
Consumo de agua y captura de carbono del aguacate variedad Hass en los Andes colombianos

Water consumption and carbon sequestration of Hass avocado variety in the Colombian Andes

Andrés Felipe Caro Holguín, Alejandra Muñoz Rivera, José Ignacio Agudelo Otálvaro, María Elena Gutiérrez Lagoueyte, Andrés Hernán Silva Duque, Édinson Muñoz Ciro y Sebastián González Caro

Resumen

Esta investigación, financiada por el ScotiaBank Net Zero Research Fund, evaluó el almacenamiento de carbono y el consumo de agua en cultivos de aguacate Hass en los Andes colombianos, mediante un enfoque integral que combinó mediciones de campo, modelación espacial y desarrollo tecnológico. Se realizaron muestreos en cuatro fincas productoras, donde se cuantificó la biomasa aérea y la densidad de la madera de *Persea americana*, encontrando una alta variabilidad influenciada por factores como la altitud, la precipitación y las prácticas de manejo. Estos resultados confirman que la densidad de la madera varía entre sitios y que su medición local es clave para mejorar la precisión en las estimaciones de carbono acumulado.

Paralelamente, se midió la conductancia estomática en hojas de aguacate Hass, encontrando que su comportamiento hídrico es comparable al de especies nativas de bosques montañosos. Sin embargo, a nivel de cultivo, el consumo de agua depende de la densidad de siembra y del manejo agronómico, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias sostenibles para garantizar la viabilidad del cultivo sin comprometer la disponibilidad hídrica.

Como herramienta de apoyo a la planificación, se desarrolló CuencApp, un aplicativo web que simula el balance hídrico y el almacenamiento de carbono bajo diferentes escenarios de cambio de uso del suelo en cuencas andinas. Utilizando la función de Budyko y datos espaciales de alta resolución, el modelo permite estimar el caudal superficial y evaluar la sensibilidad hídrica ante la expansión del aguacate. En la cuenca piloto de Jericó (Antioquia), los resultados mostraron que el cambio de cobertura vegetal puede afectar la disponibilidad de agua bajo condiciones específicas de déficit hídrico en la cuenca. El estudio propone así un enfoque integral para promover una planificación territorial más sostenible en regiones ecológicamente sensibles.

Palabras clave: Persea americana variedad Hass, transpiración, conductancia estomática (gs), densidad de la madera, impactos y beneficios ambientales.

Abstract

This research, funded by the ScotiaBank Net Zero Research Fund, evaluated carbon storage and water use in Hass avocado (*Persea americana*) crops in the Colombian Andes through an integrated approach that combined field measurements, spatial modeling, and technological development. Sampling was conducted across four commercial farms, where aboveground biomass and wood density were quantified, revealing high variability influenced by elevation, precipitation, and management practices. Results confirmed that wood density varies significantly across sites, highlighting the importance of local measurements to improve the accuracy of carbon stock estimates.

In parallel, stomatal conductance was measured on avocado leaves, showing a physiological water-use behavior comparable to that of native montane forest species. However, at the plantation scale, water consumption was found to depend on planting density and agronomic practices, emphasizing the need for sustainable management strategies to ensure crop viability without compromising water availability.

As a decision-support tool, the study developed CuencApp, a web-based application that simulates water balance and carbon storage under different land-use change scenarios in Andean watersheds. Based on the Budyko framework and high-resolution spatial data, the model enables estimation of surface runoff and assessment of watershed sensitivity to avocado expansion. In the pilot watershed of Jericó (Antioquia), results indicated that changes in vegetation cover could affect water availability, particularly under conditions of hydrological deficit. The study thus proposes a comprehensive approach to support more sustainable land-use planning in ecologically sensitive Andean regions.

Keywords: Persea americana Hass variety, transpiration, stomatal conductance (gs), wood density, environmental impacts and benefits.

Introducción

En las últimas décadas, el cultivo de aguacate Hass en Colombia ha crecido de forma exponencial, consolidándose como un motor de desarrollo económico y una fuente clave de ingresos para las comunidades rurales. Este auge ha estado impulsado por un aumento de más de diez veces en la demanda mundial de aguacate (*Persea americana*, variedad Hass) en comparación con la década pasada, lo que ha propiciado la acelerada expansión de estos cultivos en los Andes tropicales (Denvir et al., 2021).

Sin embargo, el crecimiento del cultivo también enfrenta desafíos significativos, tales como el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (sequías, inundaciones y tormentas) que ponen en riesgo la sostenibilidad de la producción de aguacate. Frente a este escenario, se requieren estrategias de adaptación que incluyan la selección de variedades más resistentes al estrés hídrico y térmico, la diversificación de cultivos con otras coberturas, y la adopción de prácticas agrícolas resilientes al clima y enfocadas en el conocimiento y uso sostenible del agua.

En este sentido, los productores colombianos, trabajan agremiados para lograr la sostenibilidad y viabilidad del cultivo del aguacate a largo plazo, así como para contribuir al logro de los objetivos de desarrollo sostenible en el campo colombiano. Es así, que los cultivos de aguacate podrían tener un potencial como sumidero de carbono o carbono neutral en su proceso intrínseco, convirtiéndolos en candidatos ideales para programas de reforestación o agroforestería que buscan compensar emisiones de carbono,

de la mano de la implementación de BPA Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), como el manejo eficiente del suelo y el agua y el uso racional de fertilizantes químicos.

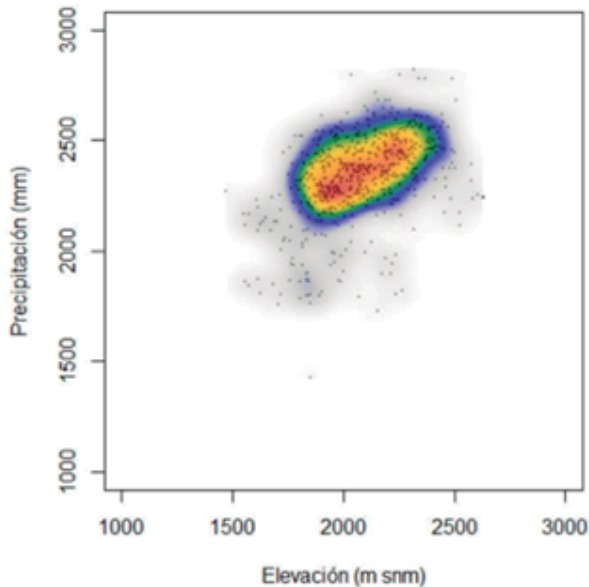
Por lo tanto, es fundamental realizar estudios integrales que evalúen los impactos (tanto positivos como negativos) del cultivo del aguacate Hass en Colombia. Ello permitirá adoptar medidas de manejo y regulación adecuadas, que promuevan una producción más sostenible y equilibrada (Bernal y Díaz, 2020). Así pues, conocer los posibles impactos e incluirlos en planes de manejo y ordenamiento territorial es necesario en función de la aplicación y generación de políticas públicas para la administración de los recursos naturales y la sostenibilidad del desarrollo económico y social.

Contexto y aproximación al cultivo de aguacate Hass colombiano

En Colombia, el cultivo de aguacate Hass ha crecido significativamente en los últimos años, impulsado por la diversidad geográfica y climática del país. Las condiciones favorables —como suelos fértiles, altitudes ideales y climas estables— han facilitado su expansión en municipios con Zonas de Vida aptas, especialmente en departamentos como Antioquia, Valle del Cauca, Tolima, Caldas y Risaralda. Esto ha permitido producir aguacates de alta calidad que responden a la creciente demanda global.

Según datos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), las plantaciones de aguacate Hass de exportación se encuentran ubicadas entre los 1.500 y los 2.600 m. s. n. m. en diferentes gradientes de elevación y precipitación (Figura 1).

Figura 1. Relación entre la elevación y la precipitación de predios de cultivos de aguacate Hass para exportación en Colombia

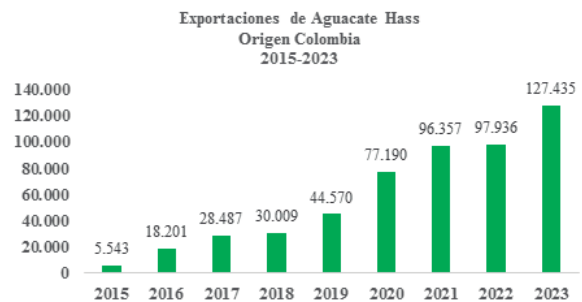


Fuente: elaboración propia, datos del ICA (2023).
 Nota: una mayor densidad de fincas se representa por colores cálidos, mientras que los colores fríos representan una menor densidad de predios productores según los gradientes de elevación y precipitación.

A partir de lo anterior, Colombia ha logrado incrementar significativamente sus exportaciones de aguacate *Hass* a mercados internacionales. Esto se debe a la creciente demanda global de esta fruta, a la reputación del aguacate colombiano por su sabor y calidad, y a la apertura de nuevos mercados gracias a diversos acuerdos comerciales establecidos por el Estado colombiano. Los aguacates *Hass* colombianos son apreciados por su textura cremosa, sabor exquisito y excelente vida útil en mercados tan diversos como Estados Unidos, la Unión Europea, América Latina y, más recientemente, mercados de China y Japón.

Según datos de la Corporación de Productores y Exportadores de Aguacate *Hass* de Colombia (CorpoHass), en el año 2023 se exportaron 127.435 toneladas de aguacate *Hass*, lo que representa un aumento del 20 % con respecto al año anterior (Figura 2). Esta tendencia creciente en las exportaciones demuestra el éxito del aguacate *Hass* colombiano en los mercados internacionales y su potencial para seguir creciendo en los próximos años.

