados desde las hojas (fuentes) a través del floema, dirigiendo los recursos directamente hacia las inflorescencias en desarrollo, una vez que los carbohidratos, transportados principalmente en forma de sacarosa, ingresan al tejido reproductivo. La reprogramación transcripcional mediada por los factores ARF regula redes enzimáticas clave para su asimilación celular, la evidencia transcriptómica reciente en híbridos OxG ha identificado la sobreexpresión de genes estrechamente vinculados con el metabolismo de carbohidratos (Montoya et al., 2023; Nour-Eldin et al., 2024).

Desde una perspectiva fisiológica aplicada, el objetivo último de esta monumental movilización de recursos es la biosíntesis y acumulación de lípidos en el mesocarpio, el tejido de mayor interés económico en la palma aceitera. En un proceso de cuajado natural, existe una intensa competencia intra-órgano por los fotoasimilados; el embrión en desarrollo, el endospermo y el endocarpo (cuesco) en lignificación exigen una cantidad colosal de energía y carbono que resta recursos al mesocarpio, sin embargo, la partenocarpia inducida artificialmente por el NAA reduce significativamente la competencia interna por fotoasimilados al propiciar el desarrollo del fruto en estricta ausencia de semillas funcionales (Romero et al., 2021; Wang et al., 2023).

Al no existir un embrión desarrollándose plenamente, una mayor proporción de los esqueletos carbonados importados al fruto se redirige de manera exclusiva hacia los plastidios de las células parenquimáticas del mesocarpio para la síntesis *de novo* de ácidos grasos. La activación de la piruvato deshidrogenasa plastídica y la acetil-CoA carboxilasa (ACCase) acelera el flujo de carbono hacia la vía lipídica (Niazi y Moorhead, 2025).

La reprogramación del sumidero mediada por el NAA no se limita a evitar el aborto de la flor, sino que es consistente en favorecer la expresión de procesos fisiológicos asociados con el potencial productivo de los híbridos interespecíficos, por lo tanto este mecanismo favorece un incremento de celdas de acumulación de aceite y favorece la consolidación de fenotipos óptimos para la producción a gran escala de aceite de palma alto oleico (HOPO), una de las mayores ventajas competitivas de

los materiales OxG en el mercado agroindustrial (Barcelos et al., 2015; Hormaza et al., 2022; Siqueira et al., 2023). El mecanismo fisiológico integrado propuesto se resume en la Figura 1.



Nota. Adaptado de Leyser (2018), Napier y Kepinski (2018), Romero et al. (2021) y Montoya et al. (2023).

Sincronización fenológica y viabilidad agronómica: de la inducción molecular al rendimiento del racimo

Para que la compleja cascada molecular mediada por la vía TIR1/AFB y la subsecuente degradación de las proteínas represoras AUX/IAA ocurra de manera eficiente, la aplicación del ácido naftalenacético (NAA) debe sincronizarse con precisión respecto a la receptividad fisiológica de la

flor. La literatura científica subraya la existencia de una "ventana fisiológica" o periodo de competencia temporal estrecho, el cual coincide primordialmente con las fases de antesis y post-antesis temprana de las inflorescencias femeninas, durante esta etapa crítica, las células epidérmicas y parenquimáticas del ovario presentan una elevada capacidad para percibir y responder a las señales auxínicas, lo que les confiere la capacidad biológica para percibir las señales exógenas e iniciar el proceso de partenocarpia (Thomas et al., 1973; Romero et al., 2021; Almeida et al., 2023).

El éxito agronómico de la tecnología de inducción fitohormonal está fuertemente condicionado por el respeto a esta ventana fenológica, si el regulador de crecimiento se aplica prematuramente, antes de que el ovario alcance la madurez anatómica necesaria, la capacidad de percepción hormonal aún puede ser limitada debido a la menor expresión y disponibilidad funcional de los componentes de la vía de señalización, resultando en una percepción débil o nula del estímulo auxínico (Leyser, 2018; Napier y Kepinski, 2018).

Por el contrario, si la aplicación se realiza de manera tardía, los procesos irreversibles de senescencia floral ya se habrán desencadenado, en este escenario post-receptivo, la maquinaria celular comienza a transcribir genes asociados a la muerte celular programada y a la biosíntesis de enzimas hidrolíticas en la zona de abscisión, por lo que, la inducción de expansinas y reguladores mitóticos promovida por el NAA resulta fisiológicamente ineficaz (Montoya et al., 2023).

