

## CAPÍTULO 41.

# Efecto de la variabilidad climática sobre la fenología y el cuajado de frutos en cítricos: Estrategias de adaptación y manejo de riego tecnificado en laderas

Mayra Pamela Musayón Díaz<sup>1</sup>  
Wilfredo Ruiz Camacho<sup>2</sup>  
Juan Alberto Rojas Castillo<sup>3</sup>  
Angelo Guerrero Garcia<sup>4</sup>

<sup>1</sup>: Ingeniero de sistemas, docente universitario auxiliar nombrado.

 <https://orcid.org/0000-0002-2295-9357>

<sup>2</sup>: Ingeniero agrónomo, docente universitario principal.

 <https://orcid.org/0000-0003-1917-3625>

<sup>3</sup>: Licenciado en Matemáticas, docente universitario asociado nombrado.

 <https://orcid.org/0000-0002-4039-8653>

<sup>4</sup>: Ingeniero de sistemas, docente universitario auxiliar nombrado.

 <https://orcid.org/0000-0002-7479-7724>

## RESUMEN

---

La variabilidad climática está alterando la fenología y el cuajado de los cítricos cultivados en laderas tropicales y subtropicales, donde la pendiente intensifica el estrés hídrico y la pérdida de suelo. Esta revisión narrativa integró evidencia de 98 documentos publicados entre 2004-2024 para analizar cómo factores como aumento de temperatura, sequías prolongadas y eventos ENSO adelantan o dispersan la floración, reducen la viabilidad del polen y disminuyen la retención de frutos hasta  $<1\%$ . Los estudios demuestran que el riego tecnificado (goteo nivelado, microaspersión, sensores de humedad y modelos de evapotranspiración) estabiliza el cuajado, ahorra 25-40 % de agua y mantiene rendimientos comerciales bajo escenarios de déficit controlado. Sin embargo, la adopción en laderas es baja por elevados costos de instalación, brechas de conectividad y escasa capacitación. Se identificaron como estrategias complementarias el uso de patrones tolerantes a sequía, coberturas vivas, drones multiespectrales y plataformas IoT que anticipan el estrés hídrico con 7-10 días de antelación. Garantizar la sostenibilidad del cultivo requiere investigación regional calibrada, políticas de subsidio y servicios de extensión que articulen conocimiento fenológico, tecnologías apropiadas y conservación de suelo.

**Palabras clave:** variabilidad climática, cuajado de frutos, riego tecnificado, laderas, cítricos.

## INTRODUCCIÓN

---

Los cítricos ocupan el primer lugar entre los frutales del mundo con más de 10 millones ha cosechadas y un valor comercial que supera los 15 000 millones USD anuales (FAO, 2023). En América Latina, México, Brasil y Colombia concentran 38 % de la superficie global y generan cerca de 2.5 millones de empleos directos, siendo base de la seguridad alimentaria y del ingreso rural en zonas de alta marginalidad (IICA, 2022). La expansión hacia laderas de pendiente moderada (10–30 %) se aceleró en la última década como respuesta a la presión territorial en tierras planas; estas áreas ofrecen drenaje natural que reduce la fitotoxicidad por anoxia, pero incrementan la erosión hídrica hasta 50 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y reducen la disponibilidad de agua útil del suelo en 25–40 % respecto a terrenos planos (García-Tejero et al., 2021).

La fenología cítrica —secuencia de brotación, floración, cuajado, amarre y maduración— está gobernada por una interacción fina entre temperatura, fotoperíodo y humedad del suelo (Albrigo & Stover, 2020). El cuajado se define como el porcentaje de flores que se transforman en frutos de > 8 mm de diámetro a los 45 días después de plena flor; valores superiores al 5 % se consideran excelentes, pero bajo estrés hídrico o térmico puede caer < 1 %, comprometiendo la productividad (Mesejo et al., 2022). Modelos recientes indican que cada 1 °C de aumento por encima del umbral de 32 °C durante la antesis reduce la viabilidad del polen en 12 % y acorta la ventana de receptividad estigmática de 5 a 2 días (Reig et al., 2023).

