



CAPÍTULO 2

Fertilidad y requerimientos edáficos para aguacate Hass en el departamento del Cauca

Diana Lucía Correa Moreno
Luis Carlos Grajales Guzmán
Francisco José Sánchez Marín
Edinson Castillo López

Introducción

El aguacate cultivar (cv.) Hass se ha destacado en los últimos años como uno de los frutales más cultivados y distribuidos en el mundo, debido principalmente a su productividad, calidad nutricional y potencial agroindustrial, así como a la capacidad de adaptación de la especie a diversas condiciones ambientales (Bost et al., 2013; Crane et al., 2013). En este sentido, las plantaciones de este cultivar se han expandido, sobre todo, en tres zonas climáticas: 1) climas templados y semiáridos como en Israel, Perú y Chile; 2) climas subtropicales como en Sudáfrica, México y Australia, y 3) climas tropicales como en Brasil, Indonesia y Colombia (Wolstenholme, 2013).

La producción de aguacate cv. Hass en las diversas zonas climáticas registra una marcada diferencia en la expresión fisiológica y la productiva del cultivo establecido, por un lado, en zonas tropicales como Colombia y, por otro, en las zonas de producción ubicadas en regiones intertropicales y subtropicales, donde las condiciones de clima y suelo poseen mayor uniformidad, lo cual se refleja en un comportamiento productivo de la especie más estable (Ramírez-Gil et al., 2023; Wolstenholme, 2013). Esta respuesta diferencial está enmarcada sobre todo por la compleja interacción entre la especie y el ambiente tropical, que abarca diversos gradientes de clima y características del suelo, lo cual resalta la importancia de generar estrategias para el manejo del cultivo que estén adaptadas a condiciones tropicales, con un clima dinámico y heterogéneo, que difieren de las demás regiones de producción en el mundo (Ramírez-Gil et al., 2023).

En Colombia, el aguacate cv. Hass ha tenido una expansión del área cultivada considerable debido a la dinámica del mercado global de este frutal y a las condiciones agroclimáticas favorables para el desarrollo del cultivo (Quiceno-Rico et al., 2019). Las zonas de producción en el país se encuentran distribuidas en la región altoandina, donde predomina el régimen de lluvias bimodal, con dos periodos de lluvia alternado con épocas de bajas precipitaciones y variaciones de temperatura asociadas al gradiente altitudinal. En este escenario se ha logrado establecer que el comportamiento productivo del cultivar es influido por factores como la precipitación, la humedad relativa, la altitud y la temperatura del aire (Bernal-Estrada et al., 2020; Ramírez-Gil et al., 2023).

Con el fin de mejorar la productividad y la competitividad en las zonas productoras del departamento del Cauca estudiadas, el objetivo de este capítulo es generar el conocimiento necesario, en conjunto con la comunidad beneficiaria, sobre los requerimientos edáficos del cultivo de aguacate Hass, ajustados a las condiciones de los sistemas productivos de once municipios del departamento del Cauca, en función también de las condiciones que predisponen la fertilidad de los suelos de estas zonas de producción y de aquellas que limitan o favorecen la respuesta productiva y de calidad de la fruta del cultivar.

Metodología

Con el objetivo de establecer los requerimientos edáficos del cultivar y la capacidad que tienen los suelos estudiados para suplirlos, se analizó la información recopilada en campo sobre las características edáficas (químicas, físicas y biológicas) de acuerdo con la metodología de evaluación de tierras (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2013).

Caracterización edáfica en zonas productoras

El muestreo de suelos se realizó en los predios con cultivos de aguacate Hass pertenecientes a los productores que fueron identificados en la caracterización socioeconómica del proyecto. Específicamente, se ubicaron lugares en las unidades cartográficas de suelos representativas descritas en el capítulo anterior, de las cuales la unidad ACCi-M (Typic Hapludands) tiene la mayor extensión (57.333 ha), con distribución en las unidades de paisaje altiplanicie y lomerío (figura 2.1). El muestreo de suelos se realizó en 34 sistemas productivos localizados en los municipios de Cajibío, El Tambo, Morales, Piendamó, Popayán, Sotará y Timbío, ubicados en un rango altitudinal de entre 1.600 y 1.980 m s. n. m. Las unidades taxonómicas sobre las cuales se encuentran ubicados los sitios corresponden principalmente a Typic Hapludands, Typic Melanudands y Typic Humudepts (tabla 2.1).

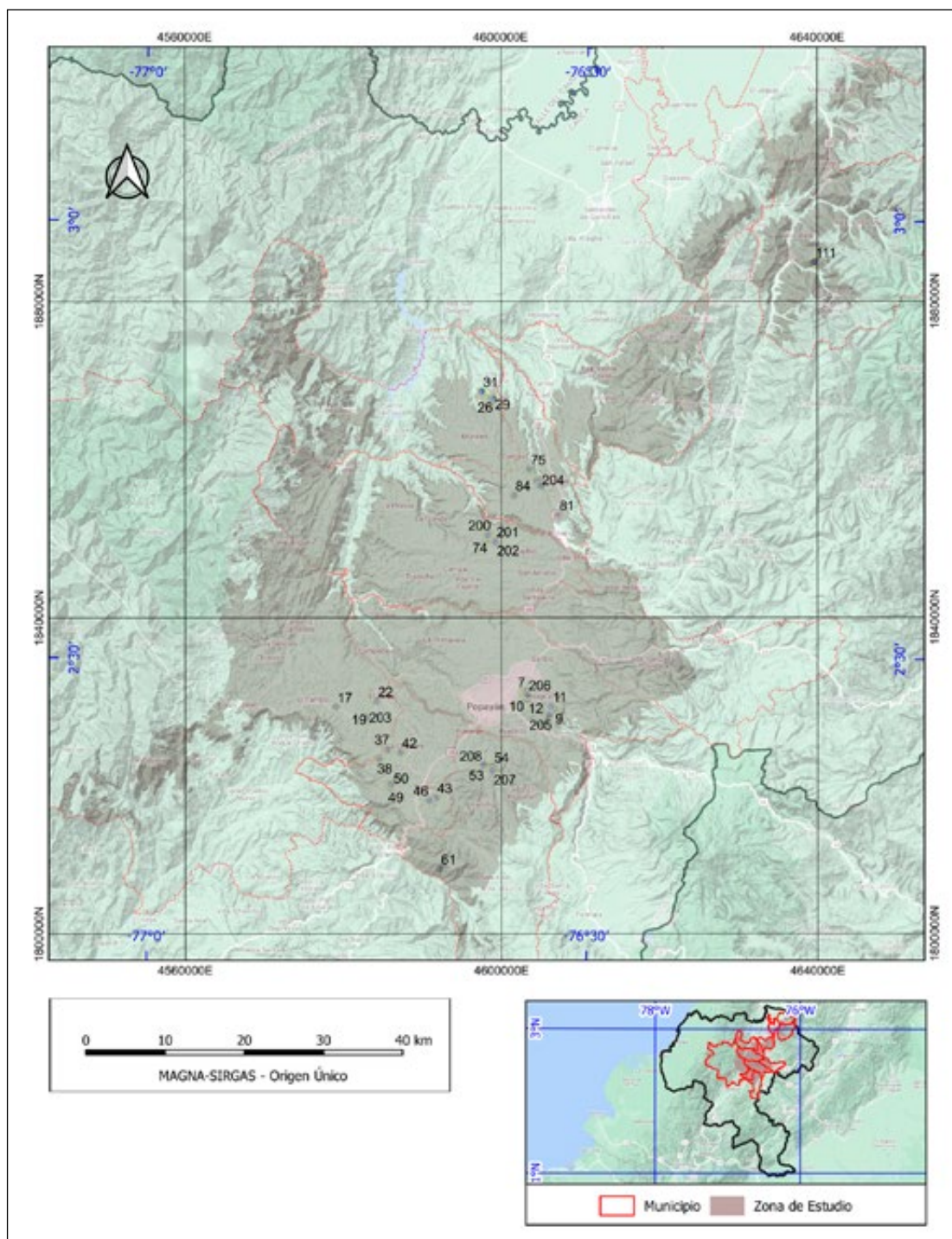
Tabla 2.1. Descripción de unidades de muestreo para analizar la fertilidad de suelos

Unidad cartográfica de suelos (UCS)	Perfil característico	Componente pedológico principal	N.º sitios muestreo	Ubicación sitios muestreo (m s. n. m.)
ACCi-M	FN-07	Typic Hapludands	8	1.600 – 1.800
AQEI-M	FN-12	Acrudoxic Melanudands	1	
ALLi-M	FN-02	Typic Hapludands	13	
LLLi-F	MC-209	Typic Hapludands	9	1.800 – 1.980
LLLi-M	FN-14	Acrudoxic Hapludands	1	
LLLm-F	SP-02	Typic Hapludands	1	
LVVd-M	SP-03	Melanudands Humudepts	1	

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la fertilidad química se tomaron muestras compuestas a 20 cm de profundidad y se evaluó contenido de carbono, pH, aluminio intercambiable, fósforo, bases intercambiables, elementos menores y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (figura 2.2).

Figura 2.1. Distribución de sitios de muestreo en zonas de cultivo de aguacate Hass. Los números corresponden al código de las fincas en el proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.2. Sitios de muestreo para determinar la fertilidad del suelo en áreas de producción de aguacate.



Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán

Para tomar las muestras disturbadas se elaboraron cajuelas de 50 cm x 50 cm x 50 cm y se emplearon cilindros a dos profundidades (0 cm – 15 cm; 15 cm – 30 cm). Con el material recolectado se analizaron las variables físicas relacionadas con el enraizamiento del cultivo y

el movimiento y almacenamiento de agua, como textura, densidad aparente y real, porosidad, conductividad hidráulica y coeficientes de humedad para estimar la capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y agua aprovechable (AA) (figura 2.3).

Figura 2.3. Muestreo de suelos en campo y procesamiento de muestras en laboratorio. a. Ubicación de puntos de muestreo; b. Colecta de muestra con barreno; c. Descripción de características del suelo; d. Colecta de muestras en cajuelas; e. Toma de muestras inalteradas para estimación de variables físicas; f. Procesamiento de muestras en laboratorio para análisis químicos.



Fotos: Harold Rodríguez, Edinson Castillo, Luis Carlos Grajales y Diana Lucía Correa Moreno.