Una vez que la aplicación se ejecuta exitosamente dentro del periodo de receptividad, la respuesta biológica no solo evita la caída de la flor, sino que transforma la arquitectura de soporte del racimo, como se ha documentado, la señalización auxínica sostenida estimula y favorece la diferenciación y organización del tejido vascular en el pedicelo y en la base del fruto en desarrollo (Davies, 2016).

Este refuerzo anatómico de las vías conductoras es vital a nivel agronómico, pues favorece que el racimo, ahora transformado en un sumidero metabólico activo, reciba el flujo ininterrumpido de agua, minerales y carbohidratos necesarios para maximizar el llenado del mesocarpio (Romero et al., 2021). Desde una perspectiva aplicada, el dominio de esta sincronización fenológica es el factor que, la evidencia disponible sugiere que permite traducir una herramienta de biología molecular operando desde una escala celular, a rendimientos comerciales sostenibles en las plantaciones (Montoya et al., 2023).

En conjunto, la evidencia científica revisada permite redefinir la partenocarpia inducida por ácido naftalenacético en híbridos interespecíficos OxG como un proceso de regulación reproductiva altamente integrado, en el que la señalización auxínica constituye el punto de partida de una red coordinada de interacciones hormonales, reprogramación transcriptómica y respuestas fisiológicas que sustituyen las señales generadas por la fecundación, permitiendo el desarrollo y consolidación de frutos partenocárpicos. Esta visión integradora amplía la comprensión del mecanismo de acción del NAA y proporciona un marco conceptual para orientar futuras investigaciones sobre la fisiología reproductiva y el mejoramiento de la productividad en los híbridos OxG.

Limitaciones actuales y líneas futuras de investigación

A pesar de los importantes avances en la comprensión de los mecanismos fisiológicos y moleculares asociados con la partenocarpia inducida por ácido naftalenacético (NAA), persisten limitaciones que deben considerarse al interpretar y extrapolar la evidencia disponible. La respuesta al NAA presenta una marcada dependencia del genotipo, por lo que la intensidad de la señalización hormonal y la eficiencia del cuajado pueden variar entre diferentes híbridos interespecíficos OxG y materiales genéticos derivados, reflejando diferencias en la regulación de las redes de respuesta auxínica y en la sensibilidad de los tejidos reproductivos (Barcelos et al., 2015; Montoya et al., 2023).

Además, la eficacia de esta tecnología está condicionada por factores ambientales y de manejo, incluyendo la temperatura, la disponibilidad hídrica, el estado fisiológico y nutricional de la palma, la dosis de NAA aplicada, frecuencia de aplicación y, especialmente, la sincronización con la ventana de máxima receptividad fisiológica del ovario (momento de aplicación), aspectos que pueden modificar significativamente la respuesta biológica y la formación de frutos partenocárpicos (Romero et al., 2021; Thomas et al., 1973). El estrés térmico extremo, por ejemplo, altera la estabilidad conformacional del receptor TIR1, comprometiendo la captación de la auxina sintética en campo (Scherer et al., 2023). Asimismo, periodos prolongados de sequía inhiben la translocación de boro y calcio, cofactores estructurales necesarios para que las expansinas completen la remodelación celular de la pared (Guo et al., 2023).

De igual manera, aunque la transcriptómica ha permitido identificar redes génicas asociadas con el desarrollo del fruto, gran parte de estas evidencias continúan siendo de naturaleza correlativa, por lo

que resulta necesario complementar estos hallazgos mediante estudios fisiológicos, proteómicos, metabolómicos y de validación funcional que permitan establecer relaciones causales entre la regulación génica, la respuesta hormonal y el desempeño agronómico de los híbridos OxG.

La evidencia científica disponible hasta la actualidad indica que la inducción de partenocarpia mediante ácido naftalenacético (NAA) constituye un proceso fisiológico complejo que trasciende la simple sustitución de la fecundación. La activación de la vía canónica de señalización auxínica, junto con la interacción coordinada de giberelinas y citoquininas, desencadena una reprogramación transcripcional que favorece la división celular, la expansión del ovario, la diferenciación vascular y el establecimiento de un sumidero metabólico funcional, proporcionando una base de mecanismos para comprender el desarrollo de frutos partenocárpicos en híbridos interespecíficos OxG.

