

3. Implicaciones de cambios en el clima para la producción frutícola



HELBER ENRIQUE BALAGUERA LÓPEZ*

STANISLAV MAGNITSKIY**

JOAQUÍN GUILLERMO RAMÍREZ GIL***

GERHARD FISCHER****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.296.03>

Resumen

Este capítulo tiene por objetivo mostrar una aproximación macro del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y determinantes del cambio climático bajo condiciones tropicales; mostrar cómo se ven afectados en Colombia los sistemas de producción frutícola con mayor dinamismo por su potencial comercial, como es el caso de los frutales de exportación; y presentar elementos básicos asociados a estrategias de adaptación y mitigación a los efectos adversos de los fenómenos ENSO; esto, mediante el análisis histórico de área sembrada, producción y rendimiento de frutales con potencial de exportación en el país durante temporadas bajo la influencia del fenómenos ENSO, con el fin de visualizar los posibles efectos de estos eventos climáticos sobre los sistemas de producción, e identificar probables estrategias para mitigar y adaptar los cultivos a estas condiciones.

* Doctor en Fisiología Vegetal. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3133-0355>

** Postdoctorado en Horticultura. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3715-1932>

*** Doctor en Ciencias Agrarias. Profesor, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0162-3598>

**** Doctor en Ciencias Agrarias. Profesor jubilado, Universidad Nacional de Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-0507>

Palabras clave: *adaptación, fenómenos ENSO, temperatura, precipitación, mitigación.*

Introducción

Las actividades agrícolas están directamente afectadas por los impactos potenciales del cambio climático (CC) debido a su dependencia directa de las variables asociadas al clima (Yohannes, 2016). El CC se refiere al cambio en todas aquellas variables climáticas, como la precipitación y temperatura, cuantificadas mediante herramientas estadísticas que identifican modificaciones significativas en la media de estas variables en espacios de tiempo mayores a 30 años (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés], 2014a). El CC en los trópicos se caracteriza por variaciones de los patrones de lluvia (incrementos y disminución), de la temperatura y precipitación (IPCC, 2014b). El aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos afectan la seguridad alimentaria de la humanidad (IPCC, 2019). Otros efectos del CC sobre los cultivos incluyen eventos extremos de temperaturas altas, sequías, irradiaciones solares altas, inundaciones, tormentas de lluvia, entre otras (Zegeye, 2018).

La concentración de CO₂ se identifica como uno de los factores que más altera el clima en el planeta Tierra y, por ende, mayor influencia presenta sobre el CC. Se proyecta que para finales de este siglo esta concentración aumente en el aire de hasta 600 o 700 ppm, lo que causaría un incremento de la temperatura promedio sobre la superficie de la tierra entre 4.5 y 5.0°C (Leung et al., 2014). Por su parte, según cálculos del IPCC (2013), la temperatura promedio de aire considerada también en el mismo tiempo aumentaría entre 2.6 y 4.8°C. La causa de este aumento en la temperatura es el efecto invernadero (EI) generado, sobre todo, por el incremento de la concentración de CO₂ (eCO₂) y otros gases en las actividades antropogénicas (Fischer et al., 2022a). El calentamiento global afecta directamente la estructura y función de los ecosistemas (Fischer et al., 2022a), incluyendo la fisiología, el crecimiento y desarrollo de los frutales (Ceulemans et al., 1999). Las condiciones ambientales pueden alterar las plantas durante todos sus

estados de crecimiento y desarrollo (Ali et al., 2021); aunque las plantas son capaces de activar cambios fisiológicos y moleculares específicos para responder a condiciones adversas ambientales y minimizar así el daño (Zandalinas et al., 2016), en el campo, las condiciones de estrés abiótico ocurren todas al mismo tiempo, lo que constituye una situación única de estrés y no una combinación de estrés aditivo (Mittler, 2006).

En especial, en el caso del efecto del CC sobre los frutales en el trópico, Ramírez y Kallarackal (2015) afirman que no se cuenta con mucha información disponible; es decir, se ha investigado y conocido poco sobre dónde y cómo los frutales pueden adaptarse al CC y de qué magnitud van a ser las potenciales afectaciones de este fenómeno sobre los cultivos (Porter et al., 2017). Yohannes (2016) predice que los efectos van a ser más severos en los países del trópico y subtropical, donde hay temperaturas iniciales más altas, también en suelos marginales o degradados y en regiones de bajo desarrollo con una menor capacidad de adaptación.

Se ha planteado de forma macro que uno de los mayores impactos del CC en la producción de frutales —caso aguacate— en el continente americano sería las variaciones de su distribución, dando lugar a que en las regiones tropicales esta especie se movería en el perfil altitudinal hacia las zonas altas, mientras que en las regiones subtropicales migraría hacia las latitudes bajas y altas, donde las temperaturas actuales son más bajas, pero que, en escenarios de CC, se espera incrementos (Ramírez et al., 2019a). Debido a esta nueva situación, se hace necesario realizar una aproximación de cómo serán los potenciales cambios en las variables de clima que en muchos casos se proyectan como adversas para los frutales, para tener así una comprensión completa de los múltiples efectos del CC en la fisiología de las plantas como base para lograr la apropiada adaptación de los cultivos y los mecanismos de adecuación (Swaminathan y Kesavan, 2012).

Enseguida se presentan de forma general las implicaciones de algunos de los factores ambientales asociados al CC sobre la fisiología y parámetros de producción de diferentes frutales.

Temperatura

Uno de los principales efectos del CC es el aumento en la temperatura que puede tener un impacto tanto positivo como negativo. Por una parte, estimula el crecimiento de las especies vegetales cultivables y no cultivables, lo que conlleva a una disminución de las fases fenológicas y reduce el tiempo de formación del fruto; esto es, el número de frutos y sus semillas podría ser reducido y así también la formación y viabilidad del polen (Larcher, 2003). Como consecuencia, se recorta la percepción de la luz por los ciclos de crecimiento atenuados y una alteración de los procesos relacionados con el balance de carbono de la planta (Barnabás et al., 2008). En muchos casos, las temperaturas altas implican el cierre estomático que adicionalmente reduce las tasas fotosintéticas debido a un menor influjo del CO₂ a las hojas (DaMatta et al., 2010). En estas condiciones, por el mayor aumento de la respiración de la planta comparado con la fotosíntesis, se disminuye la ganancia neta del carbono (DaMatta et al., 2010). Las temperaturas elevadas perjudican los frutales, sobre todo por el menor cuajado de los frutos que reduce la producción (Fischer et al., 2016). Estos autores reportan que en la vid las temperaturas superiores a 35°C restringen el cuajado, mientras que en el mango estos mismos niveles de temperatura disminuyen la viabilidad del polen y el cuajado de los frutos. Así mismo, el alto calor nocturno estimula la degradación de los fotoasimilados, limitando el llenado y la calidad organoléptica de los frutos (Das, 2012).