Asimismo, con el propósito de establecer la relación entre la fertilidad del suelo y la productividad del cultivo, se tomaron muestras de frutos en cada huerto para analizar el contenido de nutrientes y estimar la capacidad de extracción del cultivo en las condiciones de los suelos evaluados.

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva y análisis multivariado para identificar los grupos con características similares y variables indicadoras de la fertilidad del suelo.

Validación de requerimientos edafoclimáticos de aguacate Hass en zonas productoras

La validación de requerimientos del cultivo se realizó con el fin de establecer las características de suelos y clima de la región que se perciben como de mayor influencia en la productividad del cultivo de aguacate Hass, considerando aspectos técnicos y la experiencia en campo de los productores. Específicamente, se utilizó la metodología descrita por Ríos-Gallego et al. (2013) para determinar y cualificar los principales requerimientos del cultivo en las actividades que se describen a continuación.

Revisión bibliográfica para documentar los principales requerimientos del cultivo

Se consolidó información secundaria sobre fisiología, desarrollo del cultivo y requerimientos edafoclimáticos en diferentes zonas de producción de aguacate Hass en el mundo y en el contexto nacional.

Esta revisión permitió establecer el comportamiento de la especie y la variedad en las regiones de origen (Barrientos & López, 1998) el desarrollo en áreas de cultivo en zonas templadas y tropicales de acuerdo con los registros disponibles sobre los departamentos del Eje Cafetero, y la respuesta del cultivo a prácticas de manejo

como la fertilización y el riego con base en investigaciones realizadas en Colombia (Dorado-Guerra et al., 2017; Rebolledo & Dorado, 2017; Quiceno et al., 2019; Bernal-Estrada et al., 2020; Ramírez-Gil et al., 2023).

Consulta a productores y expertos para determinar los requerimientos del cultivo en la región

Se consultó mediante encuestas a productores, técnicos y expertos cuáles son las principales características de clima y suelos que influyen en la productividad del cultivo en las zonas productoras del departamento y el país para establecerlas mediante consenso y priorización en escala 1 a 9.

Se utilizó estadística descriptiva para hacer la categorización general de las variables y establecer los rangos de requerimientos del cultivo ajustados a las condiciones de las zonas productoras en el departamento del Cauca, de tal manera que se pudieran definir las áreas aptas para el cultivo en las condiciones locales.

Validación del consolidado de requerimientos edafoclimáticos del cultivo de aguacate Hass

Mediante un ejercicio participativo se validó la información obtenida sobre los requerimientos del cultivo de aguacate Hass (Corpoica, 2015) en los municipios de Timbío, Tambo, Sotaró, Cajibío, Piendamó y Morales. Esto se complementó con una actividad práctica con agricultores para reconocer las características del suelo que influyen en el desarrollo del cultivo (figura 2.4).

Figura 2.4. Validación de información de requerimientos biofísicos del cultivo mediante ejercicio participativo en municipios de ejecución del proyecto. a. Presentación de requerimientos biofísicos priorizados; b. Selección de variables y rangos óptimos; c. Ejercicio práctico para reconocer las propiedades del suelo; d. Estimación de textura al tacto; e. Identificación de rangos de pH y fertilidad en ejercicio teórico; f. Día de campo con grupo de productores de aguacate Hass.



Fotos: Lina Garavito, Luis Carlos Grajales Guzmán y Diana Lucía Correa Moreno.

Fertilidad de suelos en zonas productoras de aguacate Hass en el departamento del Cauca

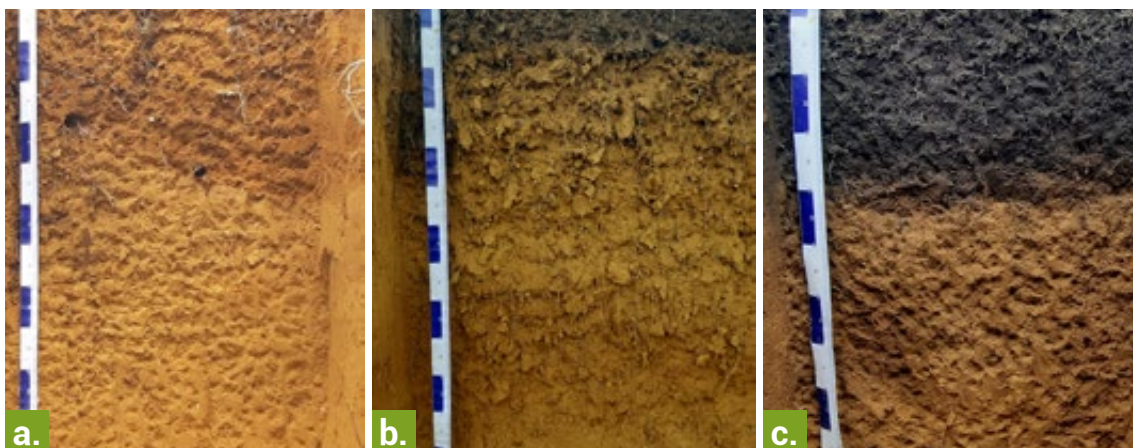
La fertilidad del suelo es el resultado de la interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como de la influencia de prácticas de manejo que condicionan el ciclaje y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Además de considerar la capacidad del suelo para suministrar elementos esenciales, la fertilidad está relacionada con las condiciones necesarias para que las plantas se desarrollen de manera adecuada, como la humedad, profundidad efectiva, aireación, drenaje, contenido de materiales orgánicos y carbono, entre otros (Lemus et al., 2010). Por tal razón, es importante identificar y manejar los factores que pueden limitar o favorecer la nutrición y, por ende, la productividad y sostenibilidad de los cultivos.

En zonas productoras de aguacate Hass en el departamento del Cauca, las características que determinan la fertilidad del suelo están influidas principalmente por el clima, el relieve y el material parental. Gran parte de los sitios analizados corresponden a suelos del orden Andisol, derivados de cenizas volcánicas predominantes en la región, las cuales confieren características particulares en cuanto a sus propiedades y determinan su potencial para las actividades productivas (figura 2.5).

Al respecto, algunos autores manifiestan que la presencia de materiales no cristalinos o cenizas volcánicas y humus en los andisoles genera propiedades químicas y físicas particulares, como predominio de carga variable, alta capacidad de retención de agua, alta retención de fosfatos, baja densidad aparente, alta friabilidad y formación de agregados de suelos estables (Dahlgren et al., 2004; Sánchez & Rubiano, 2015).

Figura 2.5. Aspecto de perfiles de suelos característicos en sistemas de producción de aguacate Hass distribuidos sobre unidades cartográficas predominantes en la zona. a. ACCi_M_Typic Hapludands (FN-07); b. ALLi_M_Typic Hapludands (FN-02); c. LLLi_M_Acrudoxic Hapludands (FN-14).



Fuente: Elaboración propia

En este apartado se describen algunas características de los principales suelos donde están las mayores áreas de producción de aguacate, pues estas pueden influir en el rendimiento, la calidad de la fruta y la productividad del cultivo en la región.

Fertilidad química

La fertilidad química es la capacidad que tiene el suelo de suministrar los nutrientes, en las cantidades requeridas y en las proporciones adecuadas, para permitir el crecimiento y la producción de los cultivos, sin que se presenten limitantes por disponibilidad o por exceso y toxicidad. Entre las propiedades químicas del suelo que tienen mayor influencia en la disponibilidad de los nutrientes, así como en la eficiencia del uso de fertilizantes y correctivos aplicados al suelo, se encuentran la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH, que determina el grado de acidez o alcalinidad del suelo.

En términos generales, en las zonas de cultivo se observan suelos con una tendencia a niveles de acidez que pueden ser limitantes

para el desarrollo de las plantas, dado que se afecta la disponibilidad de nutrientes indispensables para procesos como la floración y fructificación en aguacate Hass (figura 2.6). En las condiciones evaluadas, el pH se encuentra entre 4,9 y 5,8, fluctuando de muy fuertemente ácido a moderadamente ácido, rango que se encuentra por debajo del óptimo para el desarrollo de aguacate Hass (tabla 2.2).

En esta condición, los suelos presentan baja disponibilidad de bases intercambiables y, en consecuencia, se afecta la CIC, que determina la fertilidad actual del suelo (figura 2.6 y tabla 2.2). En este sentido, elementos como el calcio (Ca) favorecen el aumento del pH a medida que se incrementa su contenido en el suelo, bien sea por disponibilidad natural o por aplicación de enmiendas cálcicas aportadas en el cultivo, tal como indica la relación entre estas variables ($r = 0,35$; $p < 0,05$).

De esta forma, se encuentra que el contenido de bases como el Ca puede fluctuar entre 0,4 y 8,2 centimoles por kilogramo (cmol/kg), con un promedio de 2,1, que lo cataloga como bajo; el magnesio (Mg) fluctúa entre 0,19 y 2,0 cmol/kg, con un promedio de 0,6, considerado bajo para este elemento, y el potasio (K) fluctúa entre 0,1 y 0,9 cmol/mg, considerado entre muy bajo a alto en algunos sitios, y con un promedio de 0,3, siendo bajo para los suelos evaluados (tabla 2.2).