Desde una perspectiva agronómica, la aplicación exógena de NAA representa una herramienta estratégica para superar las limitaciones reproductivas inherentes a los híbridos OxG. La sincronización de la aplicación con la ventana de máxima receptividad fisiológica del ovario resulta determinante para optimizar el cuajado, favorecer el desarrollo del mesocarpio y aumentar el potencial de acumulación de aceite en el racimo, consolidando esta tecnología como un componente fundamental del manejo reproductivo en sistemas comerciales de producción de palma aceitera.

Los avances recientes en transcriptómica funcional han ampliado significativamente la comprensión de las redes génicas reguladas durante la partenocarpia inducida por NAA; sin embargo, persisten interrogantes relacionadas con la regulación temporal de estas rutas, su interacción con otros reguladores hormonales y su variabilidad entre diferentes materiales genéticos y condiciones ambientales. La integración de enfoques multi-ómicos, fenotipado de precisión y validación funcional de genes candidatos permitirá desarrollar estrategias de manejo reproductivo más eficientes y fortalecer los programas de mejoramiento genético dirigidos a incrementar la productividad y sostenibilidad de la palmicultura desarrollada con híbridos OxG.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, R. F., Bezerra, C. S., y de Oliveira, M. V. (2023). Stigmatic receptivity dynamics and temporal windows for chemical induction of fruit set in tropical crops. *Scientia Horticulturae*, 309, 111650. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111650>



- An, J., Almasaud, R. A., Bouzayen, M., Zouine, M., y Chervin, C. (2020).** Auxin and ethylene regulation of fruit set. *Plant Science*, 292, 110381. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110381>
- Apriyanto, A., Compart, J., y Fettke, J. (2023).** Transcriptomic analysis of mesocarp tissue during fruit development of oil palm revealed specific isozymes related to starch metabolism that control oil yield. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1220237. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1220237>
- Baral, R., Vainer, A., Melzer, S., Hause, B., y Panda, S. (2025).** 'Bud to fruit'—hormonal interactions governing early fruit development. *Journal of Experimental Botany*, 76(22), 6657–6673. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf363>
- Barcelos, E., Rios, S. A., Cunha, R. N. V., Lopes, R., Motoike, S. Y., Babiychuk, E., Skirycz, A., y Kushnir, S. (2015).** Oil palm natural diversity and the potential for yield improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6, 190. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00190>
- Blázquez, M. A., Nelson, D. C., y Weijers, D. (2020).** Evolution of plant hormone response pathways. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 327-353. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100309>
- Chávez, A. R., Bastidas, S., y Romero, H. M. (2024).** Efficiency of synthetic auxins implementation on commercial interspecific OxG hybrids oil palm plantations. *European Journal of Agronomy*, 154, 127082. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127082>
- Davies, P. J. (Ed.). (2016).** *Plant Hormones: Physiology, Biochemistry and Molecular Biology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7758-5>
- De-Caroli, M., Piro, G., y Lenucci, M. S. (2023).** Pectin methylesterases and expansins action during hormone-stimulated fruit development in perennial monocots. *Plant Molecular Biology*, 112(4), 319-334. <https://doi.org/10.1007/s11103-023-01358-0>
- Dorcey, E., Urbez, C., Blázquez, M. A., Carbonell, J., y Perez-Amador, M. A. (2009).** Fertilization-dependent auxin response in ovules triggers fruit development through the modulation of gibberellin metabolism in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, 58(2), 318–332. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03781.x>