Figura 2. Toneladas de aguacate Hass exportadas por año



Fuente: adaptado de CorpoHass, 2023 (<https://shorturl.at/hrDOS>)

El cultivo de aguacate *Hass* en Colombia tiene un futuro prometedor. Impulsado por la creciente demanda global, las condiciones climáticas favorables, el talento de los productores colombianos, el apoyo del gobierno y el compromiso con la sostenibilidad, se espera que el país continúe aumentando su producción y exportaciones de aguacate *Hass* en los próximos años. Esto consolidará a Colombia como un actor importante en el mercado global de esta fruta, contribuyendo al desarrollo económico del país, al bienestar de las comunidades rurales y a la protección del medio ambiente.

Contexto para el desarrollo de la investigación

Los bosques andinos tropicales se destacan como uno de los ecosistemas más biodiversos del planeta (Myers et al., 2000), con un papel fundamental en la regulación climática y la provisión de servicios ecosistémicos. Se ha demostrado que almacenan tanto carbono por unidad de área como los bosques amazónicos (Duque et al., 2021), además de abastecer de agua a más de 100 millones de personas en América del Sur (Anderson et al., 2011). No obstante, estos bosques enfrentan una degradación acelerada debido a la expansión de la frontera agropecuaria, en especial por actividades agrícolas y ganaderas (Armenteras et al., 2003). Esta presión ha llevado a la pérdida de cobertura boscosa, afectando particularmente a los remanentes pequeños, que son cruciales para mantener la conectividad ecológica en el paisaje (Wilson y Rhemtulla, 2018).

En este escenario, el cultivo de aguacate Hass (*Persea americana*), considerado una alternativa económica prometedora para regiones rurales de los Andes tropicales (Sommaruga y Eldridge, 2021), ha ganado protagonismo en países como Colombia. Sin embargo, los impactos ambientales derivados de su expansión no han sido suficientemente documentados (Erazo-Mesa et al., 2021), lo que ha dado lugar a percepciones encontradas y creciente debate público.

Una de las principales preocupaciones se relaciona con el uso del agua. En regiones con estrés hídrico como México y Chile, se han documentado conflictos sociales por la alta demanda hídrica de este cultivo. En Colombia, estas experiencias han sido replicadas y amplificadas por distintos medios de comunicación, incluidos documentales y plataformas digitales (por ejemplo, redes sociales, Netflix y DW), generando una con-

troversia social y política en torno al aguacate y su impacto sobre los recursos hídricos locales.

Frente a esta discusión, se hace necesario evaluar el comportamiento ecofisiológico del cultivo en condiciones locales, particularmente su eficiencia en el uso del agua, comparado con especies nativas presentes en los bosques andinos. Estudios que analicen el uso hídrico por área foliar, así como su impacto acumulado a nivel de cuenca, podrían aportar evidencia valiosa para contextualizar esta controversia (Krauss et al., 2022; Erazo-Mesa et al., 2021). Aunque se ha hipotetizado que el aguacate podría consumir más agua que especies nativas de árboles, es posible que las diferencias se deban más al manejo agronómico que al cultivo en sí (Nemera et al., 2020).

Por otro lado, el aguacate Hass, al ser un árbol de porte medio, presenta cierto potencial como sumidero de carbono, especialmente si reemplaza coberturas degradadas como los pastizales ganaderos, comunes en los Andes tropicales. Dado que esta especie proviene de ecosistemas de bosque andino, cabría esperar un crecimiento comparable al de especies arbóreas nativas. No obstante, prácticas como las podas frecuentes, orientadas a maximizar la producción de frutos, pueden limitar su capacidad de acumulación de biomasa y, por ende, de carbono. Actualmente, se desconoce con precisión dónde se sitúa el aguacate dentro del gradiente de coberturas vegetales en términos de almacenamiento de carbono.

El estudio de variables fisiológicas como la conductancia estomática resulta clave para comprender la eficiencia del uso del agua en las plantas. Investigaciones recientes han explorado cómo distintas especies ajustan esta función en respuesta a variaciones en la temperatura, la concentración de CO₂ y los

patrones de precipitación (Medlyn et al., 2011; Grossiord et al., 2020; Zhang et al., 2023). Estos hallazgos permiten anticipar cómo podrían responder los cultivos agrícolas ante escenarios futuros de cambio climático (De Souza, 2023).

En el contexto colombiano, Bernal y Díaz (2020) ofrecen un panorama detallado de *Persea americana*, incluyendo su origen, variedades comerciales y prácticas agronómicas para optimizar su rendimiento. Este conocimiento técnico, junto con investigaciones sobre el consumo hídrico del cultivo en regiones como Israel (Nemera et al., 2020), aporta elementos fundamentales para avanzar hacia un manejo más sostenible y planificado del aguacate en Colombia.

Para enfrentar estos desafíos, en este estudio financiado por ScotiaBank Net Zero Research Fund en su convocatoria 2022, se propuso estudiar la capacidad de almacenamiento de carbono del cultivo de aguacate Hass y su incidencia en el balance hídrico de las cuencas donde es cultivado. Los resultados del estudio son un valioso aporte de información para entender los impactos ambientales de este cultivo en Colombia.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Aportar al conocimiento de los impactos ambientales del cultivo de aguacate Hass en Colombia, con base en la estimación de la captura de carbono y del consumo de agua de esta especie.

Objetivos específicos

Estimar el contenido de carbono de cultivos de aguacate Hass mediante ecuaciones alométricas y estimaciones locales de la densidad de la madera.

Establecer una relación entre el uso del agua de árboles de aguacate Hass y el de especies nativas, mediante la comparación de la variación diurna de la conductancia estomática.

Identificar el impacto de la expansión de los cultivos de aguacate Hass en el balance hídrico de las cuencas afectadas.

Hipótesis

Hipótesis 1

En los cultivos de aguacate Hass en Colombia, el manejo agronómico tiende a homogeneizar el tamaño de los árboles, especialmente en altura y copa. Esto permite estimar con confianza el volumen promedio de madera a partir de una muestra representativa. La biomasa, y por tanto el carbono almacenado, depende de este volumen y de la densidad de la madera, la cual varía con factores ambientales como la elevación y la precipitación (Chave et al., 2009). Si los cultivos se ubican en condiciones ambientales contrastantes, pero mantienen árboles de tamaño similar, se espera que el contenido de carbono difiera principalmente por variaciones en la densidad de la madera. Así, si la densidad de la madera tiende a disminuir con la elevación o con una mayor precipitación anual, se esperaría encontrar un mayor contenido de carbono en los cultivos de menor elevación y en las áreas de precipitación menor.

Hipótesis 2

Dado que *Persea americana* es nativa de bosques montañosos de Mesoamérica (Bernal y Díaz, 2020), se espera que comparta estrategias ecológicas y de uso del agua con otras especies de ese tipo de ecosistema. Si la variación diurna de la conductancia estomática indica el uso de agua de una hoja, es

probable que las hojas de aguacate muestren patrones similares a los de especies nativas de bosques montanos. Sin embargo, como los árboles en los cultivos se manejan para maximizar la producción, podrían presentar una mayor conductancia estomática en ciertas horas del día —especialmente en la tarde (12–4 pm)—, cuando las especies nativas tienden a reducirla por estrés térmico (Cox et al., 2023).

Hipótesis 3

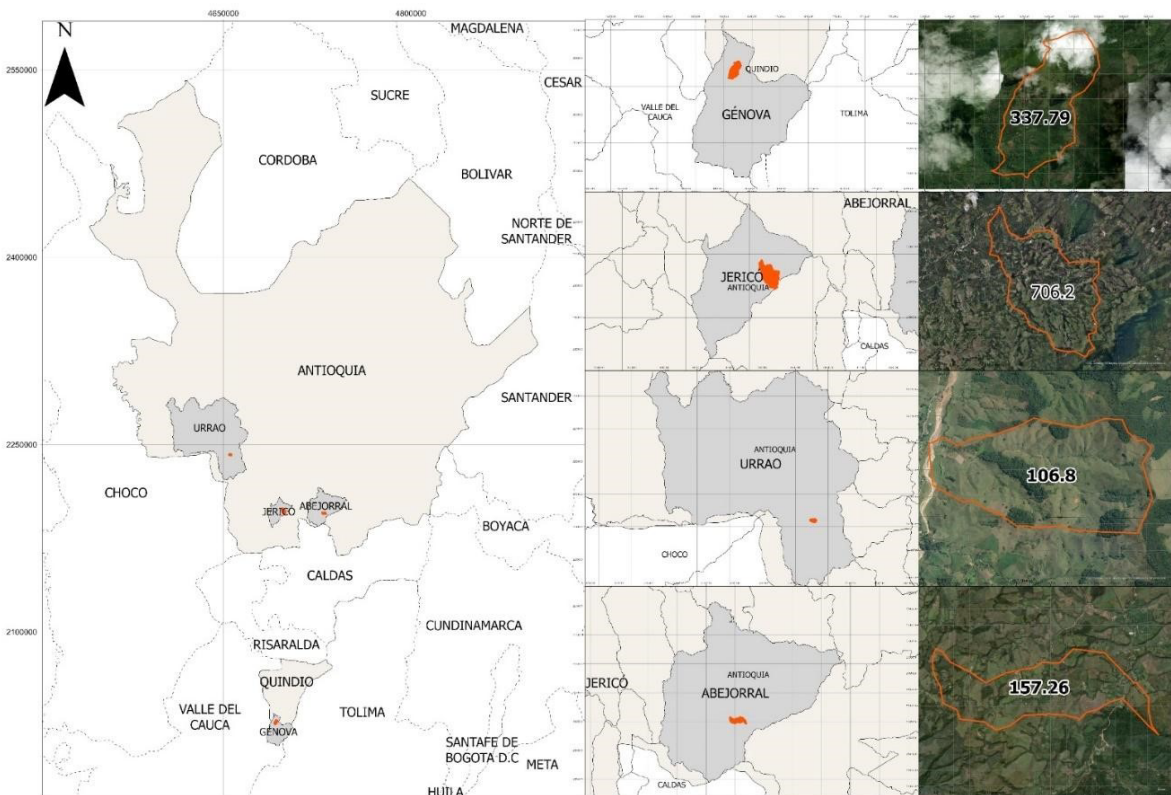
Los modelos de balance hídrico de una cuenca hidrográfica, que integran la variación en coberturas vegetales y su efecto sobre la evapotranspiración permiten reducir la incertidumbre y evaluar mejor el impacto del cambio de uso del suelo. Si el cultivo de aguacate influye significativamente en el balance hídrico, entonces su expansión a

costa de bosques debería reflejarse en una reducción del rendimiento hídrico de la cuenca. En cambio, si reemplaza pastizales, es posible que el rendimiento aumente, ya que los árboles regulan mejor la escorrentía y retención de agua a largo plazo.