Por su parte, en cítricos, un incremento en la temperatura del aire induce al engrosamiento de mesófilo y epidermis de hojas, igual que un incremento en la densidad estomática (Shafqat et al., 2021). En el aguacate, los aumentos de temperatura sumados a los déficits hídricos y asociados a fenómenos de variabilidad climática en zonas tropicales acortan los ciclos de llenado del fruto, pero afecta los parámetros de calidad visual (tamaño) y organoléptica (ácidos grasos) (Ramírez-Gil et al., 2020).

En frutales como el mango, el litchi, la macadamia, el aguacate y los cítricos, la inducción floral depende principalmente de temperaturas “frescas” (Fischer et al., 2012), y es afectada por el calentamiento global (Rajan et al., 2020). Por ejemplo, la inducción floral en mango ocurre cuando las

inflorescencias se desarrollan bajo condiciones subtropicales frías inductivas (18°C día y 10°C noche o 15°C día y 10°C noche) (Fischer et al., 2012). La alta temperatura también genera problemas luego de la inducción floral; por ejemplo, en regiones con temperaturas medias superiores a 28°C, aceleran el crecimiento vegetativo en maracuyá, pero se reduce la producción por deshidratación del líquido estigmático (Fischer et al., 2009). Por su parte, en gulupa (*Passiflora edulis f. edulis*), temperaturas superiores a 30 / 25°C día / noche afectan la producción de flores (Jiménez et al., 2012).

En la tabla 3.1 se citan algunos ejemplos de la respuesta en producción de algunos frutales cuando son sometidos a estrés por alta temperatura.

Tabla 3.1. Respuesta en producción de los frutales a temperaturas extremas en contexto de cambio climático

Especie	Estrés y duración	Respuesta en producción	Referencia bibliográfica
Maracuyá (<i>Passiflora edulis f. flavicarpa</i>)	Temperatura del aire que supera 30°C.	Las plantas presentan exuberante crecimiento vegetativo, pero con muy poco cuajado de frutos.	Thokchom y Mandal (2017).
Olive (<i>Olea europaea L.</i>)	Los árboles que no reciben suficiente cantidad de horas frío al estar expuestas permanentemente a temperaturas superiores a 22°C.	Los árboles pueden florecer, pero las flores son de baja calidad y presentan deformaciones anatómicas. Un bajo porcentaje de cuajado de frutos.	Torres et al. (2017).
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	Exposición prolongada de árboles a las temperaturas de 36°C (día) / 27°C (noche).	El polen presentó una disminución en el porcentaje de germinación. Efecto perjudicial general de estas temperaturas en el peso seco de las mazorcas, peso seco de granos por mazorca y peso seco de granos individuales.	Mateus Rodríguez (2022).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la temperatura del suelo (ts), se le ha dado menos atención en los estudios de impacto climático; no obstante que este elemento también resulta afectado como consecuencia del calentamiento global (Jungqvist et al., 2014). La ts influye en procesos importantes para los cultivos como la absorción de agua y nutrientes y la síntesis de hormonas en las raíces (Fischer y Ordúz-Rodríguez, 2012); es bien conocido que las raíces son un lugar de síntesis de hormonas, principalmente de hormonas citoquininas (Lambers y Oliveira, 2019) y giberelinas, que controlan el crecimiento por división y elongación celular, respectivamente (Taiz et al., 2017).

Para muchas especies tropicales, el rango de temperatura edáfica óptima se encuentra entre los 20 y 25°C, pero no debe superar los 30 o 32°C (Rengel et al., 2023). Para los frutales, Agustí (2010) recomienda, en general, un rango de T_s entre 10 y 30°C, ya que temperaturas inferiores o superiores reducen marcadamente el desarrollo del sistema radical. Con temperaturas edáficas muy bajas (esto es, menores a 10°C), la absorción de nutrientes es muy limitada (Patil y Kulkarni, 2016), especialmente del fósforo, que se transporta a las raíces por difusión; así mismo, en las raíces, que crecen con baja temperatura, la permeabilidad de las membranas es reducida y la viscosidad de los líquidos aumenta, lo que disminuye su transporte en el sistema radical y su entrada al xilema del tallo (Fischer y Orduz-Rodríguez, 2012).

Con T_s de 14, 22 y 30°C en la uchuva o *goldenberry*, la mayor acumulación de masa seca (MS) de la planta se obtuvo a 22°C; a 14°C se obtuvo mayor acumulación de MS de raíces finas; pero la acumulación de MS de frutos fue mayor con 30°C. La fotosíntesis y el uso eficiente del agua incrementaron hasta 30°C, mientras que la tasa transpiratoria fue la más alta a 22°C (Fischer et al., 2000). En la tabla 3.2 se muestra el resumen de los efectos que eventualmente puede generar el incremento de la temperatura del suelo; para más detalles, consultar a Fischer et al. (2022c).

Tabla 3.2. *Parámetros fisiológicos de los frutales que se ven afectados por el incremento de la temperatura del suelo, dentro del rango mínimo (de 8 a 15°C) y máximo (de 32 a 43°C) según la especie*

	<i>Incrementa</i>	<i>Disminuye</i>
Proceso o parámetro	Síntesis hormonal, toma de agua y nutrientes. Tasa fotosintética, tasa transpiratoria, conductancia estomática, uso eficiente del agua. Biomasa de raíz y formación de raíces adventicias y crecimiento longitudinal de raíces. Crecimiento vegetativo, biomasa de la planta. Fluidez y semipermeabilidad de las membranas. Crecimiento reproductivo, número de frutos, biomasa de frutos.	Tolerancia a las inundaciones. Biomasa de raíces finas

Fuente: Modificado de Fischer et al. (2022c).

Radiación solar

En periodos de alta radiación solar, ocasionados por la disminución de la capa atmosférica de ozono y el calentamiento global, las plantas son capaces de reducir más CO₂ y aumentar la producción de carbohidratos que garantice un llenado y dulzura de los frutos de forma óptima (Sherman y Beckman, 2003). Los frutales en zonas con una radiación y temperatura mayor, dentro del rango óptimo de la especie, necesitan una menor área foliar para producir la misma utilidad que antes del potencial efecto del CC sobre la radiación; esto favorece a variedades con un rendimiento fotosintético más alto, ya que no sufren por una temprana fotoinhibición (Fischer et al., 2012). Pero una excesiva y prolongada radiación solar puede inducir golpes del sol en frutos carnosos y calentar tanto las células afectadas que los frutos se rajan (Fischer et al., 2021a), lo que, además, puede agravarse por la presencia de patógenos que atacan estos tejidos enfermos, denominados patógenos secundarios (Fischer et al., 2022d).