Tabla 2.2. Valores de las características químicas evaluadas en cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca

Variables químicas	Rango				Promedio	
pH	4,95	MFA	5,85	MdA	5,3	FA
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,1	MB	0,95	B	0,32	B
Fósforo (P) (mg/kg)	1,29	MB	8,71	B	3,71	MB
CICE (cmol (+)/kg)	1,39	MB	11,07	M	4,18	MB
Calcio (Ca) (cmol (+)/kg)	0,48	B	8,29	A	2,15	B
Magnesio (Mg) (cmol (+)/kg)	0,19	MB	2,02	M	0,67	B

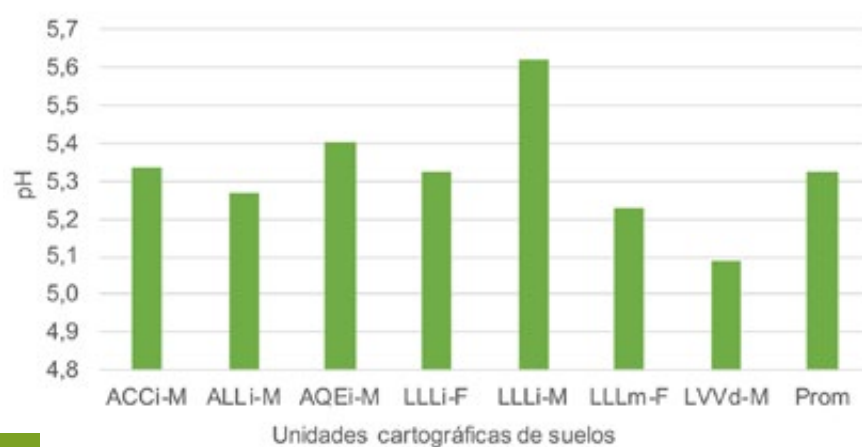
Variables químicas	Rango				Promedio	
Potasio (K) (cmol (+)/kg)	0,11	MB	0,96	A	0,38	MB
Azufre (S) (mg/kg)	2,06	B	28,79	A	12,02	M
Boro (B) (mg/kg)	0,01	MB	0,96	A	0,12	MB
Manganeso (Mn) (mg/kg)	1,13	B	17,01	A	6,31	M
Cobre (Cu) (mg/kg)	1	MB	4,35	A	2,46	M
Zinc (Z) (mg/kg)	1	MB	5,22	M	1,82	MB
Hierro (Fe) (mg/kg)	76,38	M	241,68	A	116,6	A
Materia orgánica (g/100g)	4,36	B	23,1	A	14,14	A
Carbono total (g/100g)	2,56	M	16,61	MA	10,13	MA
Carbono orgánico (g/100g)	2,53	---	13,4	---	8,07	---
Nitrógeno total (g/100g)	0,22	---	1,22	---	0,63	---
Relación C : N	9,56	---	28,33	---	13,33	---

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; MFA: Muy fuertemente ácido; MdA: Moderadamente ácido; FA: Fuertemente ácido; MB: Muy bajo; B: Bajo; M: Medio; A: Alto; MA: Muy alto

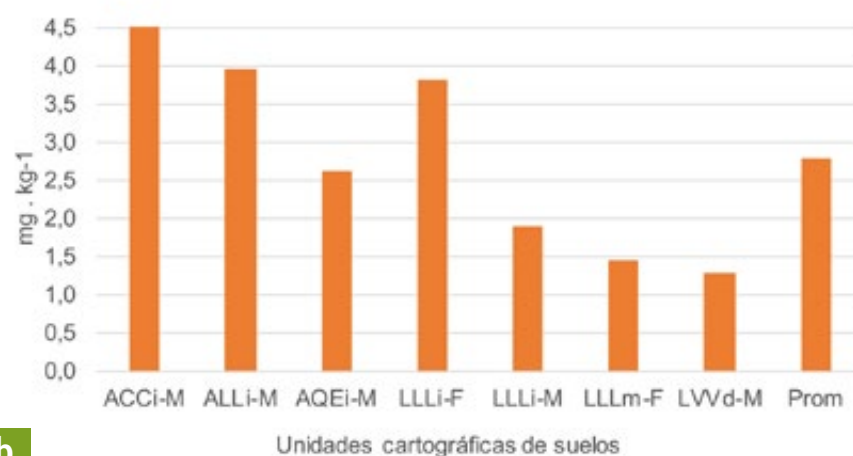
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1995).

En cuanto a las unidades de suelos predominantes, se observa un comportamiento $Ca > Mg > K$, lo cual puede atribuirse a una disminución de la acidez intercambiable por actividades como el encalado en el cultivo. Asimismo, se presentan ligeramente mayores contenidos de cationes intercambiables como Mg y K en la unidad LLLi-F, respecto al contenido en las unidades ubicadas en altiplanicie (ACCi-M y ALLi-M) (figura 2.6). En contraste, en la unidad LVVd-M se presentaron contenidos bajos de bases intercambiables y micronutrientes como boro (B) y zinc (Zn) relacionados con el bajo pH (5,0, muy fuertemente ácido). Sin embargo, aunque se ajustan a la generalidad de la zona, estos resultados no resultan concluyentes respecto a condiciones particulares de las unidades de suelos en condiciones de lomerío, por comprender un número muy bajo de cultivos para evaluación (figura 2.6).

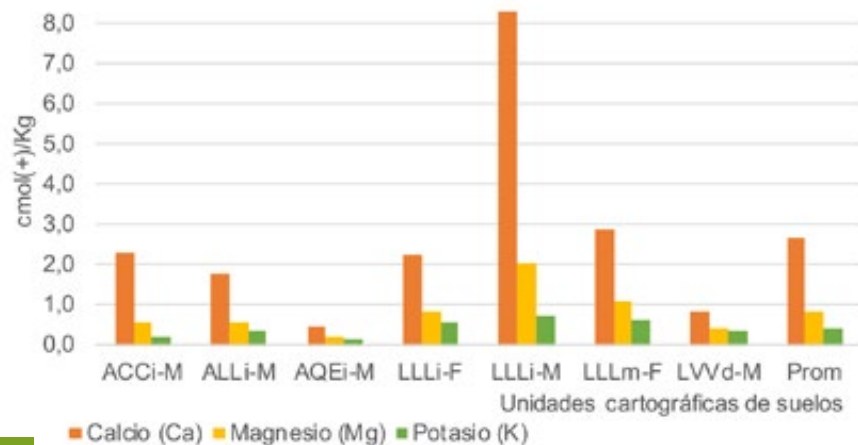
Figura 2.6. Comportamiento de las variables químicas en las unidades de suelos con cultivos de aguacate Hass que fueron evaluadas. a. Nivel de PH; b. Contenido de fósforo; c. Contenido de bases intercambiables; d. Contenido de micronutrientes.



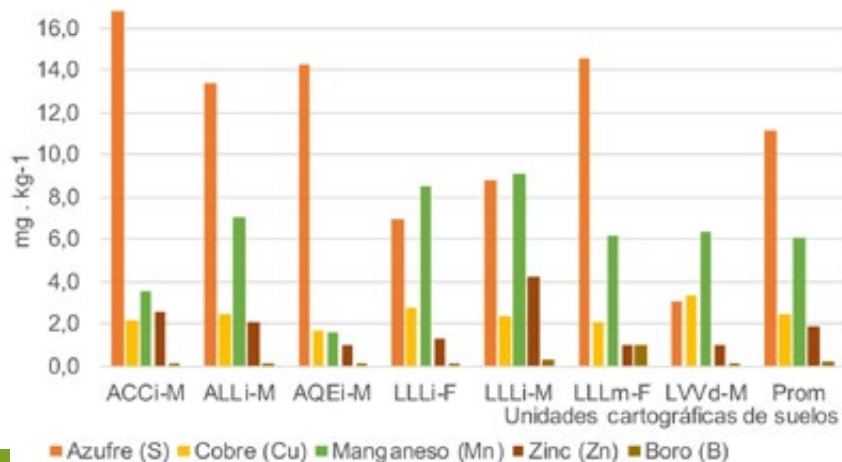
a.



b.



c.



d.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con este comportamiento, se considera que existe alta respuesta por parte de los suelos de la región a la aplicación de enmiendas para mejorar el pH y la fertilidad, lo cual debe considerarse en los planes de manejo del suelo con miras a aumentar la productividad del cultivo de aguacate Hass. Esto se atribuye, además, a la alta correlación ($p < 0,05$) que se presenta entre la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), con bases

intercambiables como Ca ($r = 0,90$), Mg ($r = 0,90$) y K ($r = 0,56$), las cuales se presentan en contenidos bajos en la región, y en consecuencia reflejan poca fertilidad de los suelos sobre los cuales se encuentran los cultivos de aguacate Hass (figura 2.7).

Como factor crítico para el cultivo y otras actividades agropecuarias en la zona se reportan los rangos para fósforo (P). Los valores estimados están por encima de $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, catalogados como bajos, dada la alta retención de P que se presenta en suelos derivados de cenizas volcánicas, y un grado de acidez que limita su disponibilidad para las plantas, en razón de su abundante contenido de aluminio y hierro activo (tabla 2.2 y figura 2.6).

De acuerdo con la posición de las unidades cartográficas, se observan menores contenidos de P, que fluctúa entre 1,2 y $1,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para las posiciones de lomerío, respecto a las ubicadas en altiplanicie, en donde fluctúa entre 2,6 y $4,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, considerado aún muy bajo para ambas situaciones (figura 2.6).

De acuerdo con las características químicas encontradas, se identificaron siete grupos de fincas con propiedades similares, los cuales permitieron definir zonas diferenciales de aptitud química y recomendaciones de manejo.

En los suelos con cultivos de aguacate Hass es evidente el predominio del azufre (S) respecto a boro (B), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu), mientras que los valores de hierro (Fe) se encuentran en rangos considerados muy altos, lo cual se atribuye a los complejos de hierro que se forman

con un pH ácido. Para las condiciones evaluadas, se confirma esta tendencia dada la correlación ($p < 0,05$) entre el pH y las variables Fe ($r = -0,49$) y Mn ($r = -0,41$), elementos que aumentan su disponibilidad en el suelo a pH bajo.

Dependiendo del material de origen, el contenido y la disponibilidad de microelementos en la región sigue la relación $S > Mn > Cu > Zn > B$, con valores desde muy bajos a medios. El S fluctúa entre 2,0 y $28,7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, considerado entre bajo a alto, con un