Sitios de estudio

El estudio se realizó en cuatro fincas productivas de aguacate Hass, ubicadas en los Andes tropicales colombianos. Los datos de campo se tomaron en los municipios de Urrao, Jericó y Abejorral (Departamento de Antioquia) y en el municipio de Génova (Departamento del Quindío) (Figura 3). Los detalles de la localización de los sitios, con dos sitios por encima de los 2000 m. s. n. m. y 2000 mm de precipitación, así como las características generales de cultivo se presentan en la Figura 4.

Figura 3. Cuencas hidrográficas donde se ubican los sitios de muestreo



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Localización de los sitios de medición y las características generales de cultivo

Departamento	Municipio	Cuenca	Extensión cuenca (ha)	Extensión finca (ha)	Área cultivo (ha)	Precipitación (mm)	Altitud (m.s.n.m)	Edad cultivo (años)	Estado del cultivo
Antioquia	Abejorral	Aduanilla	157,26	82,21	56	2.105	2.089	7	Pre-cosecha
	Urrao	El Silencio	106,8	119,4	86	1.841	2.142	5	Pos-cosecha
	Jericó	La Palma	706,2	268,37	200	1.822	1.931	6	Pre-cosecha
Quindío	Génova	El Guamo	337,79	452,46	302,8	2.469	1.852	4	Pre-cosecha

Fuente: elaboración propia.

Estimación del almacenamiento de carbono en cultivo de aguacate Hass

A nivel de metodología, en cada sitio de muestreo se cosecharon cuatro árboles de aguacate para cuantificar la biomasa aérea total. Luego de la cosecha, se pesaron por separado las hojas, ramas, frutos y el tronco. De cada uno de estos compartimentos se tomaron submuestras para determinar el contenido de humedad y la densidad de la madera. Las submuestras fueron llevadas al Laboratorio de maderas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, donde se secaron a 60 °C hasta alcanzar peso constante. De esta forma, el porcentaje de Contenido de Humedad (CH) fue calculado como:

Ecuación 1 $AGB = \sum_{i=1}^n CH_i \text{Peso total}_i$

Una vez calculado el CH, la cantidad total de biomasa (AGB) de cada individuo se obtiene mediante la sumatoria del peso total de cada compartimento de carbono en la planta, multiplicado por su correspondiente contenido de humedad:

Ecuación 2 $AGB = \sum_{i=1}^n CH_i \text{Peso total}_i$

La densidad de la madera es una propiedad física clave para estimar biomasa mediante modelos alométricos. En total, se recolectaron 64 muestras en los cuatro sitios de muestreo para relacionar esta variable con factores ambientales como la altitud y la precipitación. La densidad (ρ) se determinó utilizando el Método de Desplazamiento de Fluidos, que consiste en medir el volumen desplazado (cm^3) al sumergir una muestra en agua y relacionarlo con su peso seco (g). De esta forma, la densidad, en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, se obtiene como:

$$\text{Ecuación 3} \quad \rho = \frac{\text{peso seco}}{\text{Volumen desplazado}}$$

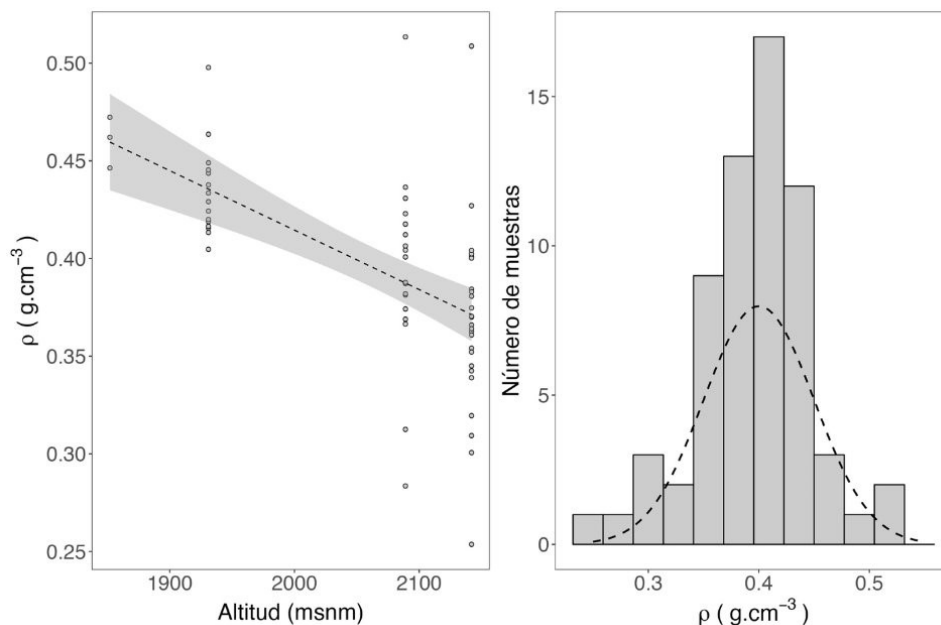
En general, debido al alto valor de un árbol de aguacate en producción, el uso de métodos destructivos para estimar biomasa resulta costoso. En este estudio, el número de muestras recolectadas no fue suficiente para desarrollar modelos alométricos que relacionen masa con variables dasométricas. Por ello, se optó por estimar el contenido de

carbono almacenado a partir de la densidad de la madera y el volumen total del árbol. La extrapolación a escala de cultivo se realizó con base en el número de árboles plantados, y la variación espacial se analizó a partir de la relación entre la densidad de la madera y la altitud. Específicamente, la biomasa en cada cultivo queda expresada como:

$$\text{Ecuación 4} \quad \text{AGB} = n \cdot \rho(x) \cdot V$$

Donde AGB representa la biomasa aérea viva total del cultivo que corresponde al número de individuos por hectárea en cada cultivo y el volumen promedio de los árboles de aguacate, e indica la densidad en función de la altitud (x) de cada sitio. La biomasa se estima a partir de la relación alométrica entre la densidad de la madera y variables descriptoras del tamaño de los árboles como son su diámetro y altura (Chave et al., 2014). Ver (Figura 5).

Figura 5. Relación densidad de la madera y altitud

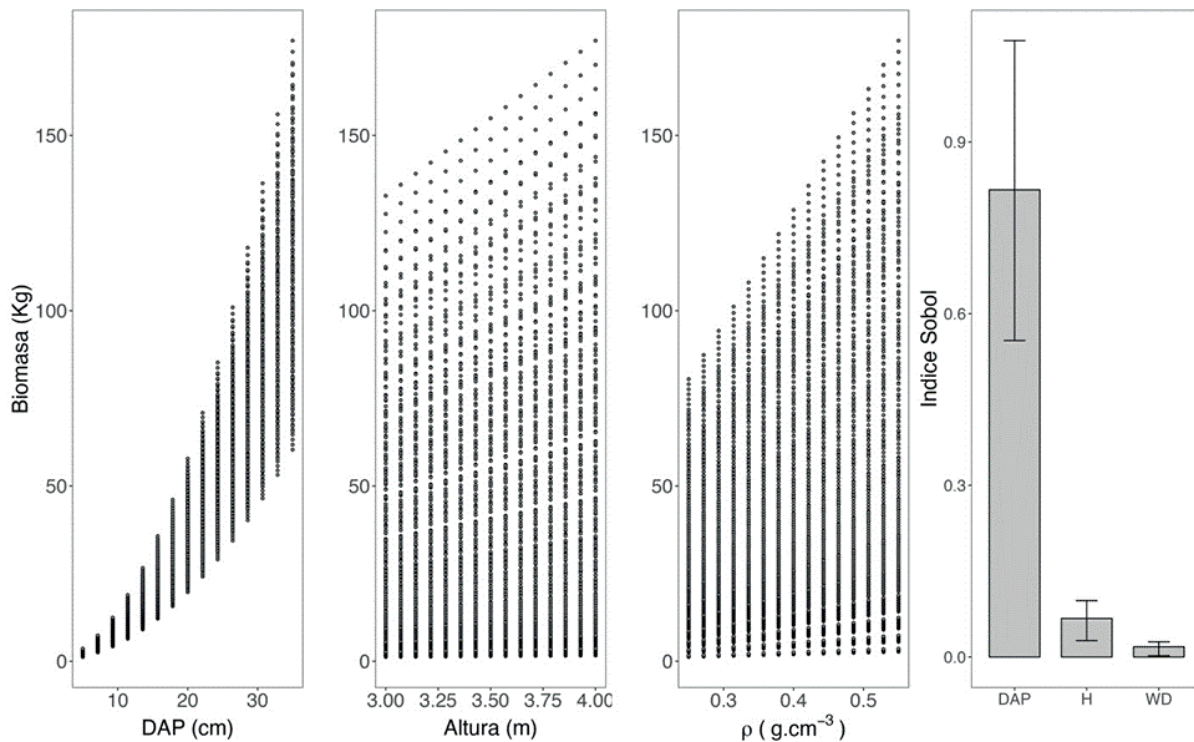


Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones se aplicaron a los datos recolectados en los cuatro sitios de muestreo. Para evaluar la importancia relativa de las variables utilizadas en los modelos alométricos, se simularon valores de diámetro, altura y densidad de la madera con base en los muestreos realizados en campo. Se usó una distribución lognormal para el

diámetro a la altura del pecho (DAP) y distribuciones normales para la altura y la densidad de la madera. Con estas simulaciones, se realizó un análisis de sensibilidad empleando el Índice de Sobol, con el fin de cuantificar el efecto de cada variable dasométrica sobre la estimación de biomasa. Ver (Figura 6).