En granadilla (*Passiflora ligularis* Juss.) el golpe de sol es la fisiopatía más importante, provocada por el exceso de radiación solar en frutos desprotegidos por las hojas; normalmente se acentúa luego de la poda de ramas o por una sequía, que reduce el área foliar (Rivera et al., 2002).

El golpe de sol es igualmente un factor abiótico de alto impacto en aguacate, donde provoca considerables pérdidas al ser considerado un agente de rechazo de la fruta en proceso de selección (poscosecha), y cuyo origen se ha asociado a altas radiaciones y árboles con bajas áreas foliares (Ramirez-Gil et al., 2020). Además, un exceso de radiación genera golpe de sol en los frutos de gulupa y disminuye el desarrollo normal de la planta (Jiménez et al., 2012). Para mandarina Satsuma se detalla en la tabla 3.3 el efecto de la alta radiación sobre la presencia de golpe de sol y de otros parámetros fisicoquímicos.

Por otra parte, la ausencia de nubes, sobre todo en épocas secas prolongadas, hacen más probable la presencia de rayos ultravioletas (UV), particularmente los UV-B, entre 280 y 320 nm que inciden mayormente en zonas con altitudes más altas (Fischer et al., 2022d). Varias especies han desarrollado mecanismos de protección, las hojas son más pequeñas, pero

incrementan el número de capas de células en el mesófilo; por lo tanto, son más gruesas, con una cutícula más resistente y, en algunos casos, pubescencia densa y mayor número de estomas en altitudes más altas. En la uchuva (*Physalis peruviana L.*) se ha reportado como mecanismo de evolución una densa pubescencia en sus partes verdes (Fischer y Melgarejo, 2020).

Tabla 3.3. Respuesta de los frutos de la mandarina Satsuma (*Citrus unshiu* Marc.) a la alta radiación causando golpe de sol

Condición	Aumento	Disminución
Comparación de la severidad del daño usando los grados I: leve, II: poco, III: moderado-severo y IV: severo.	Daños a epidermis y glándulas aceitosas aumentaron con la severidad del golpe de sol. Polifenoles totales y la actividad antioxidante se aumentaron en frutos sin golpe del sol y los del grado III. Mayor firmeza en frutos quemados.	Con la severidad del golpe del sol se disminuyeron en la corteza los contenidos de clorofila a, b y total. Los carotenoides en la pulpa se redujeron con el aumento del daño. Los sólidos solubles totales y la acidez total titulable disminuyeron en frutos quemados.

Fuente: Modificado de Kim et al. (2022).

En el lulo (*Solanum quitoense Lam.*) ha aumentado la concentración de antioxidantes (antocianinas) en el sistema vascular de la planta (Fischer et al., 2022b), junto con la presencia de tricomas sobre sus pétalos y fruto (Fischer y Orduz-Rodríguez, 2012). Respecto a la mora, se reporta la presencia de tricomas glandulares y simples vellosidades (Moreno-Medina y Casierra-Posada, 2021). Como otro mecanismo de adaptación, la planta incrementa ciertos pigmentos fotoprotectores como antocianinas y carotenoides, además de un mejor sistema antioxidante (Chen et al., 2013). En los frutos también se desarrollan mecanismos de protección, donde se destaca el aumento de pigmentos, compuestos fitoquímicos como los fenoles solubles, flavonoles y la capacidad antioxidante (Martz et al., 2010).

Por otro lado, la baja radiación también es un problema asociado al CC que altera los sistemas productivos de frutales, y que se acentúa en épocas de lluvias. La poca radiación no es suficiente para que los frutales mantengan altas tasas de fotosíntesis; por tal razón estarían por debajo de su punto de saturación lumínica. También se afecta la apertura estomatal, que conlleva un menor intercambio gaseoso; esto puede alterar la fotosíntesis directamente, pero también de forma indirecta, por un menor movimiento de iones a la parte aérea siguiendo la vía de flujo de masas. Lo anterior es más común para iones con movimiento y preferencia por xilema como Ca^{2+}

y B, cuya disminución potencialmente causa problemas reproductivos y gran cantidad de fisiopatías en los frutos.

La falta de luz en los frutales se considera también como responsable del pobre desarrollo del color. Por lo anterior, la baja radiación es un factor que disminuye la producción, pero también la calidad de los frutales. La gulupa es muy susceptible a los cambios de radiación solar porque afectan la productividad de las plantas; los días nublados disminuyen el crecimiento, la inducción de botones y la apertura florales (Fischer y Miranda, 2021). Ocampo y Posada (2012) afirman que la nubosidad excesiva durante la fructificación de la gulupa retrasa la maduración, disminuye el contenido de sólidos solubles y la calidad del jugo.

CO₂

El aumento en la concentración de CO₂ atmosférico está clasificado como una de las mayores causas del CC, y se predice un incremento hasta de 600 o 700 ppm para fines de este siglo (Leung et al., 2014). Las plantaciones de frutales son sistemas de producción que pueden secuestrar carbono de la atmósfera (Sharma et al., 2021). El CO₂ representa el sustrato más beneficioso para la fotosíntesis; de manera que es el contribuyente de mayor importancia en la producción mundial de los alimentos (DaMatta et al., 2010).

Las concentraciones elevadas de CO₂ (e-CO₂), pueden fomentar la fotosíntesis, aumentar la biomasa y el uso eficiente de agua, e influyen positivamente en el rendimiento y la calidad de los frutos (Rajan et al., 2020). Estos últimos autores señalan que el e-CO₂ intensificaría la fotosíntesis a temperaturas cercanas al óptimo del cultivo y no a la baja.

Por su parte, Mishra et al., (2019) afirman que la razón clave de esta fotosíntesis enriquecida es el aumento de la eficiencia de carboxilación de la RuBisCO, que es relativamente baja en la concentración del CO₂ atmosférico ambiental. Al respecto, en el transcriptoma de los tejidos foliares en fresa se identificaron 150 genes expresados diferencialmente en respuesta al e-CO₂, de los cuales 14 estaban involucrados en la fotosíntesis (Li et al., 2020). Fischer et al., (2022a) resaltan el “efecto de fertilización

del CO₂” a los cultivos de frutales que aumentaría potencialmente bajo escenarios de cc.

