

Recursos fitogenéticos nativos de la región de La Mojana: una poderosa estrategia de resiliencia de los pequeños productores para mejorar la productividad ante los efectos de la variabilidad climática*

Alfredo Jarma-Orozco

Universidad de Córdoba (Colombia)

Anthony Ariza-Gonzalez

Universidad de Córdoba (Colombia)

Juan Jaraba-Navas

Universidad de Córdoba (Colombia)

Luis Rodríguez-Páez

Universidad de Córdoba (Colombia)

Enrique Combatt-Caballero

Universidad de Córdoba (Colombia)

Juan Carlos Guzmán-Castro

Universidad de Córdoba (Colombia)

Diana Díaz-Rodríguez

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD (Colombia)

Yanira Jiménez-Campos

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD (Colombia)

Wilber Ramírez-Campo

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD (Colombia)

Nathalie Leal Gomez

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD (Colombia)

Recibido: 30 de mayo de 2023 | Aceptado: 3 de noviembre de 2023

<https://doi.org/10.53010/nys7.02>

Resumen. Las altas temperaturas, precipitaciones inesperadas, sequías e inundaciones prolongadas, junto con otros factores derivados de la variabilidad climática, generan un gran riesgo en la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola, principalmente de los pequeños productores. Sin embargo, la alta capacidad de adaptación que tendrían algunos recursos genéticos nativos frente a condiciones adversas, como las descritas, pueden representar una estrategia interesante que los pequeños productores podrían usar, junto con otras acciones,

* La investigación de la que se deriva el presente artículo se realizó en 2022 en la región de La Mojana, en el municipio de San Marcos, departamento de Sucre, Colombia, en el marco del programa Mojana, Clima y Vida liderado por el Fondo Adaptación, junto con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y financiado por el Fondo Verde del Clima. Mojana, Clima y Vida tiene como objeto mejorar la resiliencia al clima de las comunidades vulnerables en la región de La Mojana durante las temporadas de inundación y de sequía prolongadas, así como el impacto en poblaciones rurales y gobiernos locales.

para mejorar la productividad y garantizar la seguridad alimentaria. Este trabajo se realizó en el 2022 en la región colombiana La Mojana, bajo una estructura experimental completamente al azar con tres repeticiones con las que se evaluó la respuesta fisiológica de especies criollas hortícolas, transitorias y perennes, seleccionadas por comunidades de pequeños productores y población indígena zenú, ante condiciones simuladas y temporales de inundación y sequía. Los resultados principales indicaron que, en términos generales, las respuestas fisiológicas de las especies hortícolas sugieren que estas fueron muy sensibles a la inundación, pero que, bajo condiciones de sequía moderada, es posible esperar una recuperación. Los arroces, considerados como especies transitorias, indicaron —como era de esperarse— que las condiciones de humedad los favorecen, pero, además, que las variedades chombo y LV podrían recuperarse de un estrés moderado por sequía, lo cual no sucedería con el genotipo denominado bogotano. Por último, en las especies perennes, a pesar de mostrar una reducción en sus tasas de intercambio gaseoso cuando fueron sometidas a cualquiera de los dos tipos de estrés, estos valores fueron nuevamente normales cuando entraron en la fase de recuperación. Por esto, se puede concluir que los pequeños productores agrícolas de La Mojana tienen recursos fitogenéticos nativos que presentan una estrategia para recuperarse de condiciones adversas como la inundación y las sequías moderadas, características de importancia para la adaptación a la variabilidad climática de sus sistemas productivos agrícolas.

Palabras clave: adaptación al cambio climático, estrés por inundación, estrés por sequía, La Mojana colombiana, pequeños agricultores, productividad agrícola, sistemas agrícolas

Native phylogenetic Resources of the La Mojana Region: A Powerful Resilience Strategy for Small Producers to Improve Productivity in the Face of Climate Variability Effects

Abstract. High temperatures, unexpected rainfalls, prolonged droughts, and floods—together with other factors derived from climate variability—generate a high risk to the sustainability of agricultural production systems, mainly for small producers. However, the high adaptive capacity of some native genetic resources in the face of adverse conditions, such as those described, could represent a noteworthy strategy that small producers could use, combined with other actions, to improve productivity and guarantee food security. This work was carried out in 2022 in the La Mojana region in Colombia under a completely randomized experimental structure with three replications, which evaluated the physiological response of vegetable, transitory, and perennial species, selected by communities of small producers and the Zenú Indigenous population, to simulated and temporary conditions of flooding and drought. Based on the main results, in general terms, the physiological responses of vegetable species suggest that they were sensitive to flooding; nevertheless, under moderate drought conditions, it is possible to expect a recovery. The rice varieties, considered transient species, indicated—as expected—that humidity conditions favored them but also that the Chombo and LV varieties could recover from moderate drought stress, which would not be the case with the Bogotano genotype. Finally, regarding perennial species, despite showing a reduction in their gas exchange rates when subjected to either of the two types of stress, these values were again normal when they entered the recovery phase. Therefore, it can be concluded that the small farmers of the La Mojana region

have native phylogenetic resources that constitute a strategy to recover from adverse conditions such as flooding and moderate droughts, relevant characteristics for adaptation to climate variability in their agricultural production systems.

Keywords: climate change adaptation, flood stress, drought stress, La Mojana region, Colombia, small farmers, agricultural productivity, agricultural systems

Recursos fitogenéticos nativos da região de La Mojana: uma poderosa estratégia de resiliência dos pequenos agricultores para melhorar a produtividade diante dos efeitos da mudança climática

Resumo. As altas temperaturas, as chuvas inesperadas, as secas e as inundações prolongadas, juntamente com outros fatores derivados da mudança climática, geram um grande risco para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, principalmente para os pequenos agricultores. No entanto, a alta capacidade de adaptação que alguns recursos fitogenéticos nativos teriam diante de condições adversas, como as descritas, poderia representar uma estratégia interessante que os pequenos produtores poderiam utilizar, além de outras ações, para melhorar a produtividade e garantir a segurança alimentar. Este trabalho foi realizado em 2022 na região colombiana de La Mojana, sob uma estrutura experimental completamente aleatória com três réplicas, que avaliou a resposta fisiológica de espécies nativas hortícolas, transitórias e perenes, selecionadas por comunidades de pequenos produtores e pela população indígena Zenú, a condições simuladas e temporárias de inundação e seca. Os principais resultados indicaram que, em termos gerais, as respostas fisiológicas das espécies hortícolas sugerem que elas sejam muito sensíveis à inundação, mas que, em condições de seca moderada, é possível esperar uma recuperação. Os arroz, considerados como espécies transitórias, indicaram — como esperado — que as condições de umidade os favorecem, mas também que as variedades “chombo” e “LV” poderiam se recuperar do estresse de seca moderada, o que não seria o caso do chamado genótipo “bogotano”. Por fim, nas espécies perenes, apesar de apresentarem uma redução nas taxas de trocas gasosas quando submetidas a qualquer um dos dois tipos de estresse, esses valores voltaram ao normal quando entraram na fase de recuperação. Portanto, pode-se concluir que os pequenos agricultores de La Mojana possuem recursos genéticos vegetais nativos que apresentam uma estratégia de recuperação de condições adversas, como inundações e secas moderadas, características importantes para a adaptação à mudança climática em seus sistemas de produção agrícola.