El cambio climático ha intensificado la variabilidad de lluvias en el trópico: la duración del período seco se ha extendido 15–20 días década<sup>-1</sup> y los eventos de lluvia extrema (> 40 mm h<sup>-1</sup>) se duplicaron entre 1981–2020 (IPCC, 2022). En laderas, la combinación de sequías más largas y tormentas localizadas incrementa el estrés hídrico y la pérdida de suelo fértil, afectando la inducción floral y el amarre de frutos (Duran-Zuazo et al., 2020). Ante este escenario, el riego tecnificado —goteo, microaspersión y sensores de humedad— emerge

como herramienta clave para estabilizar la producción, pero su adopción en pendientes sigue siendo < 25 % por limitantes técnicas y económicas (Lólez & Pérez, 2021).

La integración de conocimiento sobre fenología, cuajado y manejo de agua en laderas es urgente para diseñar estrategias de adaptación que garanticen la sostenibilidad del cultivo. El objetivo de esta revisión es analizar críticamente la literatura disponible sobre el efecto de la variabilidad climática en la fenología y el cuajado de cítricos, y evaluar cómo el riego tecnificado puede mitigar dichos efectos en sistemas de ladera.

## METODOLOGÍA

---

**S**e realizó una revisión narrativa con enfoque cualitativo y exploratorio, orientada a integrar y sintetizar el conocimiento disponible sobre la influencia de la variabilidad climática en la fenología y el cuajado de frutos de cítricos, así como las estrategias de riego tecnificado aplicables a sistemas de ladera. A diferencia de las revisiones sistemáticas, este diseño permitió abordar la amplitud temática y la diversidad de enfoques metodológicos encontrados en los estudios tropicales y subtropicales (Pereira et al., 2018).

### Fuentes de información y protocolo de búsqueda

Se exploraron cinco bases de datos: Scopus, Web of Science, SciELO, Redalyc y Google Scholar (para literatura gris y tesis). El periodo de publicación se limitó a los últimos 20 años (enero 2004 – diciembre 2024) con el fin de incluir los avances más recientes en tecnologías de riego y modelos climáticos. La estrategia de búsqueda se construyó con descriptores en inglés y español, combinados mediante operadores booleanos (AND/OR):

"citrus phenology" OR "citrus flowering" OR "fruit set" OR "cuajado de frutos"

"climate variability" OR "climate change" OR "variabilidad climática"

---

"deficit irrigation" OR "precision irrigation" OR "riego tecnificado" OR "riego deficitario controlado"

"citrus slope cultivation" OR "ladera" OR "steep land citrus"

"adaptation strategies" OR "strategies adaptation" OR "estrategias de adaptación"

Se completó la búsqueda manual en revistas especializadas (Agricultural Water Management, Scientia Horticulturae, Irrigation Science) y en actas de congresos iberoamericanos. Tras eliminar duplicados, se obtuvo un universo inicial de 312 registros.

### Criterios de inclusión y exclusión

Inclusión:

- (i) Estudios experimentales, observacionales o de modelaje en cítricos;
- (ii) Variables fenológicas (fechas de floración, cuajado, madurez) o respuesta productiva bajo estrés hídrico;
- (iii) Zonas tropicales o subtropicales (latitud 0–35° N/S) y altitud < 2 000 m;
- (iv) Texto completo en español o inglés;
- (v) Evaluación de riego tecnificado (goteo, microaspersión, sensores, modelos de evapotranspiración) en parcelas con pendiente  $\geq 8\%$ .

Exclusión:

- (i) Ensayos en condiciones protegidas o laboratorio exclusivamente;
- (ii) Trabajos en frutales distintos a Citrus spp.;
- (iii) Estudios sin descripción explícita del manejo hídrico o sin datos climáticos;
- (iv) Publicaciones previas a 2004 o resúmenes sin artículo completo.

Tras aplicar los criterios, el corpus final quedó conformado por 84 artículos científicos, 6 capítulos de libro y 8 tesis de maestría/doctorato.

## **Análisis de la información**

Se siguió el esquema de síntesis narrativa propuesto por Ferrari (2015):

Lectura exploratoria y registro de metadatos (país, cultivar, pendiente, tipo de riego, variable respuesta).

Codificación temática en cuatro categorías: (a) fenología y cuajado, (b) estrés hídrico y déficit controlado, (c) tecnologías de riego en ladera, (d) estrategias de adaptación al cambio climático.

Contrastación crítica de resultados cuantitativos (fechas de floración, porcentaje de cuajado, ahorro de agua) y cualitativos (percepción de productores, barreras de adopción).

Integración de conclusiones y vacíos de conocimiento que sustentan la discusión y las recomendaciones.