Los estudios en invernadero y con enriquecimiento de dióxido de carbono al aire libre (FACE, por sus siglas en inglés) mostraron un aumento del rendimiento fotosintético y con esto una mayor producción de uvas (Wohlfahrt et al., 2018). En la pitaya amarilla (*Selenicereus megalanthus* K. Schum. ex Vaupel), las plantas con un e-CO₂ de 1.000 ppm reaccionaron con 129, 68 y 233 % de aumento en la toma diaria del CO₂, en masa seca del tallo y en número de botones florales, respectivamente; además de 63 % de mayor peso fresco en los frutos, comparado con los desarrollados en CO₂ ambiental (Weiss et al., 2010).

Tabla 3.4. *Procesos fisiológicos y parámetros de crecimiento y rendimiento que se ven afectados por el e-CO₂ en frutales*

	<i>Incrementa</i>	<i>Disminuye</i>
Proceso o parámetro	Uso eficiente del agua, tasa de fotosíntesis, toma de nitrógeno*, tasa respiratoria*, producción de biomasa, grosor del tronco y número de ramas, rendimiento.	Conductancia estomática, transpiración, regeneración de RuBP, nitrógeno foliar.

Nota: * El proceso puede disminuir en algunos casos.

Fuente: Elaborado a partir de Fischer et al. (2022a).

Con un e-CO₂ de 600 a 650 ppm muchas especies de plantas de tipo C3 aumentarán en 30 % la velocidad de su crecimiento (Taiz et al., 2017); además, el e-CO₂ puede aliviar los efectos del estrés por sequía (Leakey, 2009) y anegamiento; por ejemplo, en especies de *Prunus* (Pérez-Jiménez et al., 2017). En cítricos, los cambios morfológicos de la hoja, en particular la disminución de la densidad estomática, puede presentarse en respuesta al aumento de la concentración de CO₂ (Vincent et al., 2020). Algunos frutales compensan la reducción de la presión parcial del CO₂ en la altitud tropical por el aumento del número de estomas foliares, como reportan Fischer y Melgarejo (2020) para el caso de la uchuva.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el mayor crecimiento de los frutales por el e-CO₂ exige un considerable suministro de nutrientes y agua, por lo cual es muy importante la selección de genotipos que se benefician del e-CO₂ y que presentan un uso eficiente de nitrógeno y agua (Fischer et al., 2022a).

Cambios en la precipitación

Como uno de los mayores efectos del CC, se prevén condiciones de sequía, esto es, la reducción de precipitaciones. Además del déficit hídrico, están las altas temperaturas que generan factores de estrés abiótico de mayor envergadura, que en muchos casos, por su ocurrencia simultánea, perjudican el desarrollo de los cultivos y sus rendimientos (Zandalinas et al., 2017). Así mismo, de acuerdo con estos autores, dichos desafíos ambientales conducen a estrés oxidativo en los cultivos por la síntesis de especies reactivas al oxígeno (ROS), principalmente por el desacople de las fases en la fotosíntesis. Las ROS son la principal causa de daños importantes a nivel celular y molecular que luego desencadenan graves problemas en la fisiología y la producción de los frutales y, en general, de las plantas. De acuerdo con Restrepo-Díaz y Sánchez-Reinoso (2020), el estrés hídrico es una de las principales causas de pérdida de los rendimientos en los frutales, especialmente cuando el estrés se presenta en la etapa reproductiva, generando una disminución en los rendimientos de 8 a 40 %.

Mendoza-Vargas et al. (2021) observaron que en plantas de uchuva, bajo estrés por déficit hídrico, se presentó mayor temperatura foliar y prolina; sin embargo, disminuyeron la conductancia estomática, el contenido relativo de agua, la altura y el número de hojas. Bajo estrés hídrico, las plantas de uchuva redujeron el crecimiento longitudinal de sus ramas, perjudicando el llenado y el número de los frutos que se desarrollan en la mayoría de los nudos de las ramas reproductivas (Fischer y Melgarejo, 2020). Del mismo modo, la menor área foliar y el cierre parcial de los estomas promovido por el estrés hídrico afectan notablemente la fotosíntesis y, en consecuencia, el crecimiento y la producción de la planta, sobre todo si el estrés ocurre durante el llenado del fruto (Gariglio et al., 2007).

El estrés hídrico severo, característico del fenómeno de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), reduce drásticamente el crecimiento de la planta de uchuva, generando hojas y frutos más pequeños (Fischer y Melgarejo, 2014) y afectando de forma importante su productividad, tal como se presenta para algunos frutales en la tabla 3.5. Para el caso de granadilla, el estrés hídrico en las etapas reproductivas, desde la preflo-

ración hasta el llenado del fruto, provoca la abscisión de las estructuras florales y reduce considerablemente el rendimiento (Miranda, 2020). Este efecto perjudicial en la fase reproductiva también está relacionado con la deficiencia de nutrientes como fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y boro (B) (Fischer y Miranda, 2021).

Existen mecanismos de adaptación según la especie y variedad; por ejemplo, en el caso de los cítricos (citrange Carrizo y mandarina Cleopatra), el Carrizo es más tolerante a las condiciones de sequía y a las altas temperaturas debido a su enfriamiento foliar por el aumento de la transpiración y por su habilidad de modular el flujo de los electrones fotosintéticos, por lo cual el daño oxidativo es menor (Zandalinas et al., 2016). Sin embargo, este proceso, en teoría, implicaría un aumento en el consumo de agua, lo que sería altamente limitante; pues durante el ENOS se prevé una reducción en la precipitación y los niveles de agua disponible en suelo. Bajo condiciones de sequía, Bartels y Sunkar (2005) consideran que el ácido abscísico (ABA) es una hormona esencial para identificar el estrés y está implicado en el control del cierre estomático, en la expresión de genes que conducen a respuestas adaptativas y en la producción de osmolitos compatibles (Zandalinas et al., 2016).

Tabla 3.5. Respuesta en producción de los frutales al déficit hídrico

Especie	Respuesta	Referencia
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	El déficit prolongado de agua puede limitar el transporte de azúcares desde hojas hacia frutos y disminuir la síntesis de lípidos en las semillas en desarrollo, lo que resulta en un menor peso de frutos y semillas.	Lahive et al. (2019).
Banano (<i>Musa sp.</i>)	Reducción en el tamaño de dedos y una disminución en el peso fresco de frutos.	Panigrahi et al. (2021).
Mango (<i>Mangifera indica</i>)	Se disminuyó el peso de los frutos, la pulpa y las semillas, así como por largo y ancho de frutos individuales. Se disminuyó la cantidad de frutos por árbol que alcanzaron un estado de madurez.	Helaly et al. (2017).