Palavras-chave: adaptação às mudanças climáticas, estresse por inundação, estresse por seca, La Mojana colombiana, pequenos agricultores, produtividade agrícola, sistemas agrícolas

Introducción

El cambio climático es un fenómeno global que amenaza la productividad agrícola y la disponibilidad de los alimentos, siendo uno de los principales desafíos que enfrenta el mundo actualmente. Las variaciones climáticas generadas por acción del ser humano podrían ser la principal causa de la reducción de los rendimientos agrícolas

y el aumento de los riesgos alimentarios. En ese contexto, el sector agrícola es uno de los más expuestos y vulnerables a las variaciones del clima con relación a otros sectores (Hamann *et al.*, 2021; Zhao y Liu, 2023). La agricultura se ve afectada significativamente por eventos climáticos extremos tales como los cambios de temperatura, los modelos de precipitación y una mayor frecuencia de acontecimientos meteorológicos como las inundaciones y la sequía. En la agricultura, estos últimos podrían afectar a 2/3 de la población mundial a partir del 2025, debido a la necesidad del aumento en la producción de alimentos para una población que ascenderá a 9000 millones de personas. Lograr la seguridad alimentaria de esta cantidad de habitantes para el 2050, con alimentos saludables y nutritivos, y mejorar las condiciones de vida de las poblaciones rurales, será uno de los retos en los sistemas de producción del siglo XXI (Kama *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

Evidentemente, los pequeños productores están expuestos al cambio climático, en particular, en regiones donde se presentan con frecuencia eventos de inundación y sequía. Por tanto, los pequeños productores, en conjunto con investigadores del sector agrícola, deben desarrollar alternativas para mejorar, mantener y maximizar la productividad agrícola que sean resilientes al cambio climático, sin privar a las futuras generaciones del acceso de los alimentos y mejor calidad de vida, considerando que la densidad poblacional en el mundo continúa aumentando. Se necesita, por tanto, un sinnúmero de estrategias de adaptación para garantizar la seguridad alimentaria de las poblaciones y luchar contra los efectos adversos de la variabilidad climática (Alam y Ahamed, 2023).

En Colombia, la región de La Mojana es una importante área de despensa agrícola, tiene una extensión de alrededor de 500000 hectáreas dedicadas principalmente al cultivo de arroz, maíz y yuca. En esta zona conviven pequeños productores campesinos y comunidades zenúes, quienes dependen de la agricultura en pequeñas parcelas o patios para su sustento (Buelvas Jiménez y González Pedraza, 2022; UNDP, 2022). Cultivan una amplia variedad de productos, incluyendo hortalizas, cultivos anuales y perennes (Caraballo y De la Ossa, 2011). Sin embargo, los fenómenos de inundación y sequía están presentes de manera cotidiana; los pequeños productores viven las amenazas de estas variaciones climáticas sobre la producción agrícola, debido a que sus sistemas de producción están sujetos a las variaciones del nivel de los ríos (Magdalena, Cauca y San Jorge), que anualmente definen esos ambientes extremos (Buelvas Jiménez y González Pedraza, 2022; Gordon Morante y Marrugo Negrete, 2018). Esto se relaciona con la ruptura del jarillón de Cara de Gato, que ha causado un gran impacto en la vida de las comunidades de La Mojana y ha afectado a más de 166000 personas (equivalentes a 39000 familias) entre el 2021 y el 2023, principalmente en las zonas rurales de difícil acceso. Aunque estas comunidades solían adaptarse a las inundaciones y sequías periódicas, los eventos extremos de agua han interrumpido su proceso de

recuperación y resiliencia, lo que ha impactado, también, sus medios de subsistencia (UNDP, 2022). Estos eventos o escenarios han generado cambios en las comunidades rurales a causa de las particulares y dinámicas condiciones climáticas e hídricas, por lo que se hace necesario enfrentar estos desafíos en la producción de alimentos (Caraballo y De la Ossa, 2011). Los periodos de inundación y sequía son unos de los eventos ambientales más extendidos, dañinos y limitantes para la producción de cultivos en dicha región, que abarca grandes extensiones de municipios pertenecientes a los departamentos de Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia, que han sufrido las amenazas de los fenómenos climáticos (Martínez-Reina, 2013).

El estrés hídrico, ya sea por déficit o exceso, es la limitación más importante para la producción de cultivos, por esto la investigación para identificar mecanismos asociados de respuesta al estrés es esencial para facilitar la evaluación de genotipos nativos o criollos resilientes a la variabilidad climática. Estos pueden determinarse midiendo parámetros fisiológicos como la fotosíntesis neta, la conductancia estomática, la transpiración, entre otros (Dumanović *et al.*, 2021). Ambos estreses limitan el crecimiento y el rendimiento de los cultivos en todo el mundo (Jezek y Blatt, 2017). De acuerdo con el modelo de predicción climática, se espera que estos eventos naturales sean cada vez más frecuentes en el futuro y que causen un impacto drástico en los sistemas productivos que ponga en riesgo la seguridad alimentaria (Cole *et al.*, 2018).

Varios estudios han demostrado que el efecto de la inundación y la sequía podrían acelerar la degradación de la molécula de clorofila, disminuir la actividad fotosintética (captura de CO₂), reducir la conductancia estomática (grado de apertura de los estomas para permitir el flujo de aire) y limitar la transpiración (regulación térmica a través del vapor de agua entre la hoja y la atmósfera), entre otras respuestas, lo que reduciría la capacidad de las plantas para absorber CO₂ y causaría una gran cantidad de acumulaciones de especies reactivas de oxígeno (ERO). Esto puede generar daños en la membrana celular y, en última instancia, como factor más determinante, limitar la productividad agrícola (Adegoye *et al.*, 2023; Akpınar y Cansev, 2022). Sin embargo, de manera natural las plantas pueden adaptarse para responder a estas condiciones de estrés hídrico mediante la eliminación de las ERO, la activación de las enzimas antioxidantes, el cierre de los estomas y el aumento en el volumen de la raíz, como mecanismo para reducir la pérdida o mejorar la absorción de agua, dependiendo del evento que se presente (Wang *et al.*, 2022). Con base en lo anterior, es necesario adelantar experimentos en campo que monitoreen los indicadores fisiológicos más importantes y de mayor rigor científico para evaluar la resistencia o tolerancia a condiciones de estrés hídrico, tales como el seguimiento de la actividad fotosintética, la conductancia estomática y la transpiración de las plantas sometidas a condiciones de estrés hídrico (Jafari *et al.*, 2019).

Una de las estrategias más contundentes de resiliencia al cambio climático bajo el enfoque de una agricultura sostenible y climáticamente inteligente para los pequeños productores es la selección y utilización de especies criollas y/o nativas, ya que estas, por estar adaptadas a dichos ambientes, pueden presentar una alta variabilidad genética, que les permita resistir o tolerar las condiciones de ambientes extremos como la inundación y la sequía. Claramente, esta estrategia tecnológica debe complementarse de manera integral con otras necesarias, tales como la adopción de políticas a nivel nacional, regional y local para abordar los desafíos climáticos en la producción agrícola, la adopción de nuevas tecnologías modernas y sostenibles económica y ambientalmente, la diversificación de cultivos y la transferencia de conocimientos, entre otras (Marić *et al.*, 2023). Según lo expuesto, el objetivo de esta investigación fue evaluar en campo los parámetros fisiológicos de intercambio gaseoso de algunas especies nativas y criollas utilizadas por los pequeños productores de la región de La Mojana en sus sistemas productivos agrícolas, bajo escenarios simulados de estrés hídrico por inundación y sequía, para determinar su capacidad de resiliencia frente estos eventos adversos.

Materiales y métodos

Área de estudio y material vegetal

El experimento se realizó bajo condiciones de campo, durante el 2022, en la finca Los Laureles, ubicada en San Marcos, Sucre, Colombia (8° 42' 34,6"; 25 m s. n. m.). En la región, la precipitación media anual es de 4493 mm, con una humedad relativa del 77% en promedio y una temperatura media anual de 27,4 °C.

Para llevar a cabo el experimento, se emplearon semillas autóctonas proporcionadas por pequeños productores y comunidades zenúes de la región de La Mojana (tabla 1). Las plantas se dispusieron en bolsas de polipropileno con una capacidad de 5 kilos, que contenían sustrato compuesto por una mezcla de suelo con textura franco-arenosa y turba de coco en una proporción de 1:1. Las plantas sometidas a condiciones de inundación se sumergieron hasta el nivel del cuello de la raíz en una piscina cubierta con dimensiones de 10 × 2 m y una profundidad de 40 cm, con un suministro constante de agua para compensar la evaporación. Por otro lado, las plantas sometidas a condiciones de sequía (riego suspendido) se ubicaron en una estructura techada a una altura de 5 m para evitar la entrada de agua de las precipitaciones en la zona de estudio. Después de un periodo de 10 días de estrés hídrico, ya sea por exceso o déficit hídrico, las plantas ingresaron en un periodo de recuperación que duró 10 días. Las plantas del grupo de control se mantuvieron con riego constante durante todo el experimento.