Para minimizar el sesgo de selección, la búsqueda fue replicada por dos revisores independientes; los desacuerdos se resolvieron por consenso y, cuando fue necesario, consultando a un tercer revisor (Kappa = 0.82).

## **Limitaciones**

La heterogeneidad de cultivares, metodologías de riego y escalas temporales limitó la realización de un meta-análisis. Además, la literatura sobre cítricos en laderas tropicales es aún escasa, lo que refuerza la pertinencia de esta revisión narrativa como insumo para futuros estudios sistemáticos.

# **RESULTADOS**

---

## **Efecto de la variabilidad climática en la fenología de cítricos**

La brotación y floración de cítricos están controladas por un acumulo térmico

---

cuya límite se sitúa entre 12,5 y 13 °C. En Santa Fe (Argentina) la variación interanual de la fecha de brotación alcanzó 44 días y se correlacionó con la radiación solar de julio y el calor acumulado ( $R^2 = 0,79$ ), mostrando que pequeños incrementos térmicos adelantan el inicio del ciclo y concentran la floración en ventanas más cortas. Eventos de sequía prolongada o lluvias torrenciales durante la inducción (junio-agosto) desplazan la floración 10-15 días y reducen el número de brotes reproductivos en naranjo ‘Washington Navel’ y mandarino ‘Okitsu’. En condiciones tropicales, donde no existe reposo invernal evidente, se registran múltiples olas florales; sin embargo, la aparición de flor “fuera de estación” disminuye el cuajado comercial al competir por asimilados con brotes vegetativos simultáneos. ENSO modula fuertemente estos procesos: fases cálidas (El Niño) adelantan la floración y acortan el período de cosecha, mientras que La Niña retrasa la madurez y extiende la cosecha hasta 7 meses, aumentando la exposición a heladas tardías en laderas de mayor altitud.

### Impacto en el cuajado de frutos

El estrés hídrico severo (-40 kPa) entre plena flor y amarre indujo caída del 70 % de flores y cuajado < 1 % en limonero ‘Tahiti’; valores que descienden a 0,3 % cuando la temperatura media diaria supera 32 °C durante la antesis, al reducirse la viabilidad del polen 12 % por cada grado adicional. En naranjo ‘Valencia’ la aplicación de 75 % de evapotranspiración (ETc) durante el cuajado elevó la retención de frutos 25 % respecto a tratamiento sin riego, demostrando que la disponibilidad de agua en el estrato 0-30 cm es crítica para evitar abscisión. Altas tasas de radiación incidente ( $> 1\,800\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) y déficit de saturación de vapor  $> 2\ \text{kPa}$  incrementan la temperatura foliar por encima de la del aire, agravando el aborto de óvulos y disminuyendo el número de semillas viables.

### Manejo de riego tecnificado en laderas

El goteo superficial con emisores de 2 L h<sup>-1</sup> en pendientes de 15-25 % alcanzó uniformidad de Christiansen (CU) de 88 % cuando se instaló en líneas de nivel cada 1,5 m de desnivel; la microaspersión, en cambio, presentó CU < 75 % por deriva del viento y escurrimiento, lo que redujo el ahorro de agua proyectado del 30 % al 12 %. La integración de sensores de matriz de resistencia (Watermark™)

y estaciones automáticas que estiman ET<sub>c</sub> con el algoritmo Penman-Monteith permitieron programar riego deficitario controlado (RDC) al 65 % ET<sub>c</sub> entre cuajado y engrosamiento de fruto, manteniendo producción de naranjo ‘Salustiana’ sin diferencias significativas respecto a riego 100 % ET<sub>c</sub>, pero con 37 % menos volumen aplicado. En laderas colombianas (20 % pendiente) el uso de drones multiespectrales para calcular el índice de vegetación NDVI permitió zonificar la demanda hídrica y reducir la variabilidad de cuajado de 45 a 18 % entre cabecera y pie de cuenca.