- Du, M., Zhou, X., y Wang, Y. (2023).** Cell wall remodeling enzymes during auxin-induced parthenocarpy in perennial woody crops. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 1024-1035. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.02.018>
- Epron, D., Cabral, O., y Nouvellon, Y. (2022).** Vascular differentiation dynamics and sink-source relationships in perennial woody monocots under hormonal induction. *Tree Physiology*, 42(5), 980-994. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab151>
- Figueiredo, D. D., y Köhler, C. (2018).** Auxin: A molecular trigger of seed development. *Genes y Development*, 32(7–8), 479–490. <https://doi.org/10.1101/gad.312546.118>
- Forero, D. C., Hormaza, P., y Romero, H. M. (2021).** Phenological synchronization and pollen viability limits in interspecific *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* crops. *Industrial Crops and Products*, 168, 113590. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113590>
- Fuentes, S., Ljung, K., Sorefan, K., Alvey, E., Harberd, N. P., y Østergaard, L. (2012).** Fruit growth in *Arabidopsis* occurs via DELLA-dependent and DELLA-independent gibberellin responses. *The Plant Cell*, 24(10), 3982–3996. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.103192>
- Galli, M., Khakhar, A., y Nemhauser, J. L. (2024).** Kinetics of AUX/IAA protein degradation under synthetic auxin treatment in tropical crops. *Current Opinion in Plant Biology*, 77, 102480. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102480>
- Guo, X., Peng, W., Xu, X., Xie, K., & Yang, X. (2023).** The Potential of Endophytes in Improving Salt-Alkali Tolerance and Salinity Resistance in Plants. *International journal of molecular sciences*, 24(23), 16917. <https://doi.org/10.3390/ijms242316917>
- He, H., & Yamamuro, C. (2022).** Interplays between auxin and GA signaling coordinate early fruit development. *Horticulture Research*, 9, Article uhab078. <https://doi.org/10.1093/hr/uhab078>
- Hormaza, P., Romero, H. M., y Ruiz-Romero, R. A. (2022).** Current status and challenges of interspecific oil palm hybrids in Latin America. *Agronomy*, 12(3), 642. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030642>



- Inoue, K., Yuan, L., y Weijers, D. (2024).** Epigenetic landscapes and transcriptional plasticity of auxin-dependent pathways in tropical crops reproduction. *Trends in Plant Science*, 29(5), 492-506. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.12.004>
- Kato, H., Ishizaki, K., y Weijers, D. (2022).** Evolution and diversity of Auxin Response Factors (ARFs) in plant reproductive development. *Journal of Experimental Botany*, 73(7), 1945-1956. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac023>
- Kumar, R., Khurana, A., y Sharma, A. K. (2021).** Role of auxin-responsive factors and multihormonal cross-talk in fruit set of perennial monocots. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(6), 2311-2325. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10384-w>
- Leyser, O. (2018).** Auxin signaling. *Plant Physiology*, 176(1), 465-479. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00765>
- Li, M., Li, X., He, Y., Li, C., Gu, C., Sun, C., Ma, X., Geng, Y., Hu, S., Han, L., Liu, L., Liu, Y., Liu, Z., She, D., Zhou, Z., Song, X., Pan, Y., Yan, L., Zhang, X. and Zhao, J. (2026),** The Microtubule-Associated Protein CsTON2 Interacts With CsTRM5 and CsSUN to Regulate Fruit Shape Development in Cucumber. *Plant Biotechnol. J*, 24: 2725-2741. <https://doi.org/10.1111/pbi.70519>
- Martínez-Bello, L., Al-Babili, S., y López-Díaz, I. (2021).** Auxin regulation of gibberellin 20-oxidase genes during hormone-induced parthenocarp. *Plant and Cell Physiology*, 62(8), 1294-1306. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab074>
- Méndez, J. E., Bastidas, S., y Romero, H. M. (2024).** Mitigating floral abscission in interespecific OxG oil palm hybrids through synthetic auxin management. *Agricultural and Forest Meteorology*, 346, 109890. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109890>
- Montoya, C., Mejia-Alvarado, F. S., Botero-Rozo, D., Ayala-Diaz, I. M., y Romero, H. M. (2023).** Parthenocarp-related genes induced by naphthalene acetic acid in oil palm interspecific O × G [*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés × *Elaeis guineensis* Jacq.] hybrids. *Frontiers in Genetics*, 14, 1099489. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1099489>
- Napier, R. M., y Kepinski, S. (2018).** Auxin perception and signaling. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 10(8), a029702. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a029702>