Grupo	Especies	
	Nombre vulgar	Nombre científico
Hortalizas	Ahuyama criolla	<i>Cucurbita moschata</i> Duchesne ex Poir, 1786.
	Berenjena criolla	<i>Solanum melongena</i> L.
	Frijol caupí	<i>Vigna unguiculata</i> L (Walp).
Transitorias	Arroz chombo	<i>Oryza sativa</i> L., 1753
	Arroz bogotano	<i>Oryza sativa</i> L., 1753
	Arroz LV	<i>Oryza sativa</i> L., 1753
Perennes	Café	<i>Coffea arabica</i> L.
	Zapote	<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H. E. Moore y Stearn, 1967
	Roble	<i>Tabebuia rosae</i> (Bertol.)

Tabla 1. Relación de especies hortícolas, transitorias y perennes sometidas a condiciones de estrés por sequía e inundación en la región de La Mojana en el 2021-22. *Fuente:* elaboración propia.

Parámetros de intercambio gaseoso

Para las mediciones se escogieron hojas sanas y completamente expandidas del tercio superior de las plantas sometidas a los dos tratamientos de estrés hídrico y al control. Las mediciones se hicieron cada dos días con un analizador de gases al infrarrojo de sistema portátil (LI-6800, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EE. UU.), tal como lo describe Pompelli *et al.* (2022). Los principales indicadores fueron fotosíntesis neta (A_N , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), conductancia estomática (g_s , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y transpiración (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Las lecturas se realizaron entre las 9:00 y las 11:00 a. m., con una concentración de referencia de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , un flujo de aire de $500 \mu\text{mol s}^{-1}$, temperatura de la cámara foliar de 28°C y radiación fotosintéticamente activa (RFA) de $1200 \mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El tiempo de estabilización de cada lectura fue de 3 minutos. Los datos se presentan como un porcentaje con el grupo de plantas de control en comparación con los tratamientos para inundación y sequía de forma equivalente.

Diseño experimental y tratamientos

Se implementó un diseño completamente al azar que constó de 3 tratamientos y 3 repeticiones, lo que resultó en un total de 9 unidades experimentales (UE). Cada una de estas UE incluyó 10 plantas, lo que generó una población de muestra de 90 plantas para cada especie. Los tratamientos se distribuyeron de la siguiente manera: dos tipos de estrés hídrico (inundación y sequía) y un tratamiento de control que no inducía ningún tipo de estrés hídrico.

Análisis estadístico de los datos

Para los resultados obtenidos en el tiempo, previamente, se hizo una validez del análisis estadístico, en el que se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante el test de Shapiro-Wilk y el test de Bartlett. Se realizó un análisis de varianza de una vía y las diferencias entre los valores promedio de las respuestas de cada tratamiento en las especies estudiadas (consideradas como un factor fijo) se estudiaron utilizando la prueba *post hoc* de Student-Newman-Keuls (SNK) ($p < 0,05$) usando programación SAS versión 9.4 (Statistical Analysis System, Inc., Cary, NC, EE. UU.). Esto permitió identificar y caracterizar las diferencias significativas en los parámetros estudiados entre los dos tipos de estrés y el control, que aportaron a una comprensión más profunda de las respuestas del intercambio gaseoso de las especies al estrés hídrico. La construcción de las gráficas se llevó a cabo utilizando SigmaPlot, versión 14.0 (Systat Software).

Resultados

Grupo de especies hortícolas

Las respuestas de las especies hortícolas, luego de estar sometidas a cualquier condición de estrés, mostraron similitudes entre ellas durante el periodo de recuperación; las respuestas fisiológicas se presentan como porcentaje respecto a la línea base del grupo control (es decir, el testigo, que se cuantificó como el 100%). De manera general, se pudo determinar que las tasas de A_N , g_s y E , disminuyen durante el periodo de estrés por sequía, pero logran recuperarse, en tanto que las sometidas a estrés por inundación murieron (figura 1).

Ahuyama criolla. Las tasas de A_N para ahuyama criolla sometida a sequía se redujeron en un 84,49% ($2,34 \pm 0,12 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a los 10 días de estar en estas condiciones de estrés (DCE), contrastado con el testigo ($15,11 \pm 0,21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); sin embargo, a los 6 días del periodo de recuperación (DPR), esta especie tiende a retomar su actividad fotosintética, llegando a valores cercanos de A_N a los observados en las plantas no estresadas (figura 1A). El grado de disminución de la A_N en las plantas inundadas fue más severo, y ocasionó la muerte a los 6 DCE ($A_N = -0,36 \pm 0,02 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), debido posiblemente al CO_2 producto de la respiración, con balance negativo respecto al tratamiento control ($17,81 \pm 0,07 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), lo que deja en evidencia que no superaron el estrés por inundación (figura 1A). El comportamiento de la g_s fue similar al perfil de A_N durante el periodo de recuperación del estrés por sequía, ya que a los 10 DPR, la ahuyama recuperó valores similares a las plantas no estresadas ($137,67 \pm 5,36$ vs. $179,33 \pm 4,37 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente); por su parte, las plantas

sometidas a estrés por inundación, a los 6 DCE, redujeron la g_s en un 66,52% ($143,17 \pm 0,80 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), respecto al testigo ($427,65 \pm 0,61 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), llegando hasta la muerte, de manera consistente como sucedió con las tasas de A_N (figura 1D). La transpiración (E) siguió el mismo patrón de la A_N y la g_s ; las plantas medidas a los 6 DCE por inundación mostraron una E del 51,21% más bajo que el tratamiento control, aunque en el proceso de recuperación, las plantas que provenían de un estrés por sequía lograron mantener sus tasas de transpiración similares al control. Las provenientes del estrés por inundación murieron (figura 1G).

Berenjena criolla. Esta especie mostró un interesante potencial para recuperarse fisiológicamente después de estar sometida a estrés por sequía, pero esta habilidad no resultó evidente cuando fueron sometidas a estrés por inundación. A los 10 DPR, las tasas de A_N de las plantas que habían atravesado un periodo de estrés por sequía variaron solamente en un 3,2% ($16,55 \pm 0,34 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), de g_s en -5,8% ($712,00 \pm 7,85 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y de E en -2,4% ($7,71 \pm 0,01 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) respecto a las plantas testigo, que registraron valores de A_N de $16,03 \pm 0,38 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, g_s de $776,75 \pm 11,99 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y E de $7,90 \pm 0,07 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (figuras 1B, 1E y 1H). Estos resultados indicarían que esta especie, después de atravesar un escenario de sequía, puede sobrevivir y recuperarse, probablemente debido a una adecuada regulación estomática y capacidad de difusión del CO_2 para tener el mismo patrón de las tasas de A_N , g_s y E de plantas no estresadas. En sentido contrario, plantas sometidas a condiciones de estrés por inundación, no lograron superarlo y, a partir del sexto DCE, finalmente murieron.

Fríjol caupí. Los resultados indicaron que el fríjol caupí tuvo un comportamiento similar a las especies ahuyama criolla y berenjena criolla, es decir, siguieron el mismo patrón en las tasas de A_N , g_s y E , el cual indica que, bajo condiciones de estrés moderado por sequía, esta especie puede recuperarse, pero no cuando ha sufrido un estrés por inundación. A los 8 DPR, las plantas provenientes del estrés por sequía revelaron valores de las tasas de A_N de $18,53 \pm 0,15 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, de la g_s de $482,67 \pm 6,74 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de la E de $7,85 \pm 0,11 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, los cuales son similares a las plantas testigo, variando solamente en -0,8% para A_N , -3,2% para g_s y -2,0 para E (figuras 1C, 1F, 1I). Este comportamiento sugeriría que el fríjol caupí puede tener una eficiencia para recuperar sus actividades fisiológicas, luego de atravesar un periodo moderado de sequía. Por el contrario, las plantas sometidas a estrés por inundación mostraron valores negativos de intercambio gaseoso desde el primer día de la inundación, llegando a la muerte a los 6 DCE; esto indica que este sería el día crítico de tolerancia. Lo anterior puede advertir que esta especie es un recurso fitogenético especial, ya que puede sobrevivir a un periodo moderado de estrés por sequía y recuperarse, pero no puede soportar un estrés generado por inundación de más de 6 días.