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, Gariglio et al. (2007) recomiendan la selección de variedades más tolerantes a la sequía, cuyas estrategias adaptativas estarían en el hecho de que presentan cierre estomático temprano, transpiración cuticular

efectiva, reducción del área foliar por abscisión y habilidad de cambiar la orientación de la hoja hacia el sol. Igualmente, Fischer y Ordúz-Rodríguez (2012) sugieren que los genotipos de frutales con un sistema radical profundo y extensivo son importantes para resistir periodos de estrés hídrico prolongados.

Anegamiento e inundación

Como efecto del cc, los eventos por anegamiento e inundación se están incrementando en frecuencia y son impredecibles a nivel global debido a las lluvias erráticas y no estacionales (Dubey et al., 2021). La inundación de los suelos es uno de los factores más nocivos para la producción de los cultivos (Kaur et al., 2020) y pueden causar pérdidas en los rendimientos de 10 a 40 % (Aldana et al., 2014); su efecto es mucho más grave con la presencia de fenómenos climáticos como el ENSO-La Niña. Por su parte, Schaffer et al. (2009) observaron que en uno o dos días de anegamiento la concentración de oxígeno en el suelo puede disminuir de 20 % a menos de 5 %. Esta condición afecta notablemente el funcionamiento de la raíz; por ejemplo, en especies altamente susceptibles a inundación como el aguacate, la saturación de agua superior a 45 % asociada a un contenido de gases en suelo menor de 35.9 % presenta un alto impacto en variables de crecimiento y desarrollo de esta especie por la inducción del problema fisiopatológico conocido como pudrición de raíces por una condición de hipoxia-anoxia (Ramírez-Gil y Morales-Osorio, 2019).

En este sentido, y de acuerdo con Restrepo-Díaz y Sánchez-Reinoso (2020), el primer síntoma que se presenta es un cierre estomático que influye en la absorción pasiva del agua; también se produce un descenso de la transpiración, lo que provoca el marchitamiento y la senescencia de las hojas; el crecimiento del tallo, el área foliar, el cuajado del fruto y el rendimiento también pueden verse afectados (Restrepo-Díaz y Sánchez-Reinoso, 2020).

Muchos frutales responden al estrés por inundación mediante la reducción de la tasa fotosintética y conductancia estomática, como por ejemplo en citrus “Cleopatra” (Pérez-Jiménez y Pérez-Tornero, 2021), aguacate (Ramírez-Gil y Morales-Osorio, 2019a) y papaya (Rodríguez et al., 2014);

o por el contenido o índice de clorofila, en maracuyá (Basso et al., 2019), gulupa (Chebet et al., 2020) y naranjilla (Sánchez-Reinoso et al., 2019).

El anegamiento causa diferentes respuestas fisiológicas en plantas de uchuva. Se ha reportado en plántulas de este frutal una disminución de la conductancia estomática de $\sim 410 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a $\sim 210 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con 8 días de anegamiento (Chávez-Arias et al., 2019). Estos mismos autores también encontraron disminución del potencial hídrico foliar, área foliar y parámetros de la fluorescencia de la clorofila a (F_v/F_m , ETR, Y(II) y qP), mientras que los contenidos de malondialdehído y prolina incrementaron.

De acuerdo con Faria et al. (2020) el maracuyá se considera como moderadamente sensible al exceso de agua en el suelo; sin embargo, Basso et al. (2019) reportan que esta especie no tolera el anegamiento por más de 4 días, tal condición afecta notablemente el crecimiento de las raíces y el tallo. Esta observación concuerda con la clasificación de Crane et al. (2020), donde se reporta que las pasifloráceas no son tolerantes al anegamiento o a los terrenos inundados (tabla 3.6). En el caso de la naranjilla (o lulo), la planta disminuye su crecimiento por anegamiento a partir de 6 días (Cardona et al., 2016) y la fotosíntesis a partir de 3 días (Sánchez-Reinoso et al., 2019).

Tabla 3.6. Grupos de tolerancia en frutales tropicales y subtropicales al anegamiento

Tolerantes	Moderadamente tolerantes	No tolerantes
Guayaba (<i>Psidium guajava</i>)	Litchi (<i>Litchi chinensis</i>)	Aguacate (<i>Persea americana</i>)
Sapodilla (<i>Manilkara sapota</i>)	Longan (<i>Dimocarpus longan</i>)	Papaya (<i>Carica papaya</i>)
Caimito (<i>Pouteria caimito</i>)	Limón 'Tahiti' (<i>Citrus × latifolia</i>)	Mamey sapote (<i>Pouteria sapota</i>)
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	Anistel (<i>Pouteria campechiana</i>)	Anón (<i>Annona squamosa</i>)
Citrus injertados (<i>Citrus spp.</i>)	Mango (<i>Mangifera indica</i>)	Atemoya (<i>Annona × atemoya</i>)
	Carambola (<i>Averrhoa carambola</i>)	Pasifloráceas (<i>Passiflora spp.</i>)
	Banano (<i>Musa × paradisiaca</i>)	Jackfruit (<i>Artocarpus heterophyllus</i>)

Fuente: Adaptado por Crane et al. (2020).

Es necesario tener en cuenta que en cualquier grupo de tolerancia que se reporta en la tabla 3.6, las plantas pueden ser afectadas por las enfermedades de raíces, dado que la humedad podría actuar como factor predisponente en la planta, o alterar de forma directa la cantidad de inóculo del agente causal, o actuar como mecanismo de diseminación de la enfermedad (Ramírez-Gil et al., 2021). También se debe mencionar que cuando los periodos de lluvias son muy prolongados se puede afectar la inducción floral; esto es debido a que algunos frutales precisan un tiempo de déficit hídrico seguido de un buen suministro de agua, como ocurre con la mandarina. Orduz y Fischer (2007) reportan que en esta especie de la variedad Arrayana se presentó la principal floración completa después de un periodo de estrés hídrico de 90 días, acumulando un déficit de 247 mm durante ese tiempo.

Conclusiones

Los fenómenos de variabilidad y cambio climático con sus eventos extremos, tales como incremento en temperatura, variación en la precipitación, sequías, inundación, mayor radiación, entre otros, presentan múltiples efectos en la producción y calidad de los frutales, especialmente en el trópico y subtropico, los cuales podrían ser perjudiciales. Por su parte, las temperaturas elevadas (esto es, mayores a 30°C) asociadas a la variabilidad y cambio climático disminuyen la duración de procesos de floración y de cuajado, afectan la fotosíntesis, el rendimiento y la calidad del fruto, acortando los ciclos fenológicos, pero con potenciales impactos sobre parámetros de calidad de los frutos por menor bioacumulación de compuestos funcionales.