Figura 6. Análisis de sensibilidad para el modelo alométrico de biomasa



Fuente: elaboración propia.

Resultados estimación del almacenamiento de carbono

Influencia de las variables dasométricas en la estimación de biomasa

Los resultados obtenidos indican que el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) es la variable con mayor influencia sobre la estimación de biomasa en árboles de *Persea americana* variedad Hass. No obstante, debido al manejo silvicultural aplicado en los

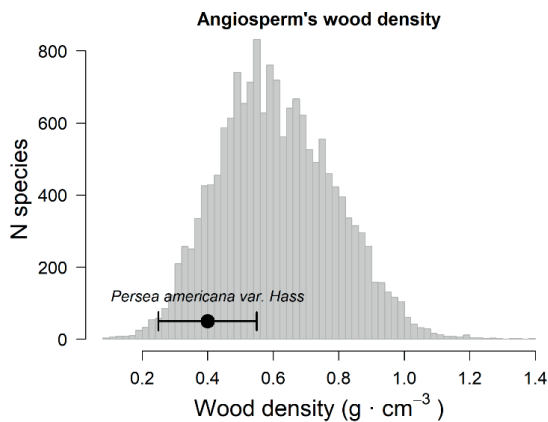
cultivos —que promueve el desarrollo lateral de ramas y restringe el crecimiento en altura para facilitar la cosecha—, se genera una variabilidad estructural que puede afectar las relaciones de tamaño y la precisión en la estimación de biomasa.

Este estudio propone que la cuantificación del carbono se realice a partir del volumen y la densidad de la madera, ya que esta metodología incorpora tanto la forma del árbol como la variación intraespecífica en sus

características estructurales.

La densidad de la madera presenta un rango significativo de variación (Figura 7) al compararse con datos reportados de densidad de la madera para las Angiospermas, lo que parece estar relacionado con las condiciones específicas del sitio donde crece el árbol. Factores como el tipo de suelo, la disponibilidad de agua, la altitud, y las condiciones climáticas locales pueden influir en la densidad de la madera, indicando que las características del entorno juegan un papel fundamental en su desarrollo.

Figura 7. Variación de la densidad de la madera de *Persea americana* variedad Hass



Fuente: adaptado de Zanne et al (2010).

Resultados en términos de biomasa para cada uno de los sitios de estudio donde se pudo realizar el muestreo: La Figura 8 muestra los resultados de biomasa aérea estimada y medida en los cinco sitios de estudio (dos sitios en Urrao). En términos de biomasa individual, Jericó presentó el valor más alto (152,95 kg), mientras que en Urrao se registraron los valores más bajos (38,58 kg y 74,38 kg en dos parcelas diferentes). La densidad de madera osciló entre 380,4 kg/m³ (Urrao) y 467,4 kg/m³ (Génova), siendo esta última la más alta. La biomasa aérea estimada por hectárea varió entre 27,39 y 32,99 ton/ha, con el valor más bajo también en Urrao y el más alto en Abejorral.

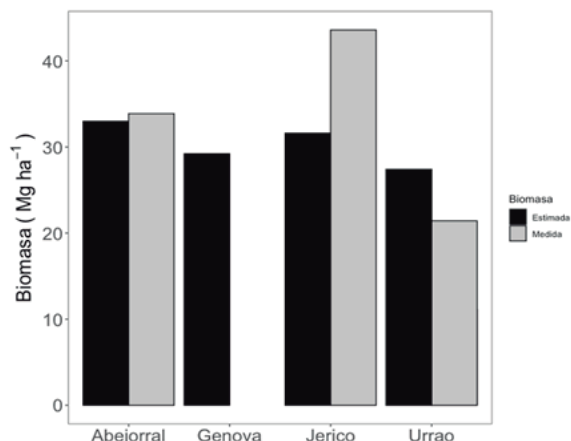
En cuanto a la biomasa aérea medida directamente en campo, Jericó mostró la mayor acumulación (43,59 ton/ha), mientras que en Urrao se observaron los menores valores (11,11 y 21,42 ton/ha). En el sitio de Génova no fue posible obtener el dato de biomasa medida, aunque se obtuvo una estimación a partir de volumen y densidad. Estos resultados reflejan variabilidad tanto en las características estructurales de los árboles como en las condiciones ambientales y de manejo entre los sitios (Figura 9).

Figura 8. Resultados de biomasa estimada para los sitios de estudio

Localidad	Biomasa individual (Kg)	Altitud (msnm)	Número de individuos (n ha ⁻¹)	Densidad de madera (Kg m ⁻³)	Biomasa aérea estimada (Ton ha ⁻¹)	Biomasa aérea medida (Ton ha ⁻¹)
Abejorral	101,71	2089	333	396,3	32,99	33,87
Urrao	38,58	2142	288	380,4	27,39	11,11
Urrao	74,38	2142	288	380,4	27,39	21,42
Jericó	152,95	1931	285	443,7	31,61	43,59
Génova	NA	1852	250	467,4	29,21	NA

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Biomasa estimada para los sitios de estudio



Fuente: elaboración propia.

Comparación del contenido de carbono con otras coberturas vegetales

En comparación con la biomasa aérea de otras coberturas, los cultivos de aguacate presentan un mayor potencial de acumulación de carbono que los pastizales y herbazales. Según Yepes et al. (2011), los pastos acumulan en promedio 6,4 t C/ha y los herbazales 14,1 t C/ha. En contraste, en los cultivos de aguacate evaluados se estimó un rango de entre 16 y 21 t C/ha.

Si bien este valor está por debajo del estimado para bosques nativos en los Andes colombianos —que, según Duque et al. (2021), acumulan 73,85 t C/ha entre los 1.200 y 2.000 m. s. n. m., y 62,96 t C/ha entre los 2.000 y 2.800 m. s. n. m.—, los resultados sugieren que los cultivos de aguacate representan una mejor alternativa ecológica que coberturas de pasto o desprovistas de vegetación, especialmente en áreas transformadas o degradadas, al aportar estructura arbórea y contribuir a la captura de carbono.

Estimación de la actividad estomática del cultivo de aguacate Hass

Se seleccionaron cultivos con árboles de *Persea americana* variedad Hass tipo exportación y visiblemente sanos, con edades entre 3 y 10 años, rango en el que se maximiza la producción de frutos. De cada árbol se midieron tres hojas, tomadas de la quinta posición de una rama ubicada en la parte media de la copa. Se evaluaron 10 árboles por cultivo, para un total de 120 observaciones (N = 120).

Las mediciones se realizaron cada hora entre las 09:00 y las 16:00, utilizando un porómetro (METER SC-1 Leaf Porometer) para registrar la conductancia estomática (gs), la temperatura foliar y la humedad relativa interna y ambiental. La conductancia estomática se expresó en micromoles por metro cuadrado por segundo, y se utilizó como indicador indirecto del consumo hídrico, ya que está estrechamente relacionada con la tasa de transpiración foliar, debido a que representa la tasa de intercambio de vapor de agua de una hoja con su entorno. Es decir, a mayor conductancia estomática mayor será la transpiración y por ende mayor será el consumo de agua por parte de la planta. El objetivo de la medición fue determinar si la conductancia estomática del aguacate variaba bajo diferentes condiciones de humedad.

Resultados: conductancia estomática

Comparación de conductancia estomática entre sitios

Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas en la conductancia estomática entre los árboles medidos de las cuatro fincas estudiadas ($F = 3.14$, $p = 0.24$), a pesar de las variaciones ambientales en humedad relativa y precipitación media anual. Esto sugiere un comportamiento fisiológico consistente de la especie frente al uso

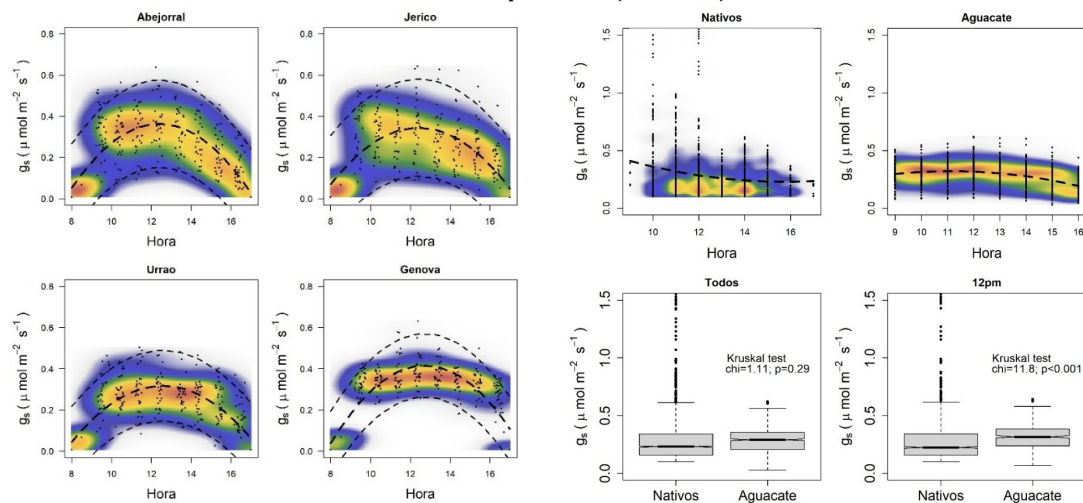
del agua en distintos contextos locales.