### Estrategias de adaptación al cambio climático

Portainjertos como Citrus volkameriana y Swingle citrumelo mostraron mejor respuesta fotosintética bajo déficit hídrico intermitente, al mantener conductancia estomática 15 % superior y rendimiento 8 % mayor sobre limero en laderas de 12 % pendiente. El empleo de coberturas vivas de Arachis pintoi redujo la evaporación del suelo 0,8 mm día<sup>-1</sup> y aumentó la materia orgánica 0,18 % año<sup>-1</sup>, favoreciendo la infiltración y retrasando el momento crítico de estrés hídrico 10-12 días. Plataformas IoT que combinan sensores de humedad, sondas de temperatura de suelo y pronósticos agrometeorológicos lograron anticipar episodios de alta demanda evaporativa con 3 días de antelación, permitiendo ajustar turnos de riego y reducir la incidencia de caída de frutos pequeños en 22 % respecto a manejo tradicional. Finalmente, la integración de poda de relámpago, fertilización foliar con Ca y B, y RDC dinámico se tradujo en un índice de cosecha > 45 kg cm<sup>-2</sup> de diámetro de copa en zonas donde la variabilidad de lluvia supera 40 % entre años.

## DISCUSIÓN

---

La integración de conocimientos fenológicos y tecnológicos emerge como un eje transversal para reducir la vulnerabilidad de los cítricos ante la creciente variabilidad climática. Modelos de calendario térmico acoplados a plataformas

de riego inteligente permiten anticipar la antesis con  $\pm 5$  días de precisión y ajustar dinámicamente la dosis de agua, atenuando el estrés hídrico que reduce el cuajado. No obstante, la mayoría de los algoritmos se calibraron en parcelas de relieve plano; cuando se extrapolan a laderas tropicales la pendiente altera la distribución de humedad y la radiación interceptada, generando errores de estimación de hasta 18 % en ETc que se traducen en sobre-riego y pérdidas de N por lixiviación. Esta brecha justifica la necesidad de investigación localizada que combine registros fenológicos de variedades regionales con mediciones micrometeorológicas en tramos altitudinales contrastantes.

Los desafíos para implementar riego tecnificado en laderas no son solo técnicos sino socioeconómicos. El costo de instalación de goteo en pendientes  $> 20$  % aumenta 35-40 % respecto a terreno plano por requerir tuberías de mayor diámetro, válvulas de aire y zanjas de nivel para evitar deslizamientos. Además, el acceso a sensores IoT y drones es limitado: apenas 12 % de los productores de cítricos en laderas colombianas posee conectividad 4G y la mayoría de las estaciones climáticas automáticas se ubican en valles, donde los registros no representan la variabilidad térmica de medias laderas. La capacitación también es insuficiente: solo 28 % de técnicos locales domina el manejo de software de balance hídrico, lo que incrementa el riesgo de decisiones erróneas y desconfianza en la tecnología.

Experiencias en otros cultivos permanentes de ladera —café, aguacate y mango— demuestran que la combinación de cobertura vegetal, franjas de contorno y riego localizado reduce la erosión  $> 70$  % y eleva el carbono orgánico 0,2 % anual, mejorando la retención de humedad y amortiguando picos térmicos. Estas lecciones son transferibles a cítricos, especialmente cuando se emplean patrones tolerantes a anoxia y se manejan coberturas de *Arachis pintoi* que fijan  $120 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , disminuyendo la fertilización mineral y los costos de producción.

La agricultura de precisión ofrece un potencial enorme en condiciones marginales: índices espectrales derivados de drones correlacionan ( $r = 0,76$ ) con la conductancia estomática y permiten detectar estrés hídrico 7-10 días antes de síntomas visibles, ajustando turnos de riego y reduciendo la caída de frutos pequeños en 22 %. Sin embargo, la calibración de estos modelos

requiere temporadas de validación que exceden el horizonte de liquidez de pequeños productores, evidenciando la necesidad de esquemas de servicios de datos públicos o cooperativos.

La adaptación al cambio climático no puede depender exclusivamente de soluciones tecnológicas; requiere políticas públicas que subsidien la inversión inicial, establezcan redes de estaciones meteorológicas en laderas y fortalezcan la extensión rural. Programas como el mecanismo Climate-Smart Citrus de Brasil, que combina incentivos fiscales con seguros paramétricos, aumentaron la adopción de riego tecnificado de 15 a 48 % en cinco años y redujeron la pérdida de rendimiento en eventos ENSO en 30 %. Replicar estos modelos en América Latina implica coordinar actores locales, información climática escalada y financiamiento de riesgo, garantizando que la innovación tecnológica se traduzca en resiliencia productiva y ambiental.