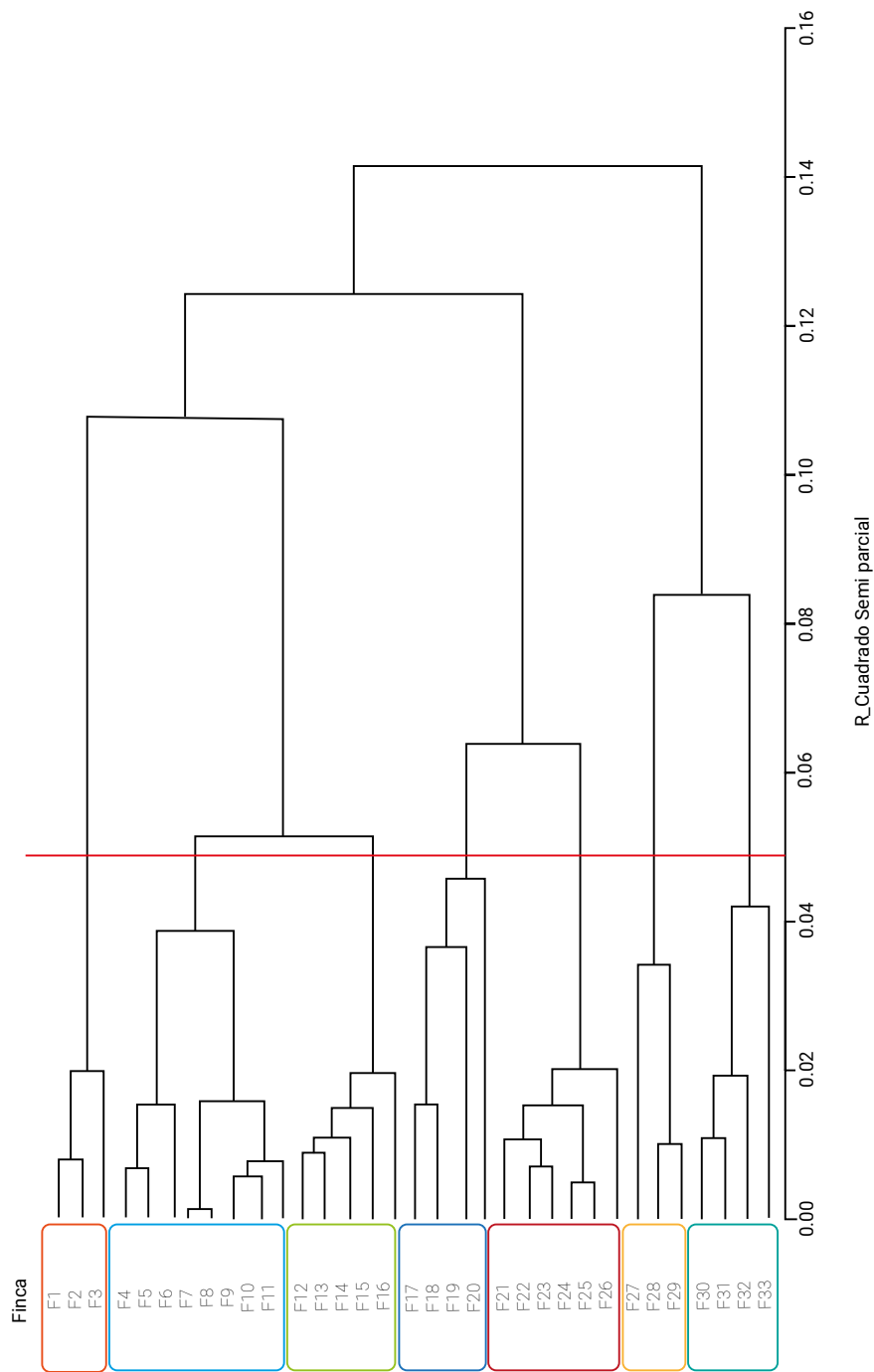
promedio de 12,0, que se clasifica como medio para suelos de la zona; el B y el Zn alcanzan contenidos muy bajos, con promedios de 0,1 y 1,8 mg.kg⁻¹, respectivamente, mientras que los valores de Mn y Cu se encuentran en contenidos medios, con valores de 6,3 y 2,4 mg . kg⁻¹, respectivamente (figura 2.6 y tabla 2.2).

De acuerdo con estas características químicas, se identificaron siete grupos de fincas con propiedades similares, los cuales permitieron definir zonas diferenciales de aptitud química y recomendaciones de manejo (figura 2.7). Específicamente, las variables que determinan la diferenciación de los sitios son las bases intercambiables y los microelementos, pues estos aspectos pueden ser críticos para la fertilidad actual si entre las prácticas de cultivo no se procura el mejoramiento de la acidez, representada en pH bajos y asociada a factores de formación del suelo, como el material parental, y a complejos de aluminio y materia orgánica que favorecen esa tendencia a la acidez (figuras 2.7 y 2.8).

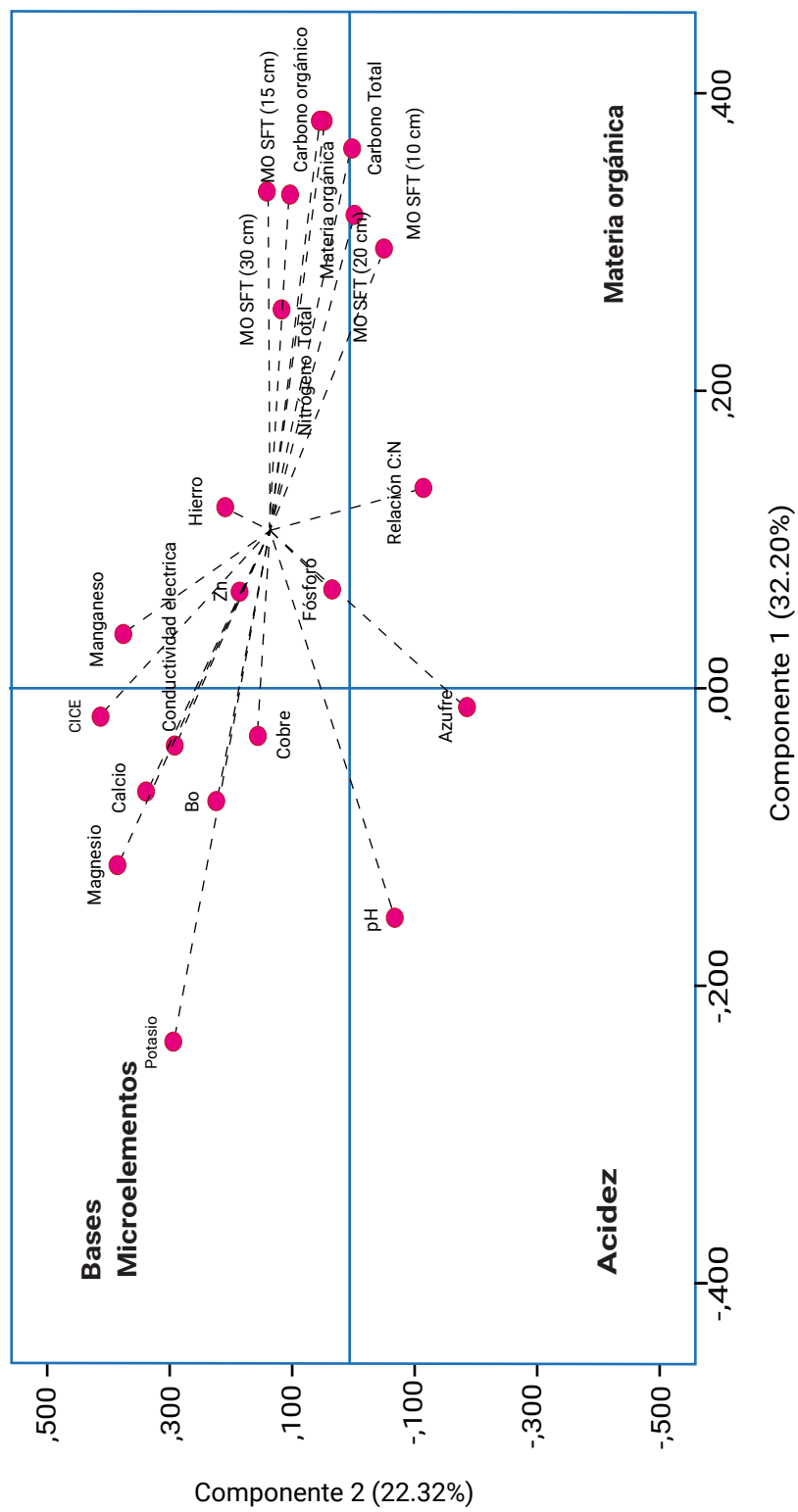


Figura 2.7. Análisis clúster para diferenciar los sitios evaluados según las variables químicas. a. Dendograma de grupos de cultivos con características similares; b. Componentes principales de variables que diferencian grupos.

a.



b.



Fuente: Elaboración propia.

Fertilidad biológica

La fertilidad biológica hace referencia al conjunto de características o propiedades del suelo que resultan de la actividad de macro- y microorganismos, la cual favorece la disponibilidad de nutrientes y el ambiente físico para que las plantas se desarrollen. Específicamente, la mineralización de la materia orgánica (MO), que constituye el principal proceso bioquímico que ocurre en el suelo, consiste en que la actividad de los organismos presentes en el suelo libera los nutrientes que están contenidos en los materiales orgánicos depositados en el terreno. Por lo tanto, el contenido de MO y C en el suelo constituyen los principales indicadores de esta fertilidad.

En las condiciones evaluadas, los contenidos de (MO) y C del suelo presentan comportamiento característico de suelos de montaña derivados de cenizas volcánicas, en los cuales el clima y el material parental determinan la acumulación y la mineralización de MO en el suelo.

De acuerdo con esto, se observó que la fracción orgánica tiene contenidos que fluctúan entre 4,3 % y 23,1 %, con un promedio de 14,1 %, considerado alto para condiciones de clima frío. Este comportamiento se refleja además en el nivel de carbono total (CT), que alcanza valores promedios de 10,1 %, catalogado como muy alto, mientras que el carbono orgánico (CO) que se concentra en el suelo representa el 80 % de la fracción orgánica, con valores promedio de 8 % (tabla 2.3).

Por su parte, el contenido de CO en las diferentes unidades de suelos se considera alto. El valor más alto se registra en la unidad LVVd-M (10 %), seguido de las unidades de mayor cobertura ACCi-M (8,7 %) y ALLi-M (8,8 %). Asimismo, el nitrógeno total (NT), con un promedio de



0,63 %, fluctúa entre 0,2 % y 1,2 %, presentándose mayor disponibilidad en la unidad LVVd-M (0,86 %), seguida de la unidad AQEi-M (0,83 %), mientras que la unidad de suelos con menor disponibilidad de NT corresponde a LLLm-F (0,53 %) (figura 2.8).

Tabla 2.3. Valores de materia orgánica, carbono y nitrógeno evaluados en cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca

Variables	Rango				Promedio	
Materia orgánica	4,4 %	M	23,1 %	A	14,1 %	A
Carbono total	2,6 %	M	16,6 %	MA	10,1 %	MA
Carbono orgánico	2,5 %	M	13,4 %	MA	8,1 %	A
Nitrógeno total	0,2 %	M	1,2 %	MA	0,6 %	MA
Relación C : N	9,6 %	A	28,3 %	MA	13,3 %	A

B: bajo; M: medio; A: alto; MA: muy alto.

Fuente: IGAV (1995).