Sin embargo, se observaron ligeras variaciones entre fincas, posiblemente asociadas a las condiciones de manejo. En particular, en la finca Génova —donde los árboles presentaban un mayor tamaño, derivados de condiciones propias de la variedad y manejo agronómico— se registraron valores más altos de conductancia estomática (Figura 10), lo que podría indicar una mayor demanda hídrica

para sostener su productividad.

En conjunto, estos resultados indican que, aunque existen diferencias menores entre sitios, *Persea americana* mantiene un patrón de comportamiento estable en cuanto a consumo hídrico, lo que refuerza su potencial como cultivo resiliente en zonas de los Andes tropicales con condiciones climáticas variables.

Figura 10. Conductancia estomática de los sitios de estudio por horas (Izquierda), conductancia estomática por sitio (Derecha)



Fuente: elaboración propia.

Comparación de conductancia estomática del aguacate Hass con especies del bosque natural

Al comparar la variación en el consumo de agua del aguacate con 15 especies de árboles de bosque natural establecidos en el estudio realizado por Cox et al. (2023), se observa que la tendencia central es similar entre ambas. Sin embargo, durante las horas del mediodía, los árboles de aguacate muestran una conductancia estomática significativamente mayor. Esto sugiere que el aguacate puede tener una mayor capacidad de intercambio gaseoso en comparación con las especies de bosque natural en ese perio-

do del día, lo cual podría influir en su eficiencia hídrica y adaptación a condiciones ambientales variables (Figura 11).

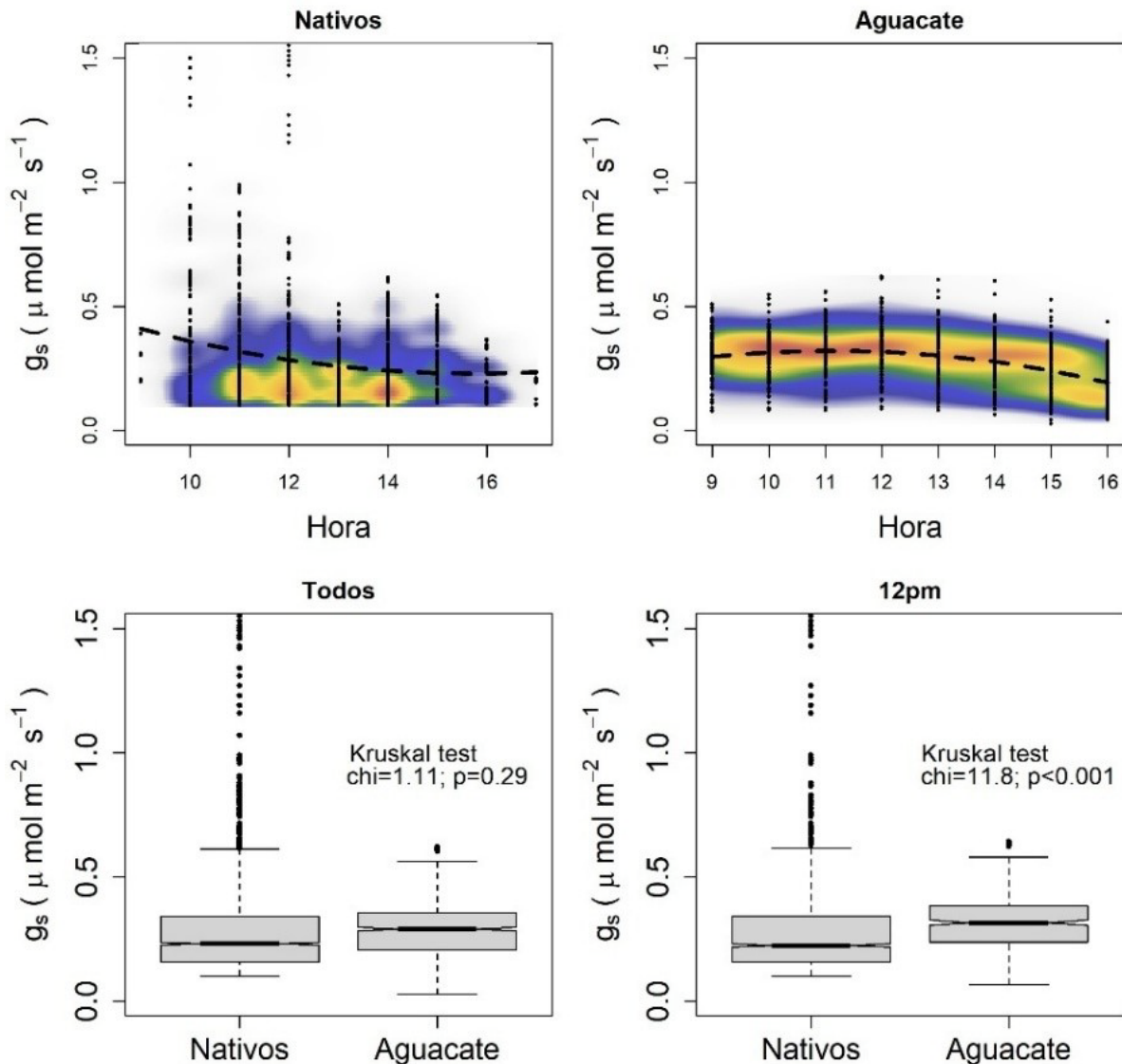
La apertura estomática en horas de alta temperatura y radiación solar directa no es una respuesta común en las plantas; tal comportamiento puede dar cuenta de la respuesta a la alta actividad fotosintética a la cual funcionan estas plantas (ya sea por fertilización o mejoramiento genético), y en consecuencia tener un mayor consumo de agua al menos un par de horas durante el día. Ello podría entenderse como un incremento del 5 % (debido a la fracción del día y el porcentaje de incremento respecto a los

demás momentos del día) en la conductancia estomática entre el cultivo y el bosque nativo, lo cual podría llevar a un incremento en el consumo de agua de igual magnitud.

En las especies de bosque nativo, la conductancia estomática es más alta en las primeras horas del día y disminuye hacia la tarde; en los árboles de aguacate, tiende a

aumentar en la tarde. Esto sugiere que, fisiológicamente, los árboles de aguacate se comportan de manera similar a las especies del bosque natural en la misma zona de vida. No obstante, al estar sometidos a condiciones de manejo para la producción, los árboles de aguacate muestran diferencias significativas a lo largo del día, lo que se traduce en una mayor actividad fotosintética alrededor del mediodía.

Figura 11. Comparación de la conductancia estomática de bosque nativo y cultivo de aguacate



Fuente: elaboración propia.

Efecto de modificar cobertura de cultivo de aguacate sobre el modelo de balance hídrico en la cuenca hídrica

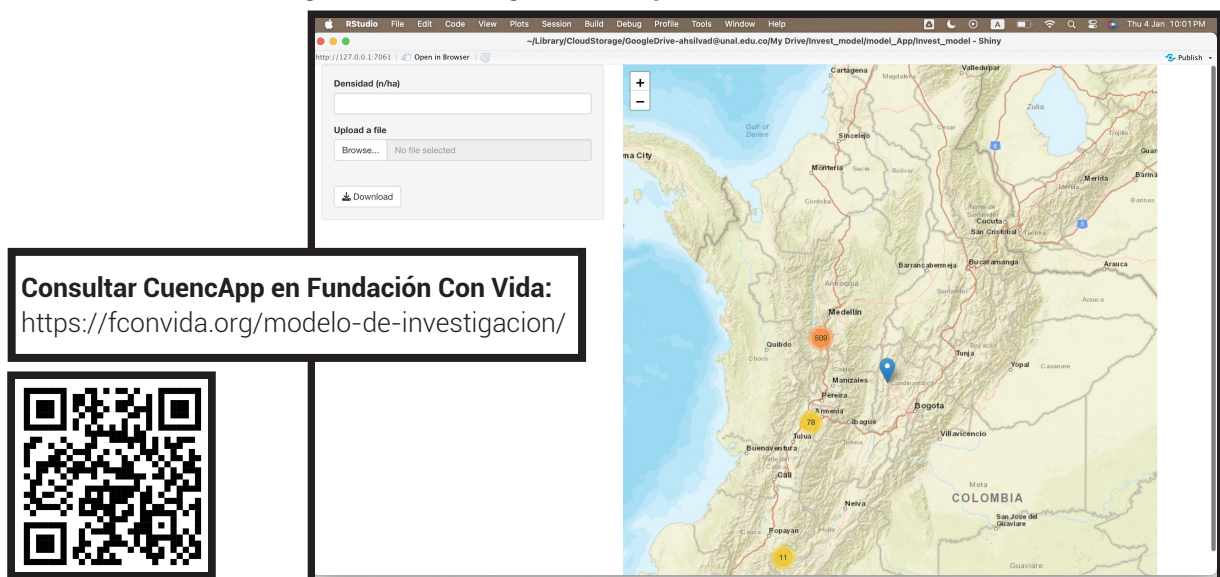
A partir de los resultados obtenidos sobre el almacenamiento de carbono y la conductancia estomática en cultivos de aguacate Hass, se desarrolló CuencApp, una aplicación web que permite simular el rendimiento hídrico y los cambios en el contenido de carbono ante escenarios de transformación del paisaje en cuencas andinas de Colombia, como el reemplazo de bosque por cultivos de aguacate y/o la conversión de coberturas a pastizales. Basada en el modelo InVEST (Pathak et al., 2021) y calibrada con datos locales, esta herramienta ofrece una primera aproximación a la cuantificación de impactos ambientales a escala de cuenca, integrando modelos teóricos y variables morfológicas para estimar el balance hídrico y de carbono bajo distintos usos del suelo.