Las radiaciones solares altas y prolongadas causan el golpe del sol en los frutos carnosos, especialmente en frutales con deficiente área foliar y en altitudes mayores por la excesiva radiación UV. La baja radiación solar en épocas prolongadas de nubosidad y lluvia disminuyen la fotosíntesis, producción y calidad (color y sabor) de los frutos. En su caso, el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico asociada al efecto invernadero, como una de las razones inherentes dentro de los fenómenos de cambio climático, podrían favorecer la tasa fotosintética de los frutales y, de este modo, la

producción y calidad de los frutos, pero se trata de sólo una variable dentro de muchas otras que se verán afectadas bajo escenarios de cambio climático. Para lograr entender cómo se comporta una especie deben desarrollarse ensayos bajo incrementos en temperatura, variaciones en precipitación, etcétera.

El estrés hídrico que ocurre normalmente con temperaturas elevadas genera pérdida de producción en los cultivos; especialmente cuando sucede en la etapa reproductiva y en las primeras fases. Esta situación hace necesaria la búsqueda de patrones adaptativos más eficientes ante dicha adversidad mediante múltiples respuestas, como un cierre estomático más temprano, una reducción del área foliar y de la fotosíntesis, entre otros. Del mismo modo, el anegamiento y la inundación de los suelos son de los factores más nocivos para los cultivos, debido a la falta de oxígeno para el funcionamiento de las raíces, lo que causa un cierre estomático más prolongado, marchitamiento y senescencia foliar prematura, afectando en altos niveles la producción de los frutales. Por lo anterior, es indispensable desarrollar múltiples estrategias de mitigación y adaptación a este fenómeno.

Referencias

- Agustí, M. (2010). *Fruticultura*. Mundi-Prensa.
- Aldana, F., García, P. N., y Fischer, G. (2014). Effect of waterlogging stress on the growth, development and symptomatology of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(149), 393-400.
- Ali, M. M., Yousef, A. F., Li, B., y Chen, F. (2021). Effect of environmental factors on growth and development of fruits. *Tropical Plant Biology*, 14, 226-238.
- Barnabás, B., Järger, K., y Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell and Environment*, 31, 11-38.
- Bartels, D., y Sunkar, R. (2005). Drought and salt tolerance in plants. *CRC Critical Review of Plant Science*, 24, 23-58.
- Basso, C., Rodríguez, G., Rivero, G., León, R., Barrios, M., y Díaz, G. (2019). Respuesta del cultivo de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims) a condiciones de estrés por inundación. *Bioagro*, 31(3), 185-192.
- Cardona, W. A., Bautista-Montealegre, L. G., Flórez-Velasco, N., y Fischer, G. (2016). Desarrollo de la biomasa y raíz en plantas de lulo (*Solanum quitoense* var. *septentrio-*

- nale) en respuesta al sombrío y anegamiento. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 53-65.
- Ceulemans, R., Janssens, I. A., y Jach, M. E. (1999). Effects of CO₂ enrichment on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies. *Annals of Botany*, 84(5), 577-590.
- Chávez-Arias, C. C., Gómez-Caro, S., y Restrepo-Díaz, H. (2019). Physiological, biochemical and chlorophyll fluorescence parameters of *Physalis peruviana* L. seedlings exposed to different short-term waterlogging periods and fusarium wilt infection. *Agronomy*, 9, 213.
- Chebet, D., Kariuki, W., Wamocho, L., y Rimberia, F. (2020). Effect of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, biochemical characteristics and nutrient uptake of passion fruit seedlings under flooding stress. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 16(4), 24-31.
- Chen, C., Li, H., Zhang, D., Li, P., y Ma, F. (2013). The role of anthocyanin in photoprotection and its relationship with the xanthophyll cycle and the antioxidant system in apple peel depends on the light conditions. *Physiologia Plantarum*, 149(3), 354-66.
- Crane, J. H., Balerdi, C. F., y Schaffer, B. (2020). Managing your tropical fruit grove under changing water table levels. *EDIS*, 2016(10). <https://doi.org/10.32473/edis-hs202-2003>
- DaMatta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C., y Buckeridge, M. S. (2010). Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43, 1814-1823.
- Das, H. P. (2012). *Agrometeorology in extreme events and natural disasters*. BS Publications.
- Dubey, S. S., Kuruwanshi, V. B., Bhagat, K. P., y Ghodke, P. H. (2021). Impact of excess moisture in onion genotypes (*Allium cepa* L.) under climate change. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(3), 166-175.
- Faria, L. O., Souza, A. G. V., Alvarenga, F. P., Silva, F. C. M., Junior, J. S. R., Amorim, V. A., Borges, L. P., y Matos, F. S. (2020). *Passiflora edulis* growth under different water regimes. *Journal of Agricultural Science*, 12(4). <https://doi.org/10.5539/jas.v12n4p231>
- Fischer, G., Melgarejo, L. M., y Balaguera-López, H. E. (2022a). Review on the impact of elevated CO₂ concentrations on fruit species in the face of climate change. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2).
- Fischer, G., Parra-Coronado, A., y Balaguera-López, H. E. (2022b). Altitude as a determinant of fruit quality with emphasis on the Andean tropics of Colombia. A review. *Agronomía Colombiana*, 40(2), 212-227.
- Fischer, G., Balaguera-López, H. E., y Cleves-Leguizamo, J. A. (2022c). Impact of soil temperature on fruit species within climate change scenarios. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(1).
- Fischer, G., Orduz-Rodríguez, J. O., y Amarante, C. V. T. do (2022d). Sunburn disorder in tropical and subtropical fruits. A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(3). <https://doi.org/10.17584/rcch.2022v16i3.15703>
- Fischer, G., y Miranda, D. (2021). Review on the ecophysiology of important Andean