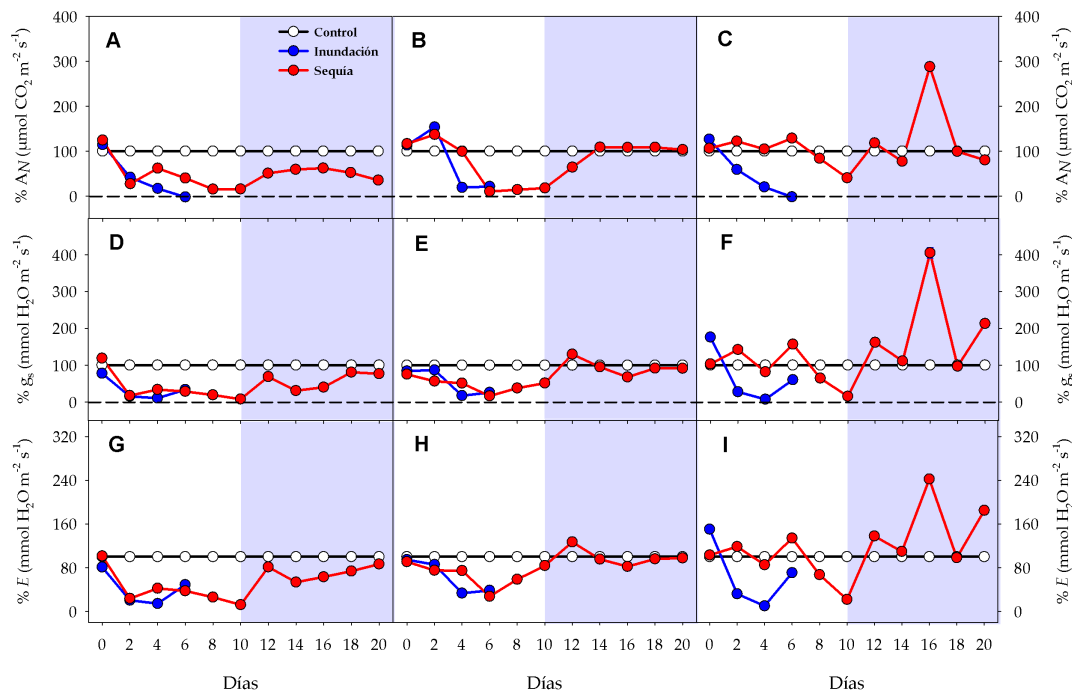


Figura 1. Fotosíntesis neta (A-C), conductancia estomática (D-F) y transpiración (G-I) evaluadas en ahuyama criolla (A, D y G), berenjena criolla (B, E y H) y en frijol caupí (C, F, y I), pertenecientes al grupo de especies hortícolas. Los valores se expresan en percentil del control (línea horizontal al 100%). El periodo que comprende los estreses hídricos y la recuperación de las plantas se destaca con un rectángulo blanco y gris, respectivamente. Las líneas rojas (sequía) y azules (inundación) que se interrumpen antes del final del experimento denotan plantas que no han soportado el estrés. Los promedios ubicados debajo de la línea punteada denotan valores negativos. Cada punto representa la media ($\pm$ error estándar) de las observaciones ($n = 3$). Fuente: elaboración propia.

Grupo de especies transitorias

Arroces. De manera general, las respuestas fisiológicas de las plantas de arroz chombo y arroz LV mostraron similitudes en el comportamiento de los valores de A_N , g_s y E , cuando estuvieron sometidas a estrés por sequía e inundación, pero esto no sucedió con el genotipo arroz bogotano, que no toleró condiciones de estrés por sequía (figura 2). A los 10 DPR, las plantas de arroz chombo y arroz LV provenientes del estrés por sequía registraron, respectivamente, valores de A_N del orden de $19,13 \pm 0,03$ y $17,25 \pm 0,13 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que corresponden en su orden a un 9,1 y -3,1% de las plantas no estresadas; g_s del orden de $533,33 \pm 26,69$ y $875,81 \pm 44,63 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que corresponden a un 17,5 y 214,7% de las plantas no estresadas, y E del orden de $7,32 \pm 0,21$ y $11,76 \pm 0,40 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que corresponden al 5,5 y 112%, en relación con las plantas testigo o no estresadas. Las plantas sometidas a condiciones de inundación, como era de esperarse por su condición de adaptabilidad, no mostraron reducción en los parámetros de intercambio gaseoso durante el periodo de inundación, por el contrario,

en términos generales tendieron a aumentar y, al final, registraron consecutivamente para arroz chombo y arroz LV valores de A_N del 9,1 y -3,1%, de g_s de 17,5 y 214% y de E del 5,5 y 112% para las plantas testigo (figuras 2A, 2D y 2G). El comportamiento de las plantas de estas dos variedades indicaría su excelente adaptación a condiciones de inundación y su alta sensibilidad cuando se exponen a condiciones moderadas de estrés por sequía. Por otra parte, a diferencia de los dos genotipos anteriores, los valores de A_N , g_s y E , observados para el arroz bogotano, indican que a esta especie no la impacta la inundación, pero sí la sequía. Durante el periodo de recuperación de las plantas inducidas a estrés por inundación de este genotipo, los valores de A_N fueron de $16,97 \pm 0,80 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, de la g_s de $551,67 \pm 36,92 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de la E de $7,73 \pm 0,37 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, lo que representa porcentajes de acuerdo con el testigo en un -36, -59,4 y -24% respectivamente. Las plantas que estuvieron bajo condiciones de estrés por déficit hídrico no lograron sobrevivir, lo que quedó en evidencia con valores de cero en los tres parámetros de intercambio gaseoso después de los 2 DPR, lo que indica que la condición de sequía fue severa para esta especie y no logró recuperarse después de este tiempo del estrés ocasionado por deficiencia de agua (figuras 2B, 2E y 2H).