La relación carbono/nitrógeno (C / N), indicadora de la tasa de mineralización de la MO, permite estimar que en gran parte de los suelos evaluados se presenta una tasa que se sitúa en el rango 8,5 % – 11,5 %, estimado alto para un suelo cuando hay una compensación entre el N liberado al suelo y su contenido de carbono. Valores por encima de este rango indican que existe una acumulación de carbono como fuente energética que no ha sido asimilada por los microorganismos por su baja actividad y que, en consecuencia, hay poco nitrógeno disponible en el suelo en formas asimilables por la planta; en este rango se encuentran las unidades de suelos ACCi-M (15,1 %) y ALLi-M (15,6 %) (figura 2.8).

Figura 2.8. Comportamiento de variables orgánicas en unidades de suelos evaluadas en cultivos de aguacate Hass. a. Contenido de materia orgánica; b. Distribución de contenidos de carbono y nitrógeno; c. Relación carbono / nitrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Algunos autores reportan que la tasa de acumulación y mineralización de MO en suelos de origen volcánico como los encontrados depende también de la disponibilidad de compuestos de minerales amorfos (Sadeghian, 2007; Sánchez & Rubiano, 2015). Estos materiales, mediante complejos con aluminio, estabilizan la MO y la protegen de la acción microbiana, razón por la cual se encuentran altos contenidos en el suelo. Se debe tener en cuenta que la formación masiva de complejos órgano-minerales amorfos es independiente de la vegetación y está regida exclusivamente por el clima y el material mineral.

Como un efecto directo de la actividad microbiana en el suelo, los contenidos de MO presentan correlación positiva entre el CO (0,98 %), CT (0,88 %) y el NT ($r = 0,64$), que aumentan sus contenidos a partir de aportes orgánicos y procesos de mineralización con influencia directa del clima predominante. Por el contrario, el K presentó correlación inversa con la MO ($r = -0,38$).

Sin embargo, Jaramillo (1999) manifiesta que los altos contenidos de MO en suelos derivados de cenizas volcánicas no garantizan un suministro adecuado de los nutrimentos almacenados, debido a que su mineralización es supremamente lenta y la mayor parte de ella se encuentra como MO fresca o muy poco alterada.

Las variables de tipo orgánico en las diferentes profundidades evaluadas hacen una contribución importante para la agrupación de fincas con características similares (figura 2.7). Además, estas variables se diferencian claramente de aquellas asociadas a la fertilidad química del suelo, como los macro- y micronutrientes disponibles, y de variables relacionadas con la acidez característica de estos suelos.

Fertilidad física

La fertilidad física está relacionada con las propiedades del suelo que proporcionan un ambiente propicio para el soporte y la nutrición de las plantas. Estas propiedades favorecen la oxigenación y aireación del suelo, el movimiento y acumulación de agua, la disponibilidad y movilidad de nutrientes, y el desarrollo y anclaje de raíces.

Entre estas propiedades se encuentra la textura o proporción de partículas, la estructura, la densidad, la porosidad, la conductividad hidráulica y la retención de humedad. En conjunto, se debe buscar que estas características tengan una proporcionalidad adecuada en el suelo, para garantizar que se realicen procesos químicos y biológicos que influyen en la nutrición y el desarrollo de cultivos como el aguacate Hass.

A partir de la caracterización física se estableció que, en general, en la zona de estudio existen factores que condicionan la acumulación de humedad y el movimiento de agua en el suelo, así como la susceptibilidad del suelo a sufrir procesos de degradación como la erosión.

En estas condiciones, la fracción mineral predominante corresponde a las arenas, seguida de la fracción limo y arcillas, siguiendo la tendencia arena (A) (57 %) > Limo (L) (34,1 %) > arcilla (Ar) (8,8 %). Las arenas fluctúan entre 47 % y 64,7 %, de 0 cm a 15 cm, y entre 45,6 % y 71,8 %, de 15 cm a 30 cm. La fracción limo alcanza valores entre 27,6 % y 42,8 %, de 0 cm a 15 cm, y entre 21,5 % y 43,8 %, de 15 cm a 30 cm. Valores menores de la fracción arcilla en estos suelos fluctúan entre 5,8 % y 16,9 %, de 0 cm a 15 cm, y entre 4,9 % y 14,7 %, de 15 cm a 30 cm. Para las fracciones limo y arcilla se observa en promedio un contenido ligeramente mayor en los primeros 15 cm superficiales (tabla 2.4).

La proporción de partículas se asocia a las clases texturales franco (F) y franco arenosa (FA), de amplia distribución en la zona de

estudio, lo cual confiere características particulares a los suelos asociados (figura 2.9 y tabla 2.4).

Tabla 2.4. Características físicas evaluadas en cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca

Variables físicas		Profundidad 0 cm - 15 cm			Profundidad 15 cm - 30 cm		
		Rango		Promedio	Rango		Promedio
Arena	%	47,0	64,7	55,8	45,6	71,8	58,3
Arcilla	%	5,8	16,9	9,6	4,9	14,7	8,1
Limo	%	27,6	42,8	34,6	21,5	43,8	33,6
Densidad aparente	(g/cm ³)	0,5	1,0	0,7	0,5	1,0	0,7
Densidad real	(g/cm ³)	1,9	2,3	2,1	2,0	2,4	2,2
Retención humedad (0,3 bar)	%	42,4	56,2	49,8	45,7	57,2	50,8
Retención humedad (15,0 bar)	%	37,1	53,1	45,4	42,0	53,9	46,9
Agua aprovechable	%	5,3	3,1	4,4	3,6	3,3	3,8
Conductividad hidráulica	(cm/h)	0,3	33,5	10,6	0,5	25,1	8,4
Macroporos	%	18,4	33,6	24,8	13,7	34,8	24,8
Mesoporos	%	3,1	7,0	4,4	2,8	4,9	3,8
Microporos	%	37,1	53,1	45,4	42,0	53,9	46,9
Porosidad total	%	69,4	79,0	74,7	70,5	81,2	75,6

Fuente: Elaboración propia.

Como rasgo característico de suelos del orden Andisol, las áreas de cultivo presentan densidad real (D_r) por debajo de 2,4 g/cm³, fluctuando entre 1,9 y 2,3 g/cm³, en profundidad de 0 cm a 15 cm, y entre 2,0 y 2,4 g/cm³, en profundidad de 15 cm a 30 cm. Asimismo, el comportamiento de la densidad aparente (D_a) obedece a un rasgo típico de esta clase de suelos, con valores que fluctúan entre 0,5 y 1 g/cm³ en ambas profundidades de evaluación.

Como indicadores de procesos de degradación del suelo, los valores observados reflejan la fragilidad y susceptibilidad que pueden presentar estos suelos a procesos de degradación por adensamiento,

compactación y erosión si no se aplican medidas de conservación para el desarrollo de actividades agropecuarias.

En este sentido, reconocer las características intrínsecas de cada tipo de suelo permite detectar alteraciones que pueden conducir a su degradación. Específicamente, en el grupo de suelos evaluados, los menores valores para D_a y D_r en la profundidad de 0 cm a 15 cm se presentan en las unidades AQEi-M (0,50 y 1,94 g/cm³, respectivamente) y LLLm-F (0,60 y 1,91 g/cm³), mientras que los mayores valores se encontraron en las unidades LLLi-F (0,71 y 2,12 g/cm³) y ALLi-M (0,70 y 2,15 g/cm³). En términos generales,

Reconocer las características intrínsecas de cada tipo de suelo permite detectar alteraciones que pueden conducir a su degradación.

en la profundidad de 0 cm a 30 cm fluctúan valores para D_a entre 0,60 y 0,73 g/cm³, y para D_r entre 2,14 y 2,19 g/cm³ (figura 2.9), encontrando los mayores valores para las unidades de suelos LLLm-F y ACCi-M.

Estas propiedades, además, determinan el volumen y la distribución del espacio poroso, el cual fluctúa entre 74,2 % y 75,8 % en promedio para cada profundidad. La distribución de poros sigue la relación microporos (46,5 %) > macroporos (25,1 %) > mesoporos (4,4 %), lo cual condiciona procesos de oxigenación, y acumulación y movimiento de agua en el suelo, dada la predominancia de microporos en estos suelos (tabla 2.4).

La unidad de suelos con mayor porosidad total entre 0 cm y 30 cm corresponde a AQEi-M (79 %) como consecuencia de la D_a baja encontrada en estas condiciones. Por el contrario, sin considerarse limitante para las plantas, la menor porosidad se registra en la unidad LVVd-M (69 %) (figura 2.9).

En relación con la clase textural, los suelos evaluados presentan alta retención de humedad: a capacidad de campo (CC) (0,3 bar) se encontró un rango de entre 42,3 % y 57,2 %, mientras que para punto de marchitez permanente (PMP) (0,15 bar) fluctúa entre

37 % y 53,9 %. Para ambas condiciones de humedad es mayor en la profundidad de 15 cm a 30 cm (tabla 2.4).

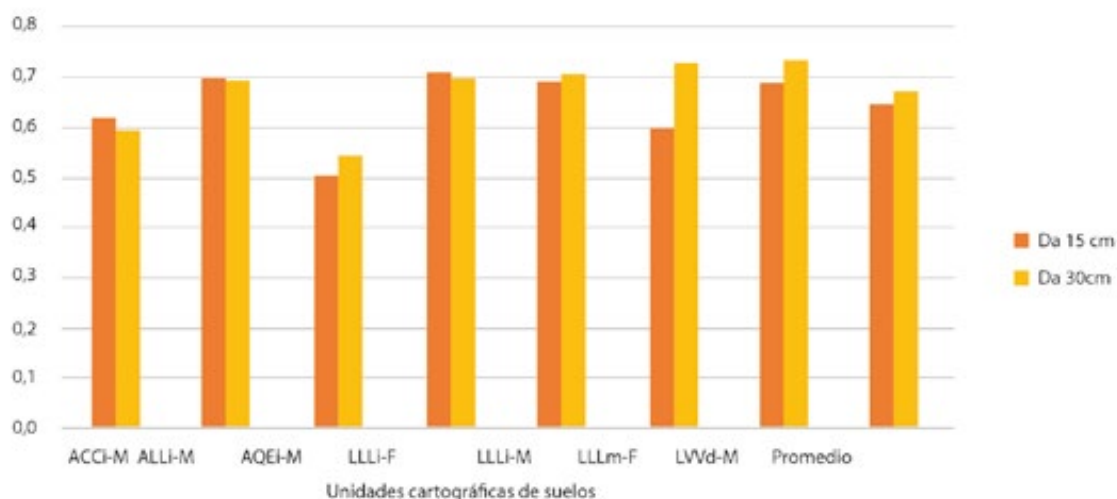
De acuerdo con la diferencia en estas dos condiciones de humedad, se hallaron bajos porcentajes de agua aprovechable (AA), que en promedio no superan el 5 %, y que en consecuencia constituye una limitante para la disponibilidad de agua para los cultivos en la región (tabla 2.4). Se observan valores ligeramente mayores en los primeros 15 cm (4,51 %), a diferencia de la profundidad de 15 cm a 30 cm, con un promedio de 3,91 %, lo cual permite inferir el papel que tiene la MO en la retención de humedad y la disponibilidad de agua para las plantas en la capa superficial del suelo.