- fruits: *Passiflora* L. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(2), 9471-9481.
- Fischer, G., Balaguera-López, H. E., y Álvarez-Herrera, J. (2021a). Causes of fruit cracking in the era of climate change. A review. *Agronomía Colombiana*, 39(2), 196-207.
- Fischer, G., y Melgarejo, L. M. (2020). The ecophysiology of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) - an Andean fruit crop. A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 14(1), 76-89.
- Fischer, G., Ramírez, F., y Casierra-Posada, F. (2016). Ecophysiological aspects of fruit crops in the era of climate change. A review. *Agronomía Colombiana*, 34(2), 190-199.
- Fischer, G., y Melgarejo, L. M. (2014). Ecofisiología de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). En C. P. Carvalho y D. A. Moreno (Eds.), *Physalis peruviana: fruta andina para el mundo* (pp.31-47). Limencop SL.
- Fischer, G., y Orduz-Rodríguez, J. O. (2012). Ecofisiología en frutales. En G. Fischer (Ed.), *Manual para el cultivo de frutales en el trópico* (pp. 54-72). Produmedios.
- Fischer, G., Ramírez, F., y Almanza-Merchán, P. J. (2012). Inducción floral, floración y desarrollo del fruto. En G. Fischer (Ed.), *Manual para el cultivo de frutales en el trópico* (120-140). Produmedios.
- Fischer, G., Casierra-Posada, F., y Piedrahíta, W. (2009). Ecofisiología de las especies pasifloráceas cultivadas en Colombia. En D. Miranda, G. Fischer, C. Carranza, S. Mag-nitskiy, F. Casierra, W. Piedrahíta y L. E. Flórez (Eds.), *Cultivo, poscosecha y comercialización de las pasifloráceas en Colombia: maracuyá, granadilla, gulupa y curuba* (45-67). Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas.
- Fischer, G., Ebert, G., y Lüdders, P. (2000). Root-zone temperature effects on dry matter distribution and leaf gas exchange of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Acta Horticulturae*, 531, 169-173.
- Gariglio, N. F., Pilatti, R. A., y Agustí, M. (2007). Requerimientos ecofisiológicos de los árboles frutales. En G. O. Sozzi (Ed.), *Árboles frutales. Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento* (41-82). Editorial Universidad de Buenos Aires.
- Helaly, M. N., El-Hoseiny, H., El-Sheery, N. I., Rastogi, A., y Kalaji, H. M. (2017). Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant physiology and biochemistry*, 118, 31-44.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014a). Annex II: Glossary. En *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 117-130). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014b). *AR5 Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). Summary for Policymakers. En *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes terrestrial ecosystems*. IPCC.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Summary for policymakers. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jiménez, Y., Carranza, C., y Rodríguez, M. (2012). Gulupa (*Passiflora edulis* Sims.). En G. Fischer (Ed.), *Manual para el cultivo de frutales en el trópico* (pp. 579-599). Pro-
dumedios.
- Jungqvist, G., Oni, S. K., Teutschbein, C., y Futter, M. N. (2014). Effect of climate change on soil temperature in Swedish boreal forests. *PLOS ONE*, 9(4).
- Kaur, G., Singh, G., Motavalli, P. P., Nelson, K. A., Orlowski, J. M., y Golden, B. R. (2020). Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, 112(3), 1475-1501.
- Kim, M., Park, Y., Yun, S. K., Kim, S. S., Joa, J., Moon, Y.-E., y Do, G.-R. (2022). The anatomical differences and physiological responses of sunburned Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruits. *Plants*, 11(14).
- Lahive, F., Hadley, P., y Daymond, A. J. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(5). <http://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Lambers, H., y Oliveira, F. S. (2019). *Plant physiological ecology*. Springer Nature.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology*. Springer-Verlag.
- Leakey, A. D. B. (2009). Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. *Proceedings of the Royal Society B*, 276, 2333-2343.
- Leung, D. Y., Caramanna, G., y Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 39, 426-443.
- Li, X., Zhao, J., Shang, M., Song, H., Zhang, J., Xu, X., Zheng, S., Hou, L., Li, M., y Xing, G. (2020). Physiological and molecular basis of promoting leaf growth in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) by CO₂ enrichment. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 34(1), 905-917.
- Martz, F., Jaakola, L., Julkunen-Tiitto, R., y Stark, S. (2010). Phenolic composition and antioxidant capacity of bilberry (*Vaccinium myrtillus*) leaves in Northern Europe following foliar development and along environmental gradients. *Journal of Chemical Ecology*, 36, 1017-1028.
- Mateus Rodríguez, J. F. (2022). *Evaluating the combined effects of climate change parameters on growth and physiology of Theobroma cacao L.* [Tesis de postdoctorado, University of Reading].
- Mendoza-Vargas, L. A., Villamarín-Romero, W. P., Cotrino-Tierradentro, A. S., Ramírez-Gil, J. G., Chávez-Arias, C. C., Restrepo-Díaz, H., y Gómez-Caro, S. (2021). Physiological response of cape gooseberry plants to *Fusarium oxysporum* f. sp. *physali*, fusaric acid, and water deficit in a hydroponic system. *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Miranda, D. (2020). Granadilla: *Passiflora ligularis* Juss. En A. Rodríguez, F. G. Faleiro, M.

- Parra y A. M. Costa (Eds.), *Pasifloras: especies cultivadas en el mundo* (65-103). ProImpress.
- Mishra, A.K., Agrawal, S. B., y Agrawal, M. (2019). Rising atmospheric carbon dioxide and plant responses: current and future consequences. En *Climate change and agricultural ecosystems* (pp. 265-306). Elsevier.
- Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science*, 11, 15-19.
- Moreno-Medina, B. L., y Casierra-Posada, F. (2021). Caracterización de especies de mora (*Rubus* sp.) cultivadas en los altiplanos tropicales. En G. Fischer, D. Miranda, S. Magnitskiy, H. E. Balaguera-López y Z. Molano (Eds.), *Avances en el cultivo de las berries en el trópico* (pp.102-112). Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas. <https://doi.org/10.17584/IBerrie>
- Ocampo, J., y Posada, P. (2012). Ecología del cultivo de la gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims). En J. Ocampo y K. Wyckhuys (Eds.), *Tecnología para el cultivo de la gulupa en Colombia* (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims) (29-32). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Orduz, J., y Fischer, G. (2007). Balance hídrico e influencia del estrés hídrico en la inducción y desarrollo floral de la mandarina 'Arrayana' en el piedemonte llanero de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 25(2), 255-263.
- Panigrahi, N., Thompson, A. J., Zobelzu, S., y Knox, J. W. (2021). Identifying opportunities to improve management of water stress in banana production. *Scientia Horticulturae*, 276.
- Patil, D. D., y Kulkarni, M. E. (2016). Soil temperature and its influence of crop growth. *Readers Shelf*, 12(9), 41-42.
- Pérez-Jiménez, M., y Pérez-Tornero, O. (2021). Short-term waterlogging in Citrus rootstocks. *Plants*, 10(12).
- Pérez-Jiménez, M., Hernández-Munuera, M., Piñero, M. C., López-Ortega, G., y Amor, F. M. del (2017). CO₂ effects on the waterlogging response of 'Gisela' 5 and 'Gisela 6' (*Prunus cerasus* × *Prunus canescens*) sweet cherry (*Prunus avium*) rootstocks. *Journal of Plant Physiology*, 213, 178-187.
- Porter, J. R., Howden, M., y Smith, P. (2017). Considering agriculture in IPCC assessments. *National Climate Change*, 7, 680-683.
- Rajan, R., Feza, M., Pandey, K., Aman, A., y Kumar, V. (2020). Climate change and resilience in fruit crops. En *Climate change and its effects on Agriculture* (337-354). *Biotec Books*.
- Ramirez, F., y Kallarackal, J. (2015). *Responses of fruit trees to global climate change*. Springer International Publishing.
- Ramírez-Gil, J. G., Castañeda-Sánchez, D., y Morales-Osori, J. G. (2021). Edaphic factors associated with the development of avocado wilt complex and implementation of a GIS tool for risk visualization. *Scientia Horticulturae*, 288.
- Ramírez-Gil, J. G., Cobos, M. E., Jiménez-García, D., Morales-Osorio, J. G., y Peterson, A. T. (2019a). Current and potential future distributions of Hass avocados in the face of climate change across the Americas. *Crop and Pasture Science* 70, 694-708.