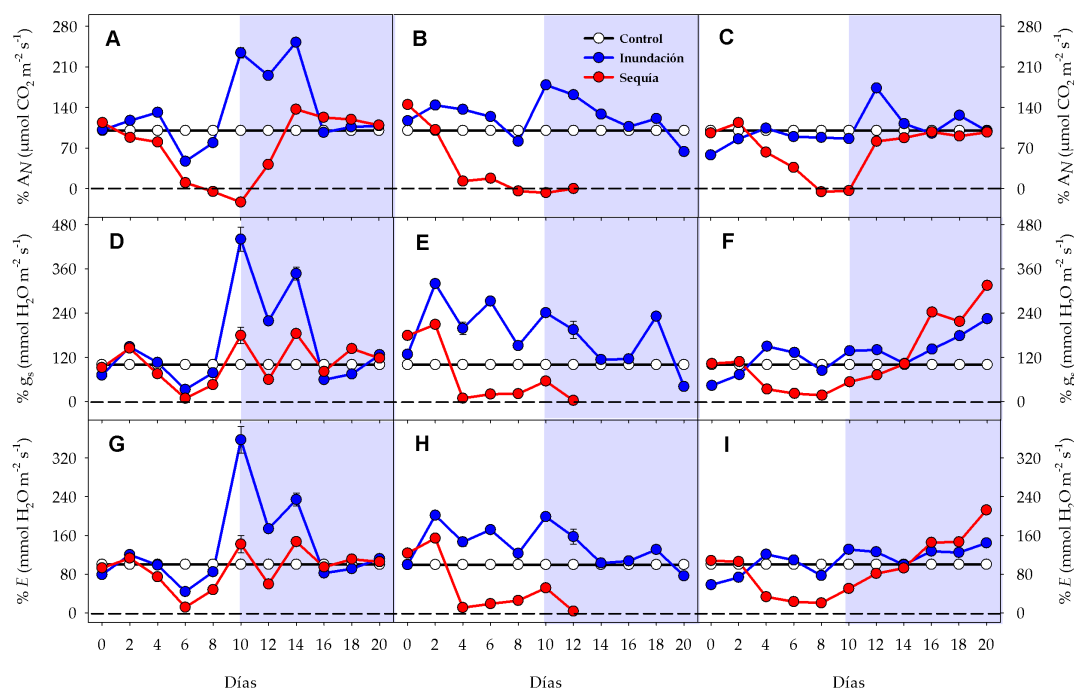


Figura 2. Fotosíntesis neta (A-C), conductancia estomática (D-F) y transpiración (G-I) evaluadas en arroz chombo (A, D y G), arroz bogotano (B, E y H) y en arroz LV (C, F, y I), pertenecientes al grupo de especies transitorias. Los valores se expresan en percentil del control (línea horizontal al 100%). El periodo que comprende los estreses hídricos y la recuperación de las plantas se destaca con un rectángulo blanco y gris, respectivamente. Las líneas rojas (sequía) y azules (inundación) que se interrumpen antes del final del experimento denotan plantas que no han soportado el estrés. Los promedios ubicados debajo de la línea punteada denotan valores negativos. Cada punto representa la media ($\pm$ error estándar) de las observaciones ($n = 3$). Fuente: elaboración propia.

Grupo de especies perennes

La respuesta de los genotipos perennes sometidos a estrés por inundación y sequía mostraron comportamientos diferenciales entre los patrones de respuesta del café y el roble versus los de zapote (figura 3).

Café. Los resultados de la A_N , g_s y E del café indicaron que esta especie puede recuperarse después de atravesar condiciones moderadas de sequía, mas no de inundación. A los 10 DPR, las plantas que provenían del estrés por sequía registraron valores de A_N de $9,08 \pm 0,09 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, de la g_s de $196,00 \pm 4,36 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de la E de $4,18 \pm 0,08 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, los cuales son similares respecto al testigo, lo que denota eficiencia en la mejoría de sus condiciones fisiológicas; esto puede indicar que es un mecanismo de tolerancia por la estabilidad gradual de la actividad fotosintética y la regulación estomática. Por su parte, las plantas que estuvieron inundadas, aunque no murieron, a partir de los 4 DCE, presentaron valores bajos de las tasas de A_N , g_s y E , llegando a extremos críticos a los 10 DCE; aunque la A_N no regresó a valores normales luego del proceso de recuperación de las plantas, los valores de g_s fueron de $141,67 \pm 13,92 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y la E de $3,40 \pm 0,27 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valores que son ligeramente inferiores al testigo (figuras 3A, 3D y 3G). Estos resultados indicarían que las plantas de café sometidas a inundación pudieron sobrevivir al estrés, pero presentarían serios daños en el aparato fotosintético. -

Zapote. Las plantas de zapote demuestran la capacidad que tienen de recuperarse cuando están sometidas a condiciones de sequía, pero no cuando provienen de un estrés por inundación. Lo anterior puede comprobarse con los resultados de las tasas de A_N , g_s y E ; las plantas, a los 10 DPR del estrés por sequía, presentaron, en relación con las plantas no estresadas, valores similares de A_N ($7,55 \pm 0,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), g_s ($286,50 \pm 4,36 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y E ($4,95 \pm 0,06 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), esto representa respectivamente un 8,6, 2,5 y -1,8% sobre las plantas no estresadas. Lo anterior demostraría una eficiencia fisiología de las plantas para sobreponerse al estrés por sequía. Las plantas sometidas a condiciones de inundación no pudieron sobrevivir, posiblemente porque las concentraciones de CO_2 intercelular no lograron satisfacer las necesidades de la fotosíntesis debido a las limitaciones de la g_s , por lo que no se muestran valores de intercambio gaseoso a partir de los 4 DPR (figuras 3B, 3E y 3H).

Roble. Las plantas de roble, probablemente por su rusticidad, mostraron la capacidad que tienen de recuperar su actividad fisiológica cuando han atravesado periodos moderados de sequía e inundación. Por una parte, las plantas en la fase de recuperación que provenían de un estrés por sequía mostraron valores de la A_N de $11,48 \pm 0,20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, de la g_s de $418,17 \pm 4,44 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de la E de $6,55 \pm 0,07 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, lo que representa un porcentaje respectivo de -22,4, 16,2 y 14,7% frente a las plantas no estresadas del tratamiento de control. Durante el periodo de recuperación,

en las plantas sometidas a estrés por inundación, se notó un comportamiento similar a aquellas que estuvieron en condiciones de sequía. Los valores de la A_N ($11,30 \pm 0,20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), g_s ($401,17 \pm 7,94 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y E ($6,39 \pm 0,14 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), no difieren significativamente de los valores observados en estos parámetros en las plantas no estresadas (figuras 3C, 3F y 3I). En ambos estreses, las plantas manifestaron una eficiencia en sus procesos fisiológicos para recuperarse y sobrevivir. Esto podría explicarse debido a que la fisiología de las plantas sometidas a condiciones de sequía e inundación no fueron severamente afectadas, de tal manera que las A_N , g_s y E no se reducen al final del periodo de recuperación, eventualmente, por una eficiencia genética en mantener los niveles de conductancia estomática. Lo anterior indica que el roble es un recurso fitogenético importante que puede soportar y recuperarse de condiciones moderadas de estrés por exceso o déficit hídrico.

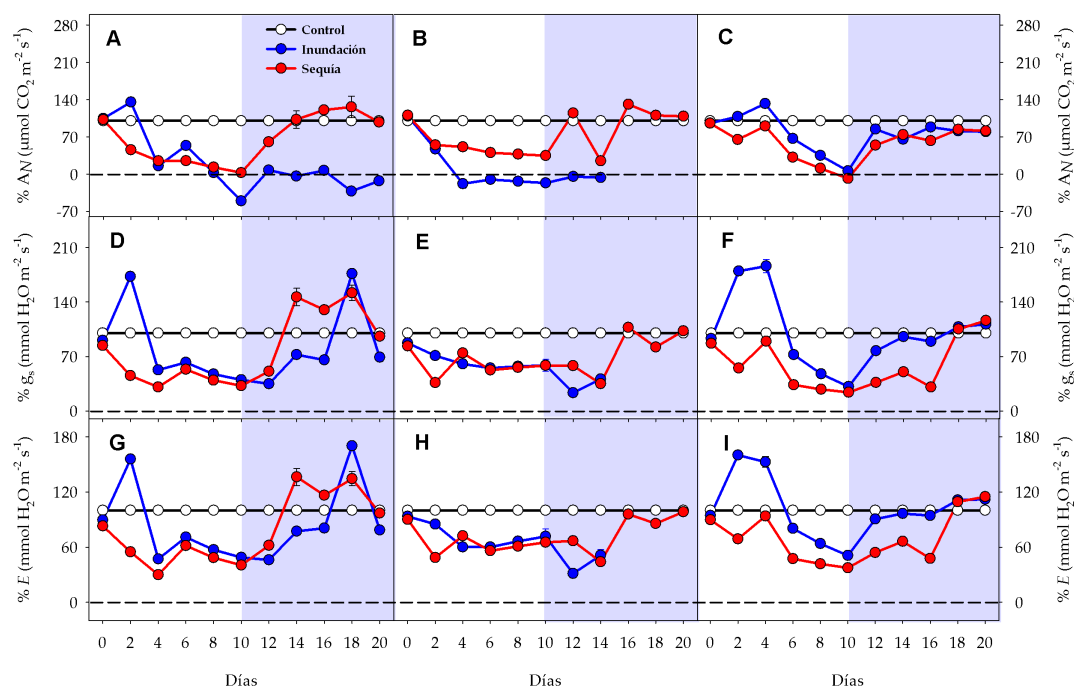


Figura 3. Fotosíntesis neta (A-C), conductancia estomática (D-F) y transpiración (G-I) evaluadas en café (A, D y G), zapote (B, E y H) y en roble (C, F, y I), pertenecientes al grupo de especies perennes. Los valores se expresan en percentil del control (línea horizontal al 100%). El periodo que comprende los estreses hídricos y la recuperación de las plantas se destaca con un rectángulo blanco y gris, respectivamente. Las líneas rojas (sequía) y azules (inundación) que se interrumpen antes del final del experimento denotan plantas que no han soportado el estrés. Los promedios ubicados debajo de la línea punteada denotan valores negativos. Cada punto representa la media ($\pm$ error estándar) de las observaciones ($n = 3$).