El desarrollo del simulador CuencApp se inició por adaptar y calibrar el modelo InVEST al contexto colombiano, para lo cual se utilizaron las coordenadas de 600 cultivos de

aguacate Hass registrados por el ICA, distribuidos en distintas regiones del país. Con esta información, se aplicó la ecuación propuesta por Xu et al. (2013) para estimar el parámetro ω de la función de Budyko, fundamental para relacionar la evapotranspiración real con la precipitación, en función de variables como cobertura vegetal (NDVI), retención hídrica del suelo (TWI) y latitud de cada cuenca.

La ejecución de la aplicación web requiere únicamente 2 parámetros de entrada para obtener una aproximación del Balance Hídrico de la cuenca en la cual está ubicado el cultivo de interés. En primer lugar, es necesario cargar el polígono que determina el área del cultivo en formato kml. Adicionalmente, el usuario debe proveer el número de individuos por hectárea en el cultivo con el fin de estimar el contenido de carbono almacenado por la biomasa aérea de los árboles de aguacate. CuencApp facilita así la toma de decisiones orientadas a una gestión territorial más sostenible en contextos ecológicamente sensibles como los Andes colombianos. Ver Figura 12 que presenta la interfaz gráfica del aplicativo web.

Figura 12. Interfaz gráfica del aplicativo web CuencAPP



Consultar CuencApp en Fundación Con Vida:
<https://fconvida.org/modelo-de-investigacion/>



Fuente: elaboración propia.

Nota: consultar aplicación en Fundación Con Vida: <https://modelo.f.convida.org/app/>

Modelo Hidrológico InVest para la estimación en general

La herramienta para la cuantificación de servicios ecosistémicos utilizados por el conjunto de modelos InVest aborda el Balance Hídrico de una cuenca hidrográfica mediante la función de Budyko, la cual relaciona el Índice Evaporativo (razón entre evapotranspiración real y precipitación) con el Índice de Aridez (razón entre evapotranspiración potencial y evapotranspiración real). La forma determinística del modelo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{ET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{ET_p(x)}{P(x)} - \left[\left(1 + \left(\frac{ET_p(x)}{P(x)} \right)^{\varpi(x)} \right)^{\frac{1}{\varpi(x)}} \right] /$$

Ecuación 5

Donde ET es la evapotranspiración real, P la precipitación, ET_p la evapotranspiración potencial, y ϖ es un parámetro empírico que refleja las características topográficas y de las coberturas terrestres de las cuencas hidrográficas; la variable x, por su parte, determina el valor de la variable para cada píxel (Zhou et al., 2015; Donohue et al., 2012).

Acorde con el modelo conceptual, la estimación del Balance Hídrico en una cuenca depende en gran medida de las características fisiológicas de la vegetación de las coberturas terrestres. En este sentido, la incorporación del coeficiente K_c permite captar la incidencia de la variabilidad espacial de la vegetación en la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). De este modo, la evapotranspiración del cultivo se obtiene mediante la siguiente ecuación (Tallis et al. 2012):

$$ET_c(x) = K_c(l_x) \cdot ET_o(x) \quad \text{Ecuación 6}$$

A partir de las coberturas vegetales estimadas de imágenes Sentinel, se asignó un valor de K_c de acuerdo con las bases de datos proveídas por la FAO para los cultivos, pastos y bosques (Allen et al., 1998).

El parámetro empírico requiere ser estimado para captar características topográficas y de las coberturas terrestres de las cuencas hidrográficas; de esta forma, varios estudios han reportado modelos estadísticos que asocian ϖ con la Latitud (lat), el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) y el Índice de Humedad Topográfico (TWI), de la siguiente forma (Xu et al., 2013):

$$\varpi(x) = 0,69387 - 0,01042 \cdot lat + 2,81063 \cdot NDVI + 0,1461185 \cdot TWI \quad \text{Ecuación 7}$$

El agua excedente en superficie se obtiene a partir del Índice Evaporativo Cuantificado mediante la Ecuación de Budyko y la precipitación en un paso de tiempo. Por lo tanto, el Balance Hídrico, expresado como lámina de agua (mm) se define, acorde con Ningrum et al. (2022), como:

$$y(x) = \left(1 - \frac{ET(x)}{P(x)} \right) \cdot P(x) \quad \text{Ecuación 8}$$

Finalmente, para estimar el Balance Hídrico a escala de cuenca, se incorporó la Capacidad de Almacenamiento de Agua del Suelo (AWC) a 30 cm proveída por las bases de datos globales de SoilGrid (Hengl et al., 2017). De este modo, el agua en superficie (W) se expresa mediante:

$$W(x) = Y(x) - AWC(x) \quad \text{Ecuación 9}$$

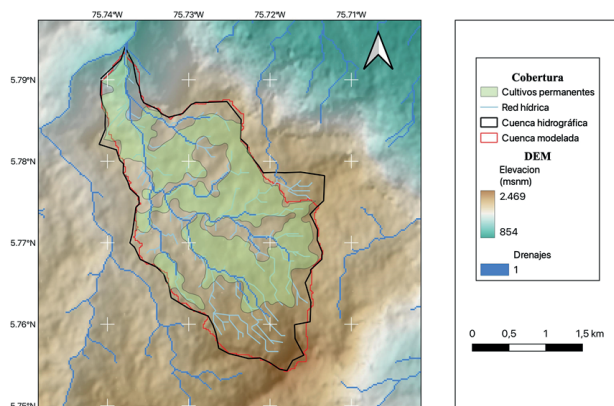
Aplicación del modelo hidrológico en una cuenca de estudio

Como estudio de caso, se seleccionó la cuenca La Palma, ubicada en el municipio de Jericó (Antioquia), donde también se realizaron mediciones de variables fisiológicas en árboles de aguacate. La delimitación de esta cuenca se hizo manualmente con base en cartografía y validación de campo, y luego se comparó con un procedimiento automatizado usando el Modelo Digital de Elevación (DEM). Las ligeras diferencias observadas se atribuyen a la limitación del modelo para

detectar drenajes secundarios, aunque el método automatizado fue considerado adecuado para análisis a escala regional.

En la cuenca hidrográfica La Palma, la delimitación mostró concordancia general entre los métodos manual y automático (Figura 13). Los mapas de distribución espacial del parámetro ω evidencian mayores valores en zonas de vaguada, asociadas con mayor acumulación de agua. Los valores de K_c también reflejaron la variabilidad en la cobertura y su influencia sobre la demanda hídrica (Figura 14).

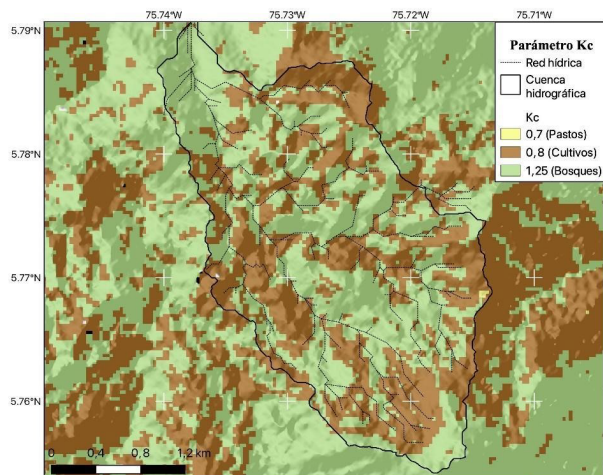
Figura 13. Resultado de la delimitación de cuencas hidrográficas mediante un proceso manual (polígono negro) y automático (polígono rojo)



Fuente: elaboración propia.

Nota: las líneas azul claro representan la red de drenaje de la cuenca, mientras los píxeles azules señalan la red de drenaje derivada del modelo de elevación digital.

Figura 14. Resultado del parámetro K_c para la cuenca de Jericó. Las líneas punteadas representan las fuentes hídricas, mientras la línea negra indica el área de la cuenca



Fuente: elaboración propia.

Para la simulación espacial, se homogenizaron todas las capas de información a una resolución de 10 metros. Se incluyeron datos climáticos (precipitación y evapotranspiración potencial) de la base CHELSA (Karger et al., 2021), valores de NDVI extraídos de imágenes MODIS a través de Google Earth Engine, y el TWI calculado con el modelo de elevación SRTM usando el paquete WhiteboxTools (Wu & Brown, 2022). El parámetro ω se estimó como función del NDVI promedio; y TWI por píxel y latitud del centroide de la cuenca. Asimismo, se incorporaron los valores del Coeficiente de Cultivo (K_c) ajustados a la heterogeneidad de las coberturas vegetales para una estimación más precisa de la evapotranspiración.

A nivel nacional, el valor promedio estimado para el parámetro ω fue de 1,97, con un intervalo de confianza del 95% entre 0,72 y 2,84. Se identificó una correlación del 86% entre ω y sus variables explicativas, siendo la latitud la que más aporta a la varianza explicada (72%). Estos resultados demuestran la relevancia del parámetro para capturar las diferencias en el comportamiento hídrico de cuencas con distintas condiciones biofísicas.

Los análisis de sensibilidad del modelo de Budyko mostraron que valores bajos de ω (<1) se asocian con cuencas de alta evaporación, mientras que valores entre 2 y 3,5 indican un equilibrio más estable entre la demanda evaporativa y el índice de aridez, reduciendo la sensibilidad del modelo. En más de 2.000 interacciones con combinaciones distintas de parámetros, se observó que el 90% de la variabilidad del modelo depende de la relación entre evapotranspiración potencial y precipitación.