En este sentido, la porosidad cumple una función importante, pues aunque se encuentra en un rango de entre 69,4 % y 81,2 %, permitiría que el agua pueda moverse fácilmente a través del drenaje natural. Sin embargo, la distribución de la porosidad indica que gran parte es retenida en los microporos, en los cuales no queda agua fácilmente disponible para que las raíces de la planta la tomen (figura 2.9 y tabla 2.4).

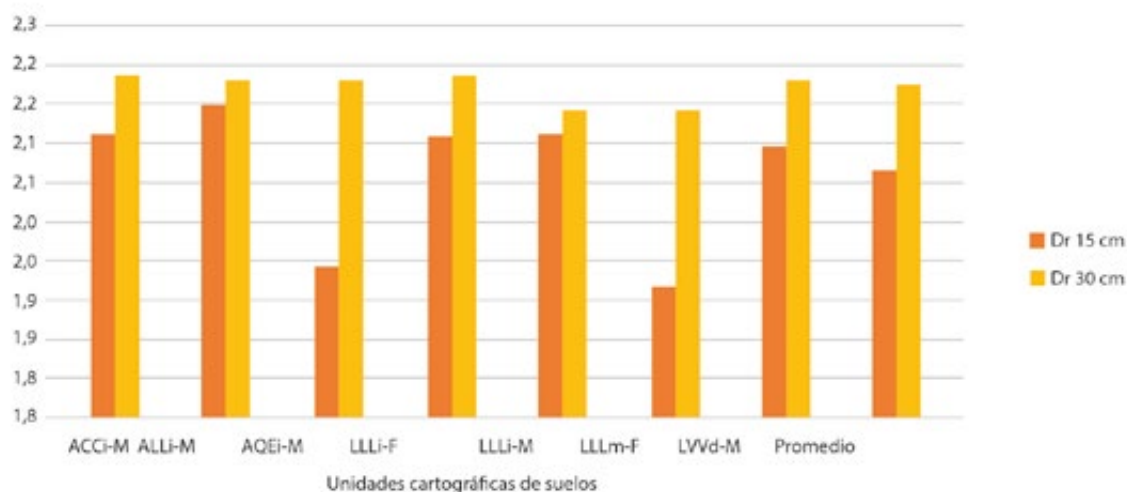
Las unidades de suelo que presentan mayor porcentaje de agua aprovechable corresponden a LLLm-F y LLLi-M para profundidades de 0 cm a 15 cm y 15 cm a 30 cm, respectivamente. Mientras que los suelos sobre la unidad LVVd-M y AQEi-M tienen bajos porcentajes de agua aprovechable en ambos estratos evaluados. Sin embargo, se encontró que las unidades de mayor distribución en zonas productoras (ACCi-M y ALLi-M) evidencian porcentajes en promedio de 4,58 % y 3,82 % para las dos profundidades, lo cual ratifica la necesidad de implementar estrategias a largo plazo para favorecer los procesos de acumulación y disponibilidad de agua para los cultivos.

La conductividad hidráulica, que indica el movimiento de agua a través del perfil del suelo, se categoriza entre moderadamente alta a alta, en relación con el tipo de textura predominante, situación que se considera positiva en términos de drenaje del suelo.

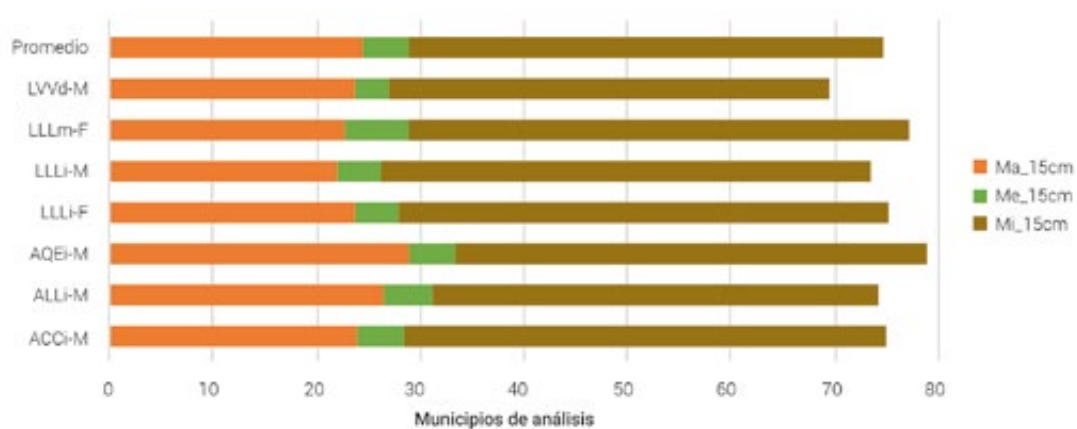
Figura 2.9. Comportamiento de variables físicas en unidades de suelos evaluadas en cultivos de aguacate Hass. a. Densidad aparente; b. Densidad real; c y d. Distribución de poros; e y f. coeficientes de humedad.



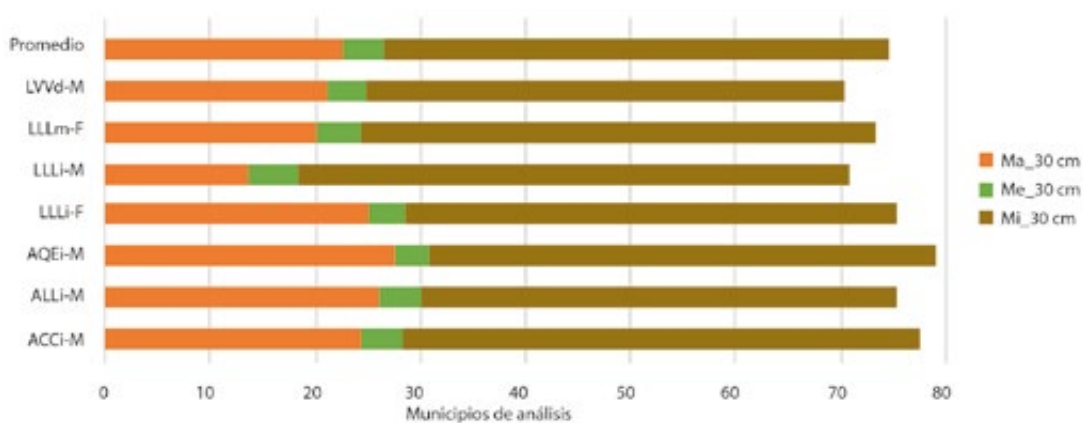
a.



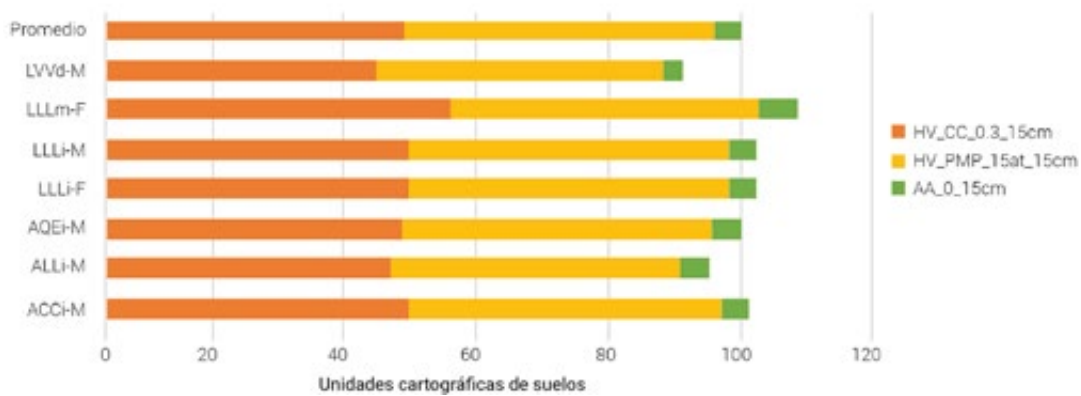
b.



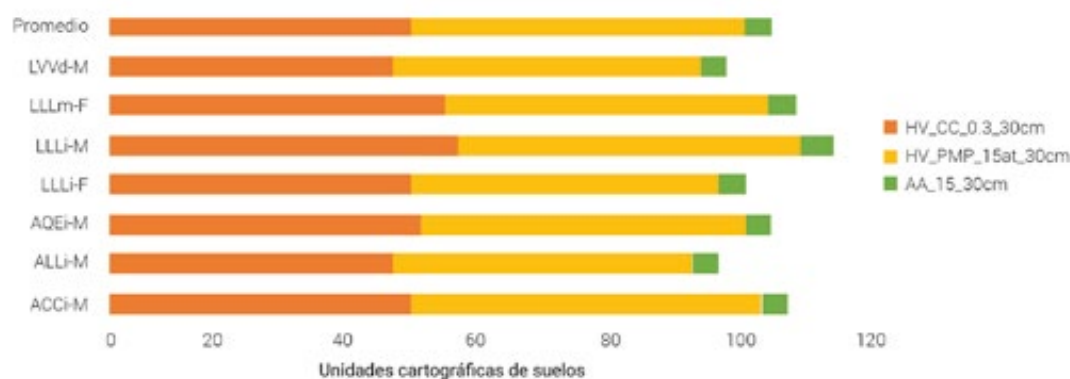
c.



d.



e.