Fuente: elaboración propia.

Discusión

En este estudio se investigó la respuesta de la actividad fotosintética y de intercambio gaseoso de algunos recursos fitogenéticos nativos caracterizados por los pequeños productores y pueblos zenúes de la región de La Mojana de Colombia, ante eventuales condiciones de estrés por sequía e inundación. Los resultados dejaron en evidencia el efecto negativo que pueden tener sobre la fotosíntesis neta, la conductancia estomática y la transpiración. Durante la inundación y la sequía, el cierre estomático limita la difusión de dióxido de carbono (CO_2) a los cloroplastos y altera la asimilación neta del CO_2 , del mismo modo, se inhibe el proceso de fotosíntesis por fotoinhibición y pigmentos de clorofila reducidos (Masondo *et al.*, 2019; Pompelli *et al.*, 2022). Además, la fotosíntesis también se ve afectada en las plantas por la reducción en la absorción y asimilación de nitrógeno, y otros elementos minerales necesarios en dicho proceso, lo cual sucede cuando las raíces no funcionan normalmente bajo una condición de estrés por inundación o sequía.

Como se notó en las plantas estresadas por exceso o déficit hídrico, de cualquiera de los tres grupos (a excepción del arroz bajo condiciones de inundación), una de las respuestas más rápidas de las plantas bajo estas condiciones es la reducción casi que inmediata y progresiva de la A_N , lo cual, por lo general, es atribuido principalmente a una limitación estomática, siendo mayor el efecto cuando el estrés es muy severo (figuras 1-3). Existen otros procesos que afectan la eficiencia de la actividad fotosintética de las plantas estresadas por la baja actividad de la enzima Rubisco en la fijación del CO_2 para la síntesis de carbohidratos y la regeneración de la RUBP, así como la inestabilidad del fotosistema II y la inactivación de procesos que involucran la máxima carboxilación (Szymańska *et al.*, 2017; Dumanović *et al.*, 2021). Estas respuestas pudieron presentarse en las plantas del grupo de hortalizas, transitorias o perennes cuando estuvieron expuestas directamente al estrés hídrico; es probable que también se produjera la inactivación de Rubisco, como consecuencia de una reducción en el contenido de clorofila y de la eficiencia del PSII (indicadores no medidos y/o evaluados). Como se mencionó, es posible que estos condujeran a una disminución rápida en la fotosíntesis (deficiencia en la producción de poder energético ATP y poder reductor NADPH), debido a las restricciones en la tasa de difusión de CO_2 en las células subestomáticas de las hojas (Raineri *et al.*, 2021).

El estrés por sequía ocurre en las plantas cuando hay poca disponibilidad de agua durante un periodo prolongado, lo que afecta negativamente e interrumpe el intercambio de gases y la asimilación de carbono y, también, junto con el aumento del estrés oxidativo, puede conducir a la muerte de la planta como se presentó en el arroz bogotano (figura 2B-H), sin embargo, el resto de las especies evaluadas en la presente investigación indicó que pueden soportar esa condición de déficit de agua durante un

periodo de 10 días. Caso contrario sucede con el estrés que generó el exceso de humedad en otras especies. Así, en plantas de ahuyama criolla, berenjena criolla, frijol caupí (figuras 1A, 1B y 1C respectivamente) y zapote (figura 3B), la condición de inundación generó anegamiento de raíces, lo cual reduce la disponibilidad de oxígeno y restringe el intercambio de gases en los tejidos sumergidos, provocando una acumulación de productos finales tóxicos (Wang *et al.*, 2015). Además, la inundación genera una limitación en el intercambio de gases de los suelos, lo que resulta en una reducción de hasta 10000 veces en la difusión de gases y, en consecuencia, el oxígeno en el suelo disminuye rápidamente y produce condiciones de hipoxia (deficiencia en oxígeno) o anoxia (sin oxígeno) en unas pocas horas, lo que dañaría el sistema de raíces de las plantas (Qi *et al.*, 2019), ocasionaría la imposibilidad de llevar agua y nutrientes al dosel y, finalmente, acarrearía la muerte la planta. Además, la falta de aireación del suelo durante la inundación provoca un cambio en el metabolismo energético aeróbico de las raíces, lo que resulta en la acumulación de metabolitos dañinos, como el etanol, el ácido láctico, los aldehídos y los radicales de oxígeno (principalmente H_2O_2), todos ellos promueven la senescencia temprana y la muerte celular (Zhang *et al.*, 2019), como se notó en las especies mencionadas.

Estudios similares al presente, pero en otras especies, han demostrado que el aumento en la duración de la inundación y la sequía afecta negativamente la conductancia estomática y la tasa fotosintética en la soya (Adegoye *et al.*, 2023), el algodón (Huang *et al.*, 2023; Somaddar *et al.*, 2023), kiwi (Wurms *et al.*, 2023), el maíz (Ru *et al.*, 2023), el frijol caupí (Pompelli *et al.*, 2022) y el arroz (López-Hernández *et al.*, 2018), entre otros. Los trabajos coinciden en que las plantas son vulnerables a la sequía e inundación, porque reducen considerablemente las tasas de difusión de O_2 y CO_2 en las raíces y tallos, e inhiben significativamente tanto la fotosíntesis como la respiración (Kim *et al.*, 2015). Sin embargo, hay muchas investigaciones que han destacado las respuestas adaptativas (morfológicas, bioquímicas, fisiológicas y anatómicas) en las plantas contra estos tipos de estrés (Kuroha *et al.*, 2018), lo cual podría ser un siguiente paso en este proceso de investigación. Las alteraciones morfológicas y anatómicas primarias incluyen el desarrollo de raíces adventicias (RA) u otros tejidos de aireación, barreras de pérdida radial de oxígeno, entre otras. A nivel celular, otra estrategia de defensa de las plantas es la activación de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos para aliviar los efectos perjudiciales causados por los radicales de oxígeno, como especies reactivas de oxígeno (ERO) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2), durante los periodos de estrés hídrico (Tyagi *et al.*, 2022). Es probable que los genotipos evaluados que presentaron resistencia a los estreses pudieron adaptarse a través de algún mecanismo de los mencionados, ya sea bioquímico, fisiológico o, en su defecto, morfológico.

Conclusiones

Las respuestas fisiológicas de las especies hortícolas como ahuyama, berenjena y frijol caupí indican que son más sensibles a las condiciones de inundación que a las de sequía. Dado que estas especies se cultivan comúnmente en los patios de las casas de los pequeños productores, esta información resulta valiosa para promover un uso más eficiente del agua en sus cultivos. Por otro lado, los arroces, que están adaptados a condiciones de inundación, no mostraron una disminución significativa en las variables de intercambio gaseoso bajo estas circunstancias. Además, dos de los genotipos de arroz mostraron una capacidad de recuperación ante condiciones de sequía moderada, lo que sugiere una variabilidad significativa en las respuestas de los genotipos de esta especie. En cuanto al grupo de especies perennes, sus respuestas de intercambio gaseoso indican que tienen estrategias más efectivas para recuperarse después de periodos de exceso o déficit hídrico, con la excepción del zapote, que no mostró esta capacidad cuando se sometió a condiciones de inundación. Los hallazgos de esta investigación sugieren que entre la diversidad de cultivos estudiados que los pequeños productores de La Mojana pueden cultivar (hortícolas, transitorias o perennes), algunos podrían desarrollar estrategias resilientes a condiciones climáticas adversas, como inundaciones y sequías moderadas. Esto podría ayudar en la adaptación de los sistemas de producción agrícola de los pequeños productores de La Mojana a los desafíos de la variabilidad climática.