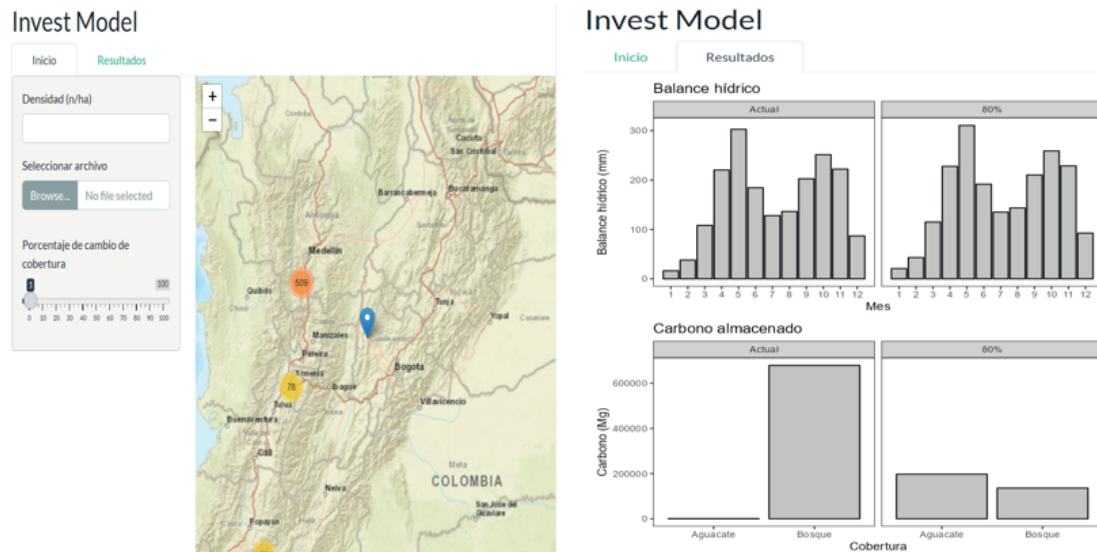
La simulación hidrológica arrojó un caudal superficial anual entre 976 y 3.227 mm, con mayor consumo de agua en zonas con cobertura arbórea y alto TWI (Figura 15). La disponibilidad hídrica mostró una marcada

estacionalidad, siendo los meses de enero y febrero los más críticos por presentar déficit. Estos resultados confirman la utilidad del modelo para estimar impactos hidrológicos ante escenarios de cambio de uso del suelo, como la expansión de cultivos de aguacate en cuencas andinas.

Los resultados presentados por el aplicativo "CuencApp" muestran los efectos de un cambio de cobertura del 80 % de bosque a cultivo de aguacate sobre el balance hídrico mensual y el almacenamiento de carbono en una cuenca simulada. En términos del balance hídrico, ambos escenarios —actual y con cambio de cobertura— presentan una distribución estacional marcada, con mayores valores de disponibilidad de agua entre los meses de abril y septiembre, coincidiendo con las temporadas de lluvias. No obstante, el escenario con reemplazo de bosque muestra una ligera disminución en el balance mensual en la mayoría de los meses, lo que indica una reducción en la capacidad de regulación hídrica de la cuenca como consecuencia del cambio de uso del suelo.

Resultados de CuencApp: almacenamiento de carbono

En cuanto al almacenamiento de carbono, en el escenario actual, el bosque almacena más de 600.000 kg de carbono, mientras que al ser reemplazado en un 80 % por cultivo de aguacate, esa capacidad de almacenamiento se reduce drásticamente, con valores significativamente más bajos tanto para el aguacate como para el remanente de bosque. Este análisis confirma que, si bien el aguacate representa una cobertura vegetal arbórea, su capacidad de almacenamiento de carbono y regulación hídrica no se equipara a la de un ecosistema boscoso maduro, lo que resalta la importancia de una planificación cuidadosa del cambio de uso del suelo en zonas de alta sensibilidad ecológica (Figura 15).

Figura 15. Resultado gráfico de CuencApp caso de estudio. Balance Hídrico y carbono almacenado.

Fuente: elaboración propia.

Nota: este aplicativo web se hace una aproximación a partir de fuentes secundarias de información sobre la incidencia de los cultivos de aguacate en la demanda hídrica de una cuenca y en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea viva. El aplicativo entrega información sobre el balance hídrico en escalas de tiempo mensuales para la cobertura actual y una simulación en la cual un porcentaje de bosque es reemplazado por cultivos de aguacate. Se muestra el cambio en el balance hídrico entre el observado y el simulado. Los parámetros de entrada hacen referencia a la densidad de siembra del cultivo de interés por hectárea. La delimitación del área del cultivo (formato.km/) y el porcentaje de bosque que será reemplazado en los cultivos de aguacate.

Salida grafica de CuencApp del estudio de caso

La salida gráfica del aplicativo consta de balance hídrico a escala mensual de la cuenca objeto de estudio (Figura 15). Básicamente se consideran 4 escenarios en los cuales se reemplaza un porcentaje determinado de bosque por cultivos de aguacate, ya que el principal propósito es simular la sensibilidad de cambios de cobertura en la disponibilidad de agua. Esta salida gráfica está asociada al siguiente mensaje: "CuencaAPP permite cuantificar el Balance Hídrico para una cuenca de interés. Para esto se implementa la función de Budyko, la cual permite calcular un balance hídrico a escala de una cuenca hidrográfica relacionando el índice de demanda evaporativa (razón entre la evapotranspiración real y precipitación) con el

índice de aridez (razón entre la evapotranspiración potencial y evapotranspiración real)."

"Este aplicativo Web se hace una aproximación a partir de fuentes secundarias de información sobre la incidencia de los cultivos de aguacate en la demanda hídrica de una cuenca y en el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea viva. El aplicativo entrega información sobre el balance hídrico en escalas de tiempo mensuales para la cobertura actual y una simulación en la cual un porcentaje de bosque es reemplazado por cultivos de aguacate. Se muestra el cambio en el balance hídrico entre el observado y el simulado. Los parámetros de entrada hacen referencia a la densidad de siembra del cultivo de interés por hectárea. La delimitación del área del cultivo (formato.kml) y el porcentaje de bosque que será reemplazado en los cultivos de aguacate"

Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el carbono acumulado en los cultivos de aguacate Hass varía a lo largo de gradientes ambientales, en estrecha relación con los cambios en la densidad de la madera. La acumulación de biomasa mostró una alta variabilidad entre los sitios estudiados, influenciada por condiciones ambientales, características estructurales de los árboles y prácticas de manejo. En general, se observó que una mayor densidad de la madera tiende a asociarse con una mayor biomasa aérea, aunque esta relación también está mediada por factores como la densidad de siembra y el tamaño promedio de los individuos. Estos hallazgos subrayan la importancia de adoptar un enfoque integral para mejorar la precisión en las estimaciones de biomasa en este tipo de cultivos.

La densidad de la madera de *Persea americana*, determinada por sus rasgos anatómicos, varía significativamente en respuesta a gradientes ambientales de elevación, temperatura y precipitación, como también se ha reportado en otras especies de angiospermas (Chave et al., 2009). Esta variación, observada entre las cuatro fincas estudiadas, evidencia una alta capacidad adaptativa de la especie a las condiciones locales, lo que se traduce en una notable capacidad de supervivencia y su capacidad para mantener niveles óptimos de producción. Sin embargo, esta adaptabilidad no garantiza altos niveles de producción, ya que mantener rendimientos óptimos en ambientes menos favorables puede requerir un mayor uso de insumos como fertilizantes y riego, comprometiendo su sostenibilidad ambiental. Por ello, se recomienda que las estimaciones de biomasa aérea en cultivos de aguacate Hass incorporen mediciones locales de densidad de la madera, lo que permitiría refinar las estimaciones de carbono acumulado hasta en un

17% y contribuir a una planificación más precisa y sostenible del cultivo.

Se observaron diferencias significativas entre la biomasa estimada mediante modelos basados en volumen y densidad, y la medida directamente en campo, lo que evidencia la necesidad de ajustar las metodologías a las particularidades del cultivo de aguacate. Estas discrepancias pueden estar relacionadas con la variabilidad en la arquitectura de los árboles inducida por el manejo agrícola y con la heterogeneidad ambiental de los sitios. Aun cuando la capacidad de acumulación de carbono del aguacate Hass es inferior a la de los bosques nativos, supera con creces a la de coberturas como pastos o áreas degradadas, lo que posiciona a este cultivo como una alternativa intermedia en términos de almacenamiento de biomasa aérea.

Los resultados muestran que el aguacate Hass presenta una conductancia estomática comparable a la de especies nativas de los bosques montañosos colombianos, lo que indica que, a nivel individual, su demanda hídrica es similar. No obstante, esto no se traduce necesariamente en un uso equivalente de agua por hectárea, ya que dicho consumo depende de factores como la densidad de siembra y el manejo agronómico. Por tanto, establecer densidades de cultivo que se asemejen al número de árboles adultos en un bosque podría contribuir a mantener un balance hídrico comparable entre ambas coberturas.

Para maximizar el almacenamiento de carbono y minimizar el impacto sobre la regulación hídrica, se recomienda implementar esquemas de uso del suelo que integren los cultivos de aguacate con fragmentos de bosque, especialmente con árboles de gran porte. Esta configuración en forma de matriz agroforestal no solo contribuye a mejorar el

valor ecológico del paisaje, sino que también ayuda a mitigar los efectos negativos comúnmente asociados a los monocultivos de aguacate, promoviendo una producción más sostenible y ambientalmente equilibrada.

El aplicativo CuencApp desarrollado, en conjunto con el modelo hidrológico aplicado a escala de cuenca, representa una herramienta estratégica para la planificación sostenible del cultivo de aguacate Hass en Colombia. Al incorporar variables morfológicas como el Índice de Humedad Topográfico (TWI) y la pendiente, el modelo permite capturar con mayor precisión la variabilidad espacial de la disponibilidad hídrica en un contexto geográfico complejo como los Andes colombianos, especialmente en temporadas de baja precipitación. La simulación de escenarios de cambio de cobertura, como la conversión de bosque a cultivo de aguacate, evidencia que, aunque el aguacate no presenta grandes diferencias en las demandas hídricas en comparación con los bosques nativos, el cambio de cobertura respecto a los pastos puede mejorar el rendimiento hídrico en la cuenca debido a la regulación de caudales y la retención de humedad.