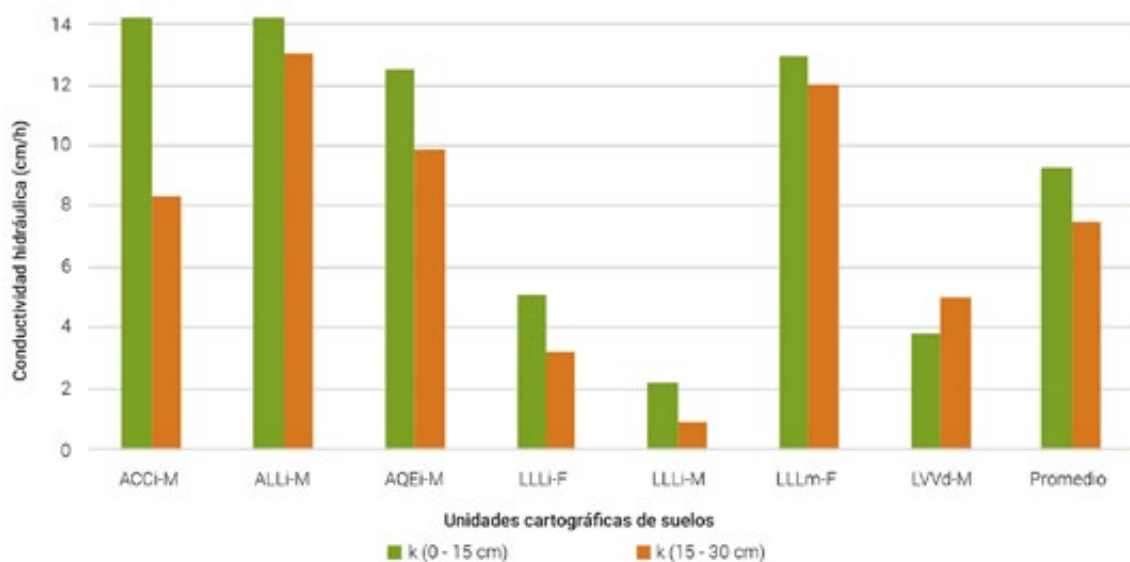
f.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, la alta tasa de movimiento en el perfil del suelo disminuye la capacidad de retención de humedad en periodos prolongados, lo cual constituye una condición limitante en periodos de déficit o baja precipitación en la zona (tabla 2.4).

Aunque valores por encima de 3,6 cm/h son considerados altos, los mayores rangos en esta categoría en ambas profundidades se presentan para la unidad ALLi-M (14,21 y 13,0 cm/h). Esta condición se encontró también para la unidad ACCi-M en los primeros 15 cm (14,18 cm/h), lo cual permite afirmar que gran parte del territorio tiene una marcada tendencia a drenar rápidamente el agua que puede llegar por precipitación o riego complementario y, en consecuencia, disminuir la cantidad de agua y nutrientes que se pueden acumular en el perfil del suelo (figura 2.10).

Figura 2.10. Comportamiento de la conductividad hidráulica (k) en unidades de suelos en cultivos de aguacate Hass.

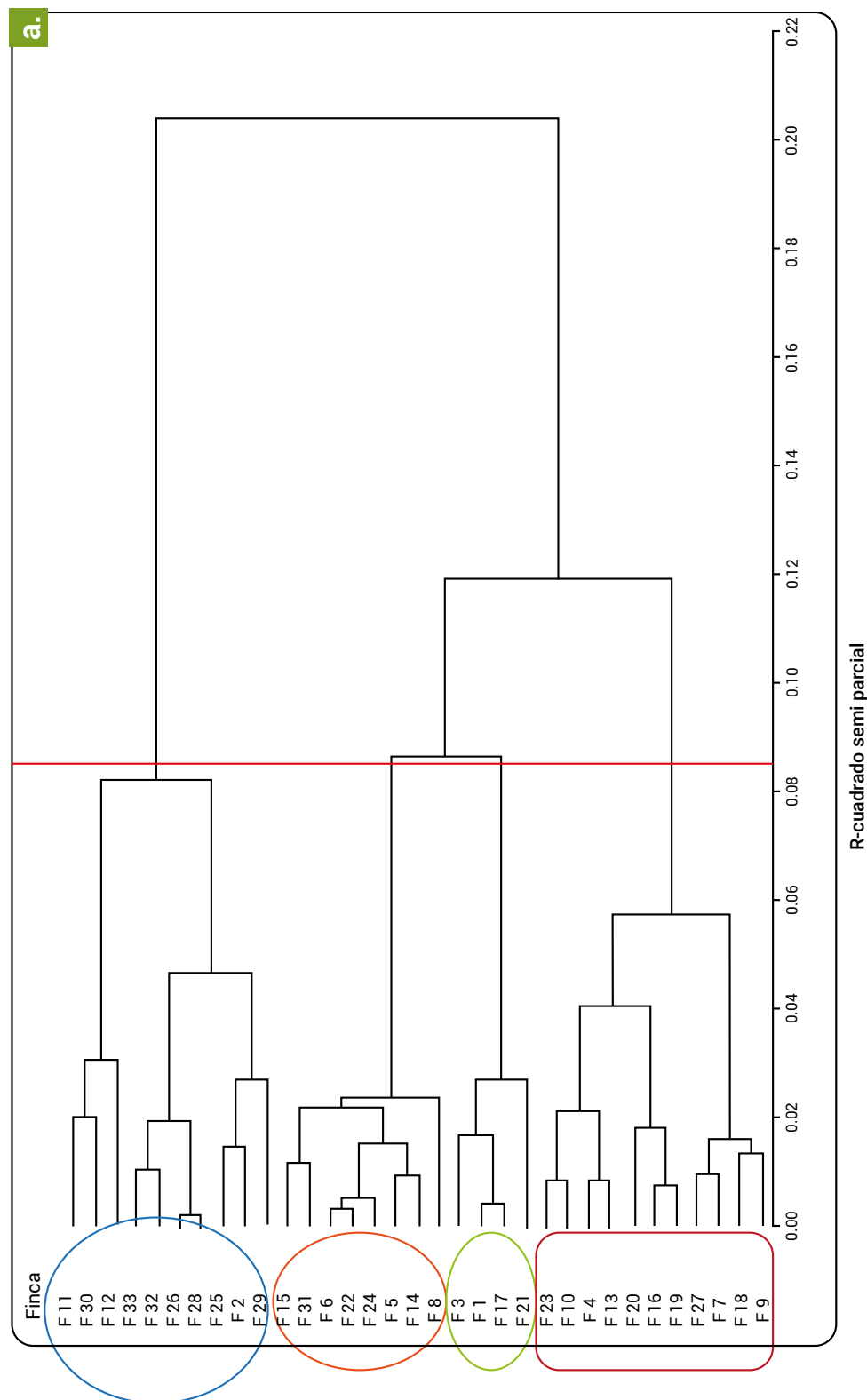


Fuente: Elaboración propia.

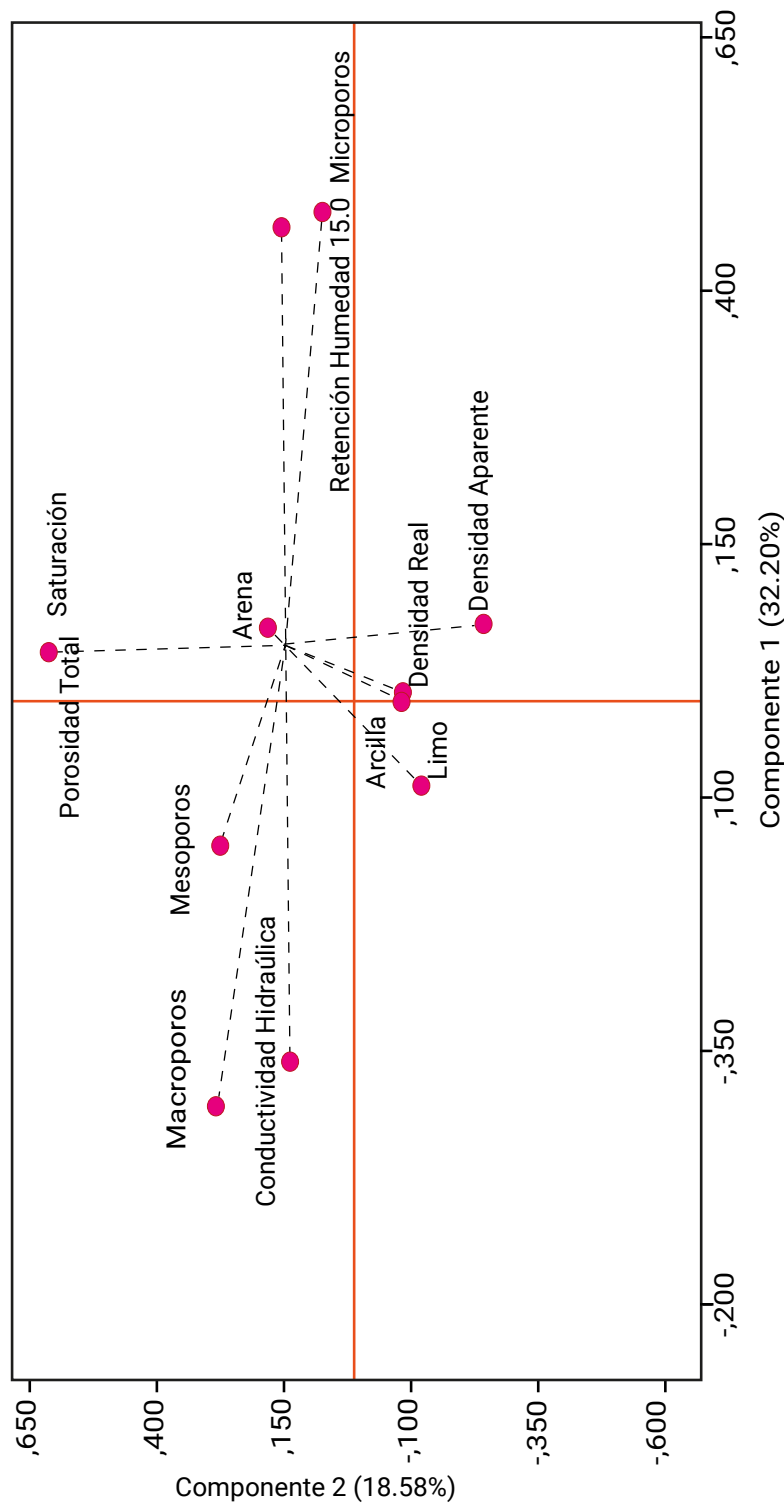
En estas condiciones, la conductividad hidráulica es influida por el grado de adensamiento o volumen poroso disponible según la relación con la $\Delta\alpha$ ($r = -0,36$). Mientras que, en relación con la disponibilidad de humedad del suelo, tanto a CC como a PMP, variables como la conductividad hidráulica ($r = -0,56$), macroporos ($r = -0,75$) y microporos ($r = 0,96$) influyen en la capacidad de retención de humedad en el suelo en las condiciones encontradas en la zona.