Referencias

- Adegoye, G. A., Olorunwa, O. J., Alsajri, F. A., Walne, C. H., Wijewardana, C., Kethireddy, S. R., Reddy, K. N. y Reddy, K. R. (2023). Waterlogging Effects on Soybean Physiology and Hyperspectral Reflectance during the Reproductive Stage. *Agriculture*, 13(4), 844. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040844>
- Akpinar, A. y Cansev, A. (2022). Physiological and Molecular Responses of Roots Differ from Those of Leaves in Spinach Plants Subjected to Short-Term Drought Stress. *South African Journal of Botany*, 151(A), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.032>
- Alam, K. F. y Ahamed, T. (2023). Climate-Adaptive Potential Crops Selection in Vulnerable Agricultural Lands Adjacent to the Jamuna River Basin of Bangladesh Using Remote Sensing and a Fuzzy Expert System. *Remote Sensing*, 15(8), 2201. <https://doi.org/10.3390/rs15082201>
- Buelvas Jiménez, M. R. y González Pedraza, A. F. (2022). Chemical Characterization of Soils Cultivated with Rice in the Municipality of Majagual, Subregion of La Mojana, Sucre, Colombia. *INGE CUC*, 18(2), 128-142. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/3979>
- Caraballo, P. y De la Ossa, J. (2011). Inundaciones en la mojana: ¿viacrucis social o condición ambiental? *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 3(1), 198-210. <https://doi.org/10.24188/recia.v3.n1.2011.362>

- Cole, M. B., Augustin, M. A., Robertson, M. J. y Manners, J. M. (2018). The Science of Food Security. *npj Science of Food*, 2(1), 14. <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0021-9>
- Dumanović, J., Nepovimova, E., Natić, M., Kuća, K. y Jaćević, V. (2021). The Significance of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense System in Plants: A Concise Overview. *Frontiers in Plant Science*, 11, 552969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
- Gordon Morante, C. y Marrugo Negrete, J. L. (2018). Prácticas agrícolas y riesgos a la salud por el uso de plaguicidas en agricultores subregión Mojana - Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 29-40. <https://doi.org/10.22490/21456453.2098>
- Hamann, E., Denney, D., Day, S., Lombardi, E., Jameel, M. I., MacTavish, R. y Anderson, J. T. (2021). Review: Plant Eco-Evolutionary Responses to Climate Change: Emerging Directions. *Plant Science*, 304, 110737. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110737>
- Huang, L., Li, J., Yang, P., Zeng, X., Chen, Y. y Wang, H. (2023). Potassium Application Alleviated Negative Effects of Soil Waterlogging Stress on Photosynthesis and Dry Biomass in Cotton. *Agronomy*, 13(4), 1157. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041157>
- Jafari, S., Garmdareh, S. E. H. y Azadegan, B. (2019). Effects of Drought Stress on Morphological, Physiological, and Biochemical Characteristics of Stock Plant (*Matthiola incana* L.). *Scientia Horticulturae*, 253, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.033>
- Jezek, M. y Blatt, M. R. (2017). The Membrane Transport System of the Guard Cell and its Integration for Stomatal Dynamics. *Plant Physiology*, 174(2), 487-519. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01949>
- Kama, R., Song, J., Liu, Y., Hamani, A. K. M., Zhao, S. y Li, Z. (2023). Water Availability and Status of Wastewater Treatment and Agriculture Reuse in China: A Review. *Agronomy*, 13(5), 1187. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051187>
- Kim, Y.-H., Hwang, S.-J., Waqas, M., Khan, A. L., Lee, J.-H., Lee, J. D., Nguyen, H. T. y Lee, I.-J. (2015). Comparative Analysis of Endogenous Hormones Level in Two Soybean (*Glycine max* L.) Lines Differing in Waterlogging Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 6, 714. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00714>
- Kuroha, T., Nagai, K., Gamuyao, R., Wang, D. R., Furuta, T., Nakamori, M., Kitaoka, T., Adachi, K., Minami, A., Mori, Y., Mashiguchi, K., Seto, Y., Yamaguchi, S., Kojima, M., Sakakibara, H., Wu, J., Ebana, K., Mitsuda, N., Ohme-Takagi, M., ... y Ashikari, M. (2018). Ethylene-Gibberellin Signaling Underlies Adaptation of Rice to Periodic Flooding. *Science*, 361(6398), 181-186. <https://doi.org/10.1126/science.aat1577>
- López-Hernández, M. B., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J., Miranda-Colín, S., Barrios-Gómez, E. J. y Martínez-Rueda, C. G. (2018). Tolerancia a sequía y calor en arroz (*Oryza sativa*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(15), 373-385. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1558>
- Marić, A. Č., Čop, T., Oplanić, M., Ban, S. G. y Njavro, M. (2023). Adaptation to Climate Change in Adriatic Croatia—The View of Policymakers. *Sustainability*, 15(9), 7085. <https://doi.org/10.3390/su15097085>
- Martínez-Reina, A. M. (2013). Caracterización socioeconómica de los sistemas de producción de la región de La Mojana en el Caribe de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(2), 165-185. https://doi.org/10.21930/rcta.vol14_num2_art.406

- Masondo, N. A., Aremu, A. O., Kulkarni, M. G., Petřík, I., Plačková, L., Šubrtová, M., Novák, O., Grúz, J., Doležal, K., Strnad, M., Finnie, J. F. y Van Staden, J. (2019). How Do Different Watering Regimes Affect the Growth, Chlorophyll Fluorescence, Phytohormone, and Phenolic Acid Content of Greenhouse-Grown *Ceratotheca triloba*? *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 385-399. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9848-1>
- Pompelli, M. F., Arrieta, D. V., Rodríguez, Y. Y. P., Ramírez, A. M. J., Bettin, A. M. V., Avilez, M. A. Q., Cárcamo, J. A. A., García-Castaño, S. G., González, L. M. M., Cordero, E. D. F., Perneth Montañón, M. J., Pacheco Mendoza, C. C., Ariza González, A. R., Tello Coley, A. J., Jarma-Orozco, A. y Rodríguez Páez, L. A. (2022). Can Chlorophyll a Fluorescence and Photobleaching Be a Stress Signal under Abiotic Stress in *Vigna unguiculata* L.? *Sustainability*, 14(23), 15503. <https://doi.org/10.3390/su142315503>
- Qi, X., Li, Q., Ma, X., Qian, C., Wang, H., Ren, N., Shen, C., Hunag, S., Xu, X., Xu, Q. y Chen, X. (2019). Waterlogging-Induced Adventitious Root Formation in Cucumber is Regulated by Ethylene and Auxin through Reactive Oxygen Species Signaling. *Plant, Cell & Environment*, 42(5), 1458-1470. <https://doi.org/10.1111/pce.13504>
- Raineri, J., Caraballo, L., Rigalli, N., Portapila, M., Otegui, M. E. y Chan, R. L. (2021). *HaHB11* Transformed Maize Has Improved Yield under Waterlogging and Defoliation in Control and Field Conditions. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2021.10.19.465041>
- Ru, C., Hu, X., Chen, D. y Wang, W. (2023). Droughts and Thermo-Priming Enhance Acclimation to Later Drought and Heat Stress in Maize Seedlings by Improving Leaf Physiological Activity. *Agronomy*, 13(4), 1124. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041124>
- Somaddar, U., Mia, S., Khalil, I., Sarker, U. K., Uddin, R., Kaysar, S., Chaki, A. K., Khan Robin, A. H., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Van Ha, C., Gupta, A., Park, J.-I., Phan Tran, L. S. y Saha, G. (2023). Effect of Reproductive Stage-Waterlogging on the Growth and Yield of Upland Cotton (*Gossypium hirsutum*). *Plants*, 12(7), 1548. <https://doi.org/10.3390/plants12071548>
- Szymańska, R., Ślesak, I., Orzechowska, A. y Kruk, J. (2017). Physiological and Biochemical Responses to High Light and Temperature Stress in Plants. *Environmental and Experimental Botany*, 139, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.05.002>
- Tyagi, A., Sharma, S., Ali, S. y Gaikwad, K. (2022). Crosstalk Between H₂S and NO: An Emerging Signalling Pathway During Waterlogging Stress in Legume Crops. *Plant Biology*, 24(4), 576-586. <https://doi.org/10.1111/plb.13319>
- UNDP (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2022). *Los suelos de La Mojana, la base de una economía campesina adaptada al cambio climático*. <https://www.undp.org/es/colombia/news/suelos-mojana-economia-campesina-cambio-climatico>
- Wang, G., Fan, W. y Peng, F. (2015). Physiological responses of the young peach tree to waterlogging and spraying SA at different timing. *Journal of Fruit Science*, 32(5), 872-878.
- Wang, W., Zheng, W., Lv, H., Liang, B., Jin, S., Li, J. y Zhou, W. (2022). Animal-Derived Plant Biostimulant Alleviates Drought Stress by Regulating Photosynthesis, Osmotic Adjustment, and Antioxidant Systems in Tomato Plants. *Scientia Horticulturae*, 305, 111365. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111365>
- Wurms, K. V., Reglinski, T., Buissink, P., Ah Chee, A., Fehlmann, C., McDonald, S., Janine, C., Jensen, D., Hedderley, D., McKenzie y Rikkerink, E. H. A. (2023). Effects of Drought and