Al integrar la función de Budyko para estimar el balance hídrico, el aplicativo permite a agricultores, técnicos y planificadores evaluar el impacto del cambio de uso del suelo sobre la disponibilidad de agua y el almacenamiento de carbono. Su diseño intuitivo y la capacidad de simular múltiples escenarios lo convierten en una herramienta valiosa para apoyar la toma de decisiones orientadas a un desarrollo agrícola equilibrado, que combine productividad con sostenibilidad ambiental.

En conclusión, el cultivo de aguacate Hass en Colombia tiene un enorme potencial como motor de desarrollo económico y contribu-

yente a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, enfrenta retos que requieren un enfoque integral para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. El uso de herramientas como el aplicativo CuencApp permite equilibrar la producción agrícola con la conservación de los recursos hídricos, asegurando que el cultivo prospere de manera sostenible, beneficiando tanto a las comunidades rurales como a la biodiversidad y el ambiente. La implementación de estrategias sostenibles, el apoyo del gobierno y la participación activa de las comunidades locales son esenciales para asegurar un futuro próspero y sostenible para el cultivo de aguacate Hass en el país.

Agradecimientos especial

A los productores de aguacate Hass y actores institucionales y sectoriales que se sumaron a esta investigación, con la intención de aportar al desarrollo de herramientas y conocimiento que aporten a una producción de aguacate más sostenible.

Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-faoirrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9): D05109.
- Bernal, J. A. and C.A. Díaz. (Comps.). (2020). Actualización tecnológica y buenas prácticas agrícolas (BPA) en el cultivo de aguacate (2.ª Ed.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7403831>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N. G., & Zanne, A. E. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology letters*, 12(4), 351-366.

- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- CorpoHass. (2023). reporte elaborado por - CorpoHass - Corporación de Productores y Exportadores de Aguacate Hass de Colombia incluye datos de enero a diciembre de 2023. https://5718ce0e-4e2e-4759-af53-9bb45decfa88.usrfiles.com/ugd/5718ce_8b539d9f43e846aa80906f2cd5c3ecc9.pdf
- Cox, A. J., Hartley, I. P., Meir, P., Sitch, S., Dusenège, M. E., Restrepo, Z., ... & Mercado, L. M. (2023). Acclimation of photosynthetic capacity and foliar respiration in Andean tree species to temperature change. *New Phytologist*, 238(6), 2329-2344.
- Cox, A. J., González-Caro, S., Meir, P., Hartley, I. P., Restrepo, Z., Villegas, J. C., & Mercado, L. M. (2023). Variable thermal plasticity of leaf functional traits in Andean tropical montane forests. *Plant, Cell & Environment*.
- Dirk Nikolaus Karger, Adam M Wilson, Colin Mahony, Niklaus E Zimmermann, & Walter Jetz. (2021). Global daily 1 km land surface precipitation based on cloud cover-informed downscaling. *Scientific Data*, 8(1):307.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 436:35–50.
- Duque, A., Peña, M. A., Cuesta, F., González-Caro, S., Kennedy, P., Phillips, O. L., ... & Feeley, K. J. (2021). Mature Andean forests as globally important carbon sinks and future carbon refuges. *Nature communications*, 12(1), 2138.
- El Colombiano. (2024, enero 5). El 2023 marcó récord en exportaciones de aguacate Hass. <https://www.elcolombiano.com/negocios/el-2023-marco-record-en-exportaciones-de-aguacate-hass-CE23636466>
- Guoyi Zhou, Xiaohua Wei, Xiuzhi Chen, Ping Zhou, Xiaodong Liu, Yin Xiao, Ge Sun, David F Scott, Shuyidan Zhou, Liusheng Han, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature communications*, 6(1):5918, 2015.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), e0169748.
- Hijmans, R. J., Van Etten, J., Cheng, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J. A., ... & Hijmans, M. R. J. (2015). Package 'raster'. R package, 734, 473.
- Nemera, D. B., Bar-Tal, A., Levy, G. J., Lukyanov, V., Tarchitzky, J., Paudel, I., & Cohen, S. (2020). Mitigating negative effects of long-term treated wastewater application via soil and irrigation manipulations: Sap flow and water relations of avocado trees (*Persea americana* Mill.). *Agricultural water management*, 237, 106178.
- Ningrum, A., Setiawan, Y., & Tarigan, S. D. (2022). Annual water yield analysis with InVEST model in Tesso Nilo national park, Riau Province. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 950, No. 1, p. 012098). IOP Publishing.
- Pathak, S., Ojha, C. S. P., & Garg, R. D. (2021).

Applicability of the InVEST Model for Estimating Water Yield in Upper Ganga Basin. *The Ganga River Basin: A Hydrometeorological Approach*, 219-231.

Tallis, H., Mooney, H., Andelman, S., Balvanera, P., Cramer, W., Karp, D., ... & Walz, A. (2012). A global system for monitoring ecosystem service change. *Bioscience*, 62(11), 977-986

Xu, X., Liu, W., Scanlon, B. R., Zhang, L., & Pan, M. (2013). Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters*, 40(23), 6123-6129

Wu, Q., Brown, A. (2022). Whitebox: 'WhiteboxTools' R Frontend. R package version 2.2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=whitebox>

Yepes, A., Navarrete, D. A., Phillips, J. F., Duque, A. J., Cabrera, E., Galindo, G., ... & Ordoñez, M. F. (2011). Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el periodo 2005-2010. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM. Bogotá DC, Colombia, 3.

Cómo citar este artículo

Caro Holguín, A. F., Muñoz Rivera, A., Agudelo Otálvaro, J. I., Gutiérrez Lagoueyte, M. E., Silva Duque, A. H., Muñoz Ciro, É. y González Caro, S. (2025). Consumo de agua y captura de carbono del aguacate variedad Hass en los Andes colombianos. *Revista Ambiental ÉOLO*, 20, Crisis climática, desertificación y biodiversidad, pp. 225-248.

Sobre los autores

Andrés Felipe Caro Holguín

Ingeniero forestal, especialista en Gerencia de Proyectos y candidato a magíster en Bosques y Conservación Ambiental. Profe-

sional con experiencia en restauración ecológica, planificación y ejecución de proyectos ambientales y forestales, con énfasis en soluciones basadas en la naturaleza y articulación entre conservación, inversión ambiental y desarrollo territorial.

Correo: afcaroh@unal.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7022-7723>

Alejandra Muñoz Rivera

Ingeniera forestal, especialista en Gestión Ambiental y magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Directora ejecutiva de la Fundación Con Vida, con experiencia en el diseño, dirección, coordinación e implementación de proyectos de recuperación y protección del recurso hídrico, gestión participativa del aprovechamiento de recursos naturales, calidad del aire y gestión integral del riesgo climático. Ha participado en la formulación de proyectos forestales orientados a esquemas REDD, pagos por servicios ambientales y desarrollo de negocios verdes asociados al uso sostenible de la biodiversidad.

José Ignacio Agudelo Otálvaro

Ingeniero agrícola y magíster en Water and Environmental Resources Management por IHE-Delft (Países Bajos). Profesor asociado e investigador de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, adscrito a la Facultad de Ciencias Agropecuarias. Su trabajo se centra en la gestión integrada de los recursos hídricos, la planificación y manejo del agua y la articulación entre sistemas productivos, sostenibilidad ambiental y gestión territorial.

Correo: jiagudel@unalmed.edu.co

María Elena Gutiérrez Lagoueyte

Ingeniera ambiental, magíster en Biología de la Conservación y doctora en Ecología. Profesora e investigadora universitaria con más de trece años de experiencia académica. Directora del programa de Ingeniería

Ambiental de la Universidad EIA. Su trabajo investigativo se enfoca en ecología de la vegetación, cambio climático y ecohidrología, integrando investigación cuantitativa, docencia universitaria y gestión académica en temas de sostenibilidad ambiental y conservación de ecosistemas.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7984-3139>

Andrés Hernán Silva Duque

Ingeniero forestal y candidato a magíster en Bosques y Conservación Ambiental. Cuenta con experiencia en investigación ecológica y forestal, particularmente en el establecimiento y remediación de parcelas permanentes, cuantificación de biomasa aérea y carbono en suelos, y análisis de rasgos funcionales asociados al cambio climático. Ha participado como asistente de investigación en la Universidad Nacional de Colombia y la Fundación Jardín Botánico de Medellín, desarrollando trabajo de campo, análisis de datos y laboratorio en ecosistemas andinos, de alta montaña y amazónicos.

Édinson de Jesús Muñoz Ciro

Biólogo y magíster en Bosques y Conservación Ambiental. Cofundador y Director Estratégico de la Fundación Con Vida y Director de la Revista Ambiental ÉOLO. Fue representante de ONG ambientales ante el consejo directivo de Corantioquia y ex diputado de Antioquia (2011 -2014). Cuenta con una amplia trayectoria en gestión ambiental, incidencia política, gobernanza territorial y divulgación científica.

Correo: edinson.munoz@fconvida.org.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3635-3858>

Sebastián González Caro

Biólogo y doctor en Ecología. Investigador y profesor universitario con amplia trayectoria en ecología de bosques tropicales y andinos. Su trabajo se centra en la dinámica, estruc-

tura y diversidad funcional y filogenética de comunidades arbóreas, la biomasa y el carbono forestal, y las respuestas de los ecosistemas al cambio climático a lo largo de gradientes ambientales. Ha publicado extensamente en revistas científicas internacionales de alto impacto y participado en proyectos colaborativos nacionales e internacionales sobre monitoreo ecológico, conservación de bosques andinos y amazónicos y modelación ecológica.

Correo: sebastian.gonzalez.car@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2287-7431>



Roberto Palomino Torres