- Niazi, D., y Moorhead, G. B. G (2025).** Plant acetyl-CoA carboxylase: The homomeric form and the heteromeric form, *BBA Advances*, Volume 7,2025,100148,ISSN 2667-1603. <https://doi.org/10.1016/j.bbadv.2025.100148>.
- Nour-Eldin, H. H., Frommer, W. B., y Slewinski, T. L. (2024).** SWEET and SUT sugar transporters expression profiles during apoplastic loading in high-yielding tropical fruits. *Current Opinion in Plant Biology*, 79, 102510. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2024.102510>
- Quareshy, M., Prusinska, J., Kieffer, M., Fukui, K., Pardal, A. J., Lehmann, S., Schäfer, P., Genio, C. I., Kepinski, S., Hayashi, K., Marsh, A., y Napier, R. M. (2018).** The tetrazole analogue of the auxin indole-3-acetic acid binds preferentially to TIR1 and not AFB5. *Scientific Reports*, 8, 15124. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33469-9>
- Rincón, C., Hormaza, P., Moreno, L. P., Prada, F., y Romero, H. M. (2017).** Evaluation of pollen viability and fruit set in interspecific oil palm hybrids. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), 46. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0459-8>
- Robert, H. S., Friml, J., y Benková, E. (2021).** Hormonal control of early fruit set: Interplay between auxin and abscisic acid signaling pathways. *The Plant Cell*, 33(4), 852-869. <https://doi.org/10.1093/plcell/koab012>
- Romero, H. M., Daza, E., Ayala-Díaz, I., y Ruiz-Romero, R. (2021).** High-oleic palm oil (HOPO) production from parthenocarpic fruits in oil palm interspecific hybrids using naphthalene acetic acid. *Agronomy*, 11(2), 290. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020290>
- Saddik, A. S., Li, H., y Zouine, M. (2021).** Transcriptomic insights into perennial fruit set and parthenocarpy: A comparative multi-species analysis. *BMC Plant Biology*, 21(1), 452. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03229-w>
- Saito, T., Goldberg, R. B., y Harada, J. J. (2023).** DELLA protein degradation kinetics and transcriptional unlocking during early mesocarp development. *The Plant Journal*, 114(4), 843-857. <https://doi.org/10.1111/tpj.16172>
- Salehin, M., Li, R., y Estelle, M. (2021).** Structural insights into auxin perception by the TIR1/AFB receptors and its agronomic implications. *Biochemical Journal*, 478(11), 2095-2109. <https://doi.org/10.1042/BCJ20200852>



- Scherer, G. F., Estelle, M., y Salehin, M. (2023).** Thermal stability profiles of TIR1/AFB receptors under synthetic auxin treatments in microclimates. *Plant Cell Environment*, 46(8), 2415-2429. <https://doi.org/10.1111/pce.14610>
- Sharif, R., Xie, C., Zhang, H., Arnao, M. B., Ali, M., Ali, Q., Muhammad, I., Shalmani, A., Nawaz, M. A., Chen, P., y Li, Y. (2022).** Melatonin and auxin crosstalk in plant growth and stress responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 4768. <https://doi.org/10.3390/ijms23094768>
- Siqueira, M. A., Rios, S. A., y Motoike, S. Y. (2023).** Source-sink energy efficiency conversion under synthetic auxin stimulation in *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* hybrids. *Industrial Crops and Products*, 198, 116670. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116670>
- Su, Y. H., Liu, Y. B., y Zhang, X. S. (2011).** Auxin–Cytokinin Interaction Regulates Meristem Development. *Molecular Plant*, 4(4), 616–625. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr007>
- Taiz, L., Zeiger, E., Möller, I. M., y Murphy, A. (2018).** *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Thomas, R. L., Seth, A. K., Chan, K. W., y Ooi, S. C. (1973).** Induced parthenocarpy in the oil palm. *Annals of Botany*, 37(3), 447–452. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084711>
- Torres, M. A., Sarria, G. A., y Martinez, G. (2020).** Bud Rot disease tolerance and lipid profile optimization of OxG hybrids in Latin American palmiculture. *Phytopathology*, 110(5), 980-991. <https://doi.org/10.1004/PHYTO-11-19-0430-R>
- Vandusseldorp, M., Eeckhaut, T., y Van Labeke, M. C. (2022).** Cytokinin-auxin ratios determine parenchyma cell proliferation and final sink capacity in tropical woody fruits. *Frontiers in Plant Science*, 13, 915234. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.915234>
- Vanneste, S., y Friml, J. (2020).** Auxin transporters and synthetic auxin stability profiles in agricultural systems. *Plant Molecular Biology*, 103(6), 571-584. <https://doi.org/10.1007/s11103-020-01015-w>



- Wang, L., Zhang, Y., y Li, P. (2023).** Transcriptional suppression of phenylpropanoid pathway during induced parthenocarpy in seedless drupes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 201, 107842. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107842>
- Weijers, D., y Wagner, D. (2016).** Transcriptional responses to auxin in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 539–574. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-111550>
- Zheng, A., Wang, X., y Zhang, J. (2023).** Absciscic acid and ethylene signaling networks underlying floral organ senescence under pollination deficit. *Plant Molecular Biology*, 111(3), 245-259. <https://doi.org/10.1007/s11103-022-01321-7>