Flooding on Phytohormones and Absciseic Acid Gene Expression in Kiwifruit. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), 7580. <https://doi.org/10.3390/ijms24087580>

Zhang, J., Abdelraheem, A. y Wedegaertner, T. (2019). Genetic Variation of Waterlogging Tolerance in Pima (*Gossypium Barbadosense*) Cotton and Glanded and Glandless Upland Cotton (*Gossypium Hirsutum*) Under Field Conditions. *Industrial Crops and Products*, 129, 169-174. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.008>

Zhang, Z., Li, Y., Chen, X., Wang, Y., Niu, B., Li Liu, D., He, J., Pulatov, B., Hassan, I. y Meng, Q. (2023). Impact Of Climate Change and Planting Date Shifts on Growth and Yields of Double Cropping Rice in Southeastern China in Future. *Agricultural Systems*, 205, 103581. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103581>

Zhao, Y. y Liu, S. (2023). Effects of Climate Change on Economic Growth: A Perspective of the Heterogeneous Climate Regions in Africa. *Sustainability*, 15(9), 7136. <https://doi.org/10.3390/su15097136>

:: :: ::

Alfredo Jarma-Orozco

Investigador principal. Ph.D. en Fisiología de Cultivos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Profesor investigador en la Universidad de Córdoba (Colombia). Entre sus últimas publicaciones se encuentran: “Physiological and Enzymatic Evaluation of Selected Genotypes of Stevia rebaudiana Bertoni”, artículo publicado en 2023 en *Agronomy* (13[2], 403, <https://doi.org/10.3390/agronomy13020403>); e “Imbibition and Germination of Seeds with Economic and Ecological Interest: Physical and Biochemical Factors Involved”, publicado en 2023 en *Sustainability* (15[6], 5394, <https://doi.org/10.3390/su15065394>). Contribución específica al presente artículo: redacción e interpretación de resultados. ajarma@correo.unicordoba.edu.co

↑

Anthony Ariza-Gonzalez

Coinvestigador. Ingeniero agrónomo, estudiante candidato a M.Sc. en Fisiología de Cultivos, Universidad de Córdoba (Colombia). Contribución específica al presente artículo: redacción e interpretación de resultados. aarizagonzalez28@correo.unicordoba.edu.co

↑

Juan Jaraba-Navas

Coinvestigador. Ph.D. en Fitopatología de la Universidad de Arkansas (EE. UU.). Profesor investigador en la Universidad de Córdoba (Colombia). Entre sus últimas publicaciones se encuentran: “Physiological and Enzymatic Evaluation of Selected Genotypes of Stevia rebaudiana Bertoni”, artículo publicado en 2023 en *Agronomy* (13[2], 403, <https://doi.org/10.3390/agronomy13020403>); y “Stevia rebaudiana under a CO₂ Enrichment Atmosphere: Can CO₂ Enrichment Overcome Stomatic, Mesophilic and Biochemical

Barriers That Limit Photosynthesis?”, publicado en 2022 en *Sustainability* (14[21], 14269, <https://doi.org/10.3390/su142114269>). Contribución específica al presente artículo: redacción e interpretación de resultados. jjaraba@correo.unicordoba.edu.co

↑

Luis Rodríguez-Páez

Coinvestigador. M.Sc. en Biotecnología de la Universidad Instituto Tecnológico El Llano (México). Profesor investigador en la Universidad de Córdoba (Colombia). Entre sus últimas publicaciones se encuentran: “Physiological and Enzymatic Evaluation of Selected Genotypes of *Stevia rebaudiana* Bertoni”, artículo publicado en 2023 en *Agronomy* (13[2], 403, <https://doi.org/10.3390/agronomy13020403>; e “Imbibition and Germination of Seeds with Economic and Ecological Interest: Physical and Biochemical Factors Involved”, publicado en 2023 en *Sustainability* (15[6], 5394, <https://doi.org/10.3390/su15065394>). Contribución específica al presente artículo: redacción e interpretación de resultados. larguez@correo.unicordoba.edu.co

↑

Enrique Combatt-Caballero

Coinvestigador. Ph.D. en Suelos de la Universidad Federal de Viçosa (Brasil). Profesor investigador en la Universidad de Córdoba (Colombia). Entre sus últimas publicaciones se encuentran: “Physiological and Enzymatic Evaluation of Selected Genotypes of *Stevia rebaudiana* Bertoni”, artículo publicado en 2023 en *Agronomy* (13[2], 403, <https://doi.org/10.3390/agronomy13020403>); y “Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals from Gold Mining Activities Using *Clidemia sericea* D. Don.”, publicado en 2022 en *Plants* (11[5], <https://doi.org/10.3390/plants11050597>). Contribución específica al presente artículo: redacción e interpretación de resultados. ecombatt@correo.unicordoba.edu.co

↑

Juan Carlos Guzmán-Castro

Coinvestigador. Especialista en Administración Total de la Calidad, Universidad de Córdoba (Colombia). Contribución específica al presente artículo: supervisión y redacción de resultados. juanguzman@correo.unicordoba.edu.co

↑

Diana Díaz-Rodríguez

Coinvestigadora. M.Sc. en Derechos humanos y Derecho Internacional Humanitario del Instituto Europeo Campus Stellae (España). Jefa del Proyecto “Mojana, Clima y Vida” del PNUD. Contribución específica al presente artículo: supervisión y revisión. diana.diaz@undp.org

↑

Yanira Jiménez-Campos

Coinvestigadora. M.Sc. en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales (Colombia). Asociada técnica en agroecosistemas del PNUD. Contribución específica al presente artículo: supervisión y revisión. yanira.jimenez@undp.org

↑

Wilber Ramírez-Campo

Coinvestigador. M.Sc. en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales (Colombia). Analista agroecológico del PNUD. Contribución específica al presente artículo: supervisión y revisión. wilber.ramirez@undp.org

↑

Nathalie Leal Gomez

Coinvestigadora. Grado en Ingeniería Agrícola de la Universidad Surcolombiana (Colombiana). Asociada técnica en agroecosistemas del PNUD. Contribución específica al presente artículo: supervisión y revisión. nathalie.leal1@undp.org

↑