- Ramírez-Gil, J. G., Franco, G., y Henao-Rojas, J. C. (2019b). Review of the concept of quality in Hass avocado and the pre-harvest and harvest factors that determine it under tropical conditions. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13, 359-370.
- Ramírez-Gil, J. G., López, J. H., y Henao-Rojas, J. C. (2020). Causes of Hass avocado fruit rejection in preharvest, harvest, and packinghouse: Economic losses and associated variables. *Agronomy*, 10(8).
- Ramírez-Gil, J. G., y Morales-Osorio, J. G. (2020). Development and validation of severity scales of avocado wilt complex caused by *Phytophthora cinnamomi*, *Verticillium dahliae* and hypoxia-anoxia disorder and their physiological responses in avocado plants. *Agronomía Colombiana*, 38(1), 85-100.
- Ramírez-Gil, J. G., y Morales-Osorio, J. G. (2018). Microbial dynamics in the soil and presence of the avocado wilt complex in plots cultivated with avocado cv. Hass under ENSO phenomena (El Niño–La Niña). *Scientia Horticulturae*, 240, 273-280.
- Rengel, Z., Cakmak, I., y White, P. J. (2023). *Marschner's mineral nutrition of plants*. Academic Press.
- Restrepo-Díaz, H., y Sánchez-Reinoso, A. D. (2020). Chapter 5. Ecophysiology of fruit crops: A glance at its impact on fruit crop productivity. En A. K. Srivastava y C. Hu (Eds.), *Fruit Crops: Diagnosis and Management of Nutrient Constraints* (59-66). Elsevier.
- Rivera, B., Miranda, D., Ávila, L., y Nieto, A. (2002). *Manejo integral del cultivo de la granadilla* *Passiflora ligularis* Juss. Editora Litoas.
- Rodríguez, G., Schaffer, B., Basso, C., y Vargas, A. (2014). Efecto del tiempo de inundación del sistema radical sobre algunos aspectos fisiológicos y desarrollo del cultivo de lechosa (*Carica papaya* L.). *Revista Facultad de Agronomía (UCV)*, 40(3), 89-98.
- Sánchez-Reinoso, A. D., Jiménez-Pulido, Y., Martínez-Pérez, J. P., Pinilla, C. S., y Fischer, G. (2019). Chlorophyll fluorescence and other physiological parameters as indicators of waterlogging and shadow stress in lulo (*Solanum quitoense* var. *septentrionale*) seedlings. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(3), 325-335.
- Schaffer, B., Urban, L., Lu, P., y Whiley, A. (2009). Ecophysiology. En R. E. Litz (Ed.), *The mango. Botany, production and uses* (170-209). CAB International.
- Shafqat, W., Naqvi, S. A., Maqbool, R., Haider, M. S., Jaskani, M. J., y Khan, I. A. (2021). Climate change and citrus. En M. S. Khan e I. A. Khan (Eds.), *Citrus: Research, Development and Biotechnology* (1-22). IntechOpen.
- Sharma, S., Rana, V. S., Prasad, H., Lakra, J., y Sharma, U. (2021). Appraisal of carbon capture, storage, and utilization through fruit crops. *Frontiers in Environmental Science*, 9.
- Sherman, W. B., y Beckman, T. G. (2003). Climatic adaptation in fruit crops. *Acta Horticulturae*, 622, 411-428.
- Swaminathan, M. S., y Kesavan, P. C. (2012). Agricultural research in an era of climate change. *Agricultural Research*, 1, 3-11.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., y Murphy, A. (2017). *Fisiología e desenvolvimento vegetal*. Artmed.
- Thokchom, R., y Mandal, G. (2017). Production preference and importance of passion

- fruit (*Passiflora edulis*): A review. *Journal of Agricultural Engineering and Food Technology*, 4(1), 27-30.
- Torres, M., Pierantozzi, P., Searles, P., Rousseaux, M. C., García-Inza, G., Miserere, A., Maestri, D. (2017). Olive cultivation in the southern hemisphere: flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments. *Frontiers in Plant Science*, 8.
- Vincent, C., Morillon, R., Arbona, V., y Gómez-Cadenas, A. (2020). Citrus in changing environments (271-289). En *The genus citrus*. Woodhead Publishing.
- Weiss, I., Mizrahi, Y., y Raveh, E. (2010). Effect of elevated CO₂ on vegetative and reproductive growth characteristics of the CAM plants *Hylocereus undatus* and *Selenicereus megalanthus*. *Scientia Horticulturae*, 123, 531-536.
- Wohlfahrt, Y., Smith, J. P., Tittmann, S., Honermeier, B., y Stoll, M. (2018). Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under Free Air Carbon-dioxide Enrichment (FACE). *European Journal of Agronomy*, 101, 149-162.
- Yohannes, H. (2016). A review on relationship between climate change and agriculture. *Journal of Earth Science and Climate Change*, 7(2).
- Zandalinas, S. I., Balfagón, D., Arbona, V., y Gómez-Cadenas, A. (2017). Modulation of antioxidant defense system is associated with combined drought and heat stress tolerance in Citrus. *Frontiers in Plant Science*, 8.
- Zandalinas, S. I., Rivero, R. M., Martínez, V., Gómez-Cadenas, A., y Arbona, V. (2016). Tolerance of citrus plants to the combination of high temperatures and drought is associated to the increase in transpiration modulated by a reduction in abscisic acid levels. *BMC Plant Biology*, 16(105). <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0791-7>
- Zegeye, H. (2018). Climate change in Ethiopia: impacts, mitigation and adaptation. *International Journal of Research in Environmental Studies*, 5, 18-35.