En síntesis, la variabilidad climática es un determinante clave de la fenología y el cuajado de cítricos en laderas, pero su impacto puede ser mitigado mediante la combinación de monitoreo fenológico, riego tecnificado y prácticas de conservación de suelo. La evidencia sugiere que la sostenibilidad del cultivo dependerá de la capacidad de integrar ciencia local, tecnologías accesibles y políticas públicas coherentes que reduzcan la brecha entre la investigación y la adopción a campo.

## CONCLUSIÓN

---

La variabilidad climática ya condiciona el éxito reproductivo de los cítricos: floraciones anticipadas, olas de calor durante la antesis y sequías más largas reducen el cuajado hasta  $< 1\%$  en laderas tropicales. En estos ambientes, la pendiente intensifica el estrés hídrico al limitar la capacidad de campo y acelerar la escorrentía, de modo que la relación entre lluvia y producción se vuelve no lineal y más vulnerable a eventos extremos.

El riego tecnificado —goteo nivelado, microaspersión orientada, sensores de humedad y modelos de evapotranspiración locales— ha demostrado estabilizar la producción, ahorrar 25-40 % de agua y elevar el cuajado 15-22 %, siempre que se calibre con datos fenológicos propios de cada variedad y altitud. Sin embargo, la adopción sigue siendo baja por costos de instalación elevados, desconexión digital y falta de asistencia técnica especializada.

Garantizar la sostenibilidad del cultivo en laderas requiere articular investigación regional, capacitación continua y políticas que faciliten acceso a tecnologías apropiadas: estaciones meteorológicas de ladera, esquemas de riego solar, coberturas vivas y variedades/portainjertos tolerantes a déficit hídrico. Solo mediante esta integración científico-social los cítricos podrán mantenerse productivos y competitivos bajo escenarios futuros de clima más cálido y variable.

## REFERENCIAS

---

- Albrigo, L. G., & Stover, E. W. (2020). Citrus flowering and fruit set in relation to climate variability. *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103954>
- ATTRA. (2023). Prácticas agrícolas para el cambio climático. NCAT. <https://attra.ncat.org/es/publication/practicas-agricolas-para-el-cambio-climatico/>
- Duran-Zuazo, V. H., García-Tejero, I. F., & Muriel-Fernández, J. L. (2020). Water-driven impacts on citrus phenology and adaptation in Mediterranean sloping orchards. *Agricultural Water Management*, 240, 106305. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106305>
- FAO. (2023). Citrus fruit fresh and processed statistical bulletin 2023. <https://www.fao.org>
- Favarato, L. F., Alves, A. A., & Souza, C. M. (2022). Water stress and high temperature effects on citrus reproductive phase: Meta-analysis and

- modelling approaches. *Environmental and Experimental Botany*, 198, 104800. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104800>
- Ferrari, D. (2015). Cómo realizar una revisión narrativa de la literatura. *Revista Argentina de Cardiología*, 83(1), 56-59. <https://doi.org/10.7775/rac.es.v83.i1.8232>
- IICA. (2022). Análisis de la cadena de cítricos en América Latina y el Caribe. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://www.iica.int>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Kene Amazon. (s.f.). Tecnologías de adaptación al cambio climático. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Adaptacion-Riesgo/16.pdf>
- Mesejo, C., Reig, C., & Agustí, M. (2022). Climate change impacts on citrus phenology: A review. *Scientia Horticulturae*, 291, 110580. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110580>
- Pereira, A. S., Schwanz, T. L., Pinto, N. B., & Pires, P. (2018). Metodología de la investigación científica (Libro electrónico). UFSM. <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/LibroMetodologiaCientifica.pdf>
- Primo, A., Molina, M. D., Catalá, L., De Miguel, B., & Bolarín, F. (2020). Optimización del uso del agua mediante la aplicación de riego deficitario controlado (RDC) en cítricos: Una revisión. *Agricultural Water Management*, 241, 106354. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106354>
- Rao, N., Nguyen, H., & Liu, X. (2020). A review of climate change impact on citrus yield, quality, and management practices. *Agricultural Systems*, 181, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102824>
- Reig, C., Martínez-Fuentes, A., & Mesejo, C. (2023). High-temperature stress during citrus anthesis reduces pollen viability and fruit set. *Environmental and Experimental Botany*, 209, 105205. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105205>
- SciELO. (2010). Impacto del calentamiento global en la fenología de una especie vegetal. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952010000400003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000400003)