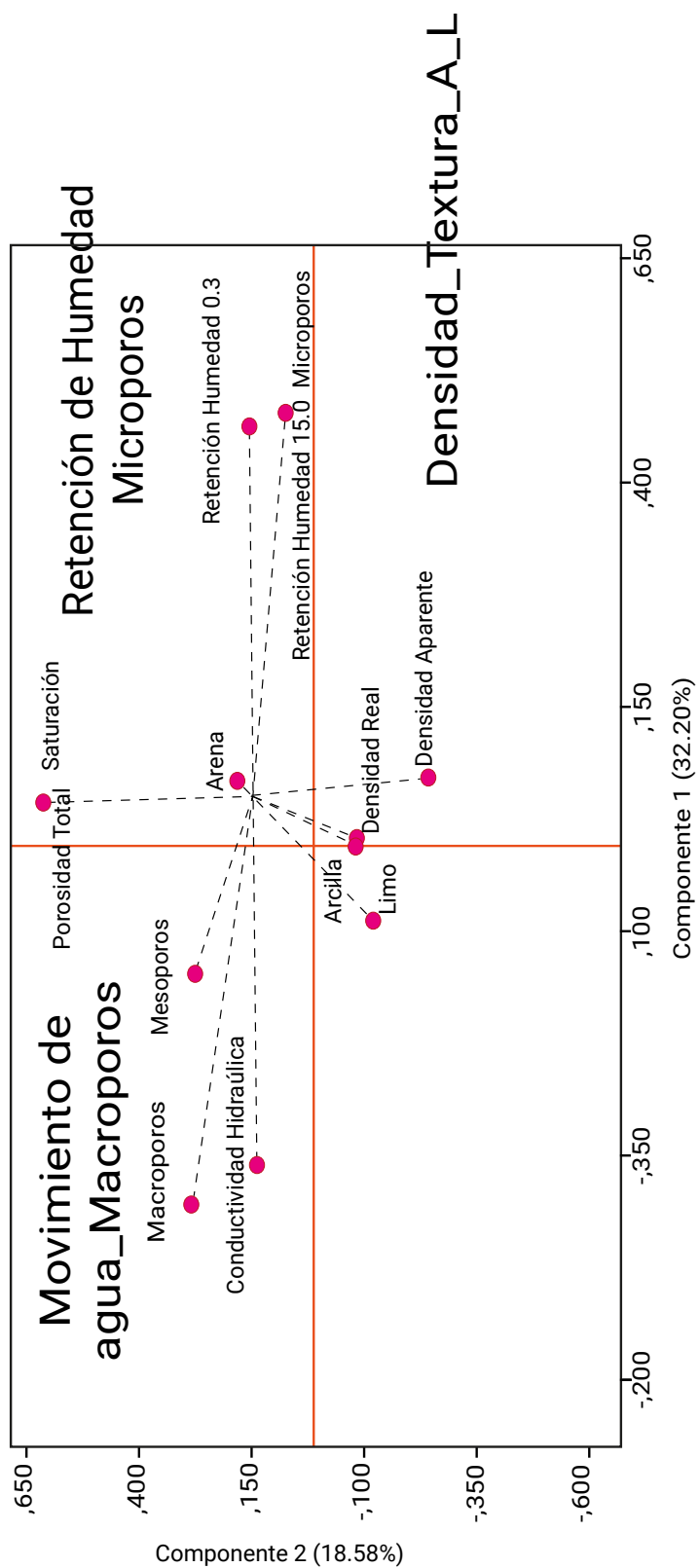
Específicamente, en la zona de cultivos se identifican cuatro grupos de fincas con propiedades físicas similares que permiten definir áreas diferenciales para aptitud física y recomendaciones de manejo (figura 2.11).

Figura 2.11. Análisis clúster para diferenciar los grupos de cultivo evaluados según variables físicas. a. Grupos de cultivos con características físicas similares, profundidad de 0 cm a 15 cm; b. Variables físicas que diferencian grupos de fincas, profundidad de 0 cm a 15 cm; c. Grupos de cultivos con características físicas similares, profundidad de 15 cm a 30 cm; d. Variables físicas que diferencian grupos de fincas, profundidad de 15 cm a 30 cm.



b.





Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las tendencias en los suelos presentes en el territorio, la clasificación de las fincas evaluadas se realiza con base en las variables que determinan el movimiento y la acumulación de agua en el suelo, así como en las condiciones de oxigenación, de vital importancia para el cultivo de aguacate Hass.

En este sentido, la diferenciación de los sitios se determinó principalmente a partir de estas variables: la conductividad hidráulica, los mesoporos y los macroporos, en función del movimiento de agua en el suelo; la retención de humedad y los microporos, como indicadores de disponibilidad de agua para las plantas; y la densidad y la textura, como indicadores de condiciones adecuadas de volumen poroso que determinan la aireación, el drenaje del suelo y la susceptibilidad a degradación, como proceso que se puede presentar en gran parte de los sitios evaluados (figura 2.11).

Contenido de nutrientes en frutos de aguacate Hass en zonas productoras del Cauca

La estimación del contenido de nutrientes en los diferentes cultivos evaluados permitió establecer que los microelementos B, Fe, Mn y Z se acumulan porcentualmente en mayor proporción que los macronutrientes. Específicamente, alcanzan porcentajes que fluctúan entre 14,8 % y 25,37 %, siendo el B el elemento de mayor concentración. Por su parte, los macroelementos N y K alcanzan en promedio valores de 1 % y 1,4 %, mientras que el P, el Ca y el Mg presentan valores por debajo del 1 % (tabla 2.5).

Estas observaciones determinan la necesidad de adicionar fuentes de elementos menores como el B en los planes de fertilización del cultivo, dados los contenidos bajos en gran parte de los suelos evaluados en zonas productoras.

Tabla 2.5. Estimación del contenido de nutrientes en frutos de cultivos de aguacate Hass en el departamento del Cauca

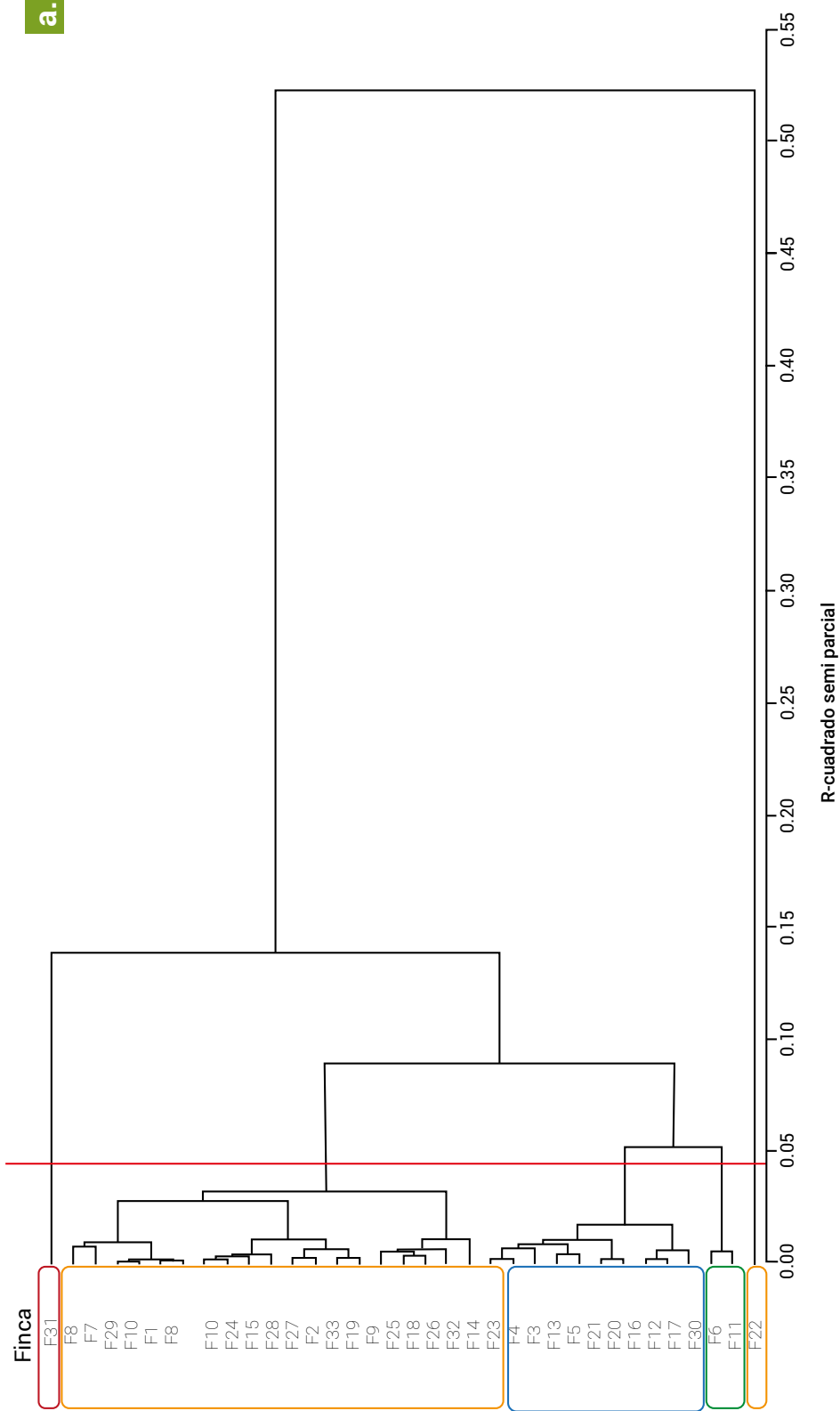
Elemento	Contenido en frutos (%)		
	Rango		Promedio
Nitrógeno (N)	0,79	2,52	1,04
Fósforo (P)	0,09	0,19	0,13
Potasio (K)	0,94	1,88	1,42
Calcio (Ca)	0,06	0,95	0,11
Magnesio (Mg)	0,07	0,28	0,10
Azufre (S)	0,06	0,21	0,09
Hierro (Fe)	0,82	69,53	21,67
Cobre (Cu)	0,27	10,58	7,43
Manganeso (Mn)	0,33	151,93	14,87
Zinc (Z)	0,69	24,34	17,39
Boro (B)	1,49	52,88	25,37

Fuente: Elaboración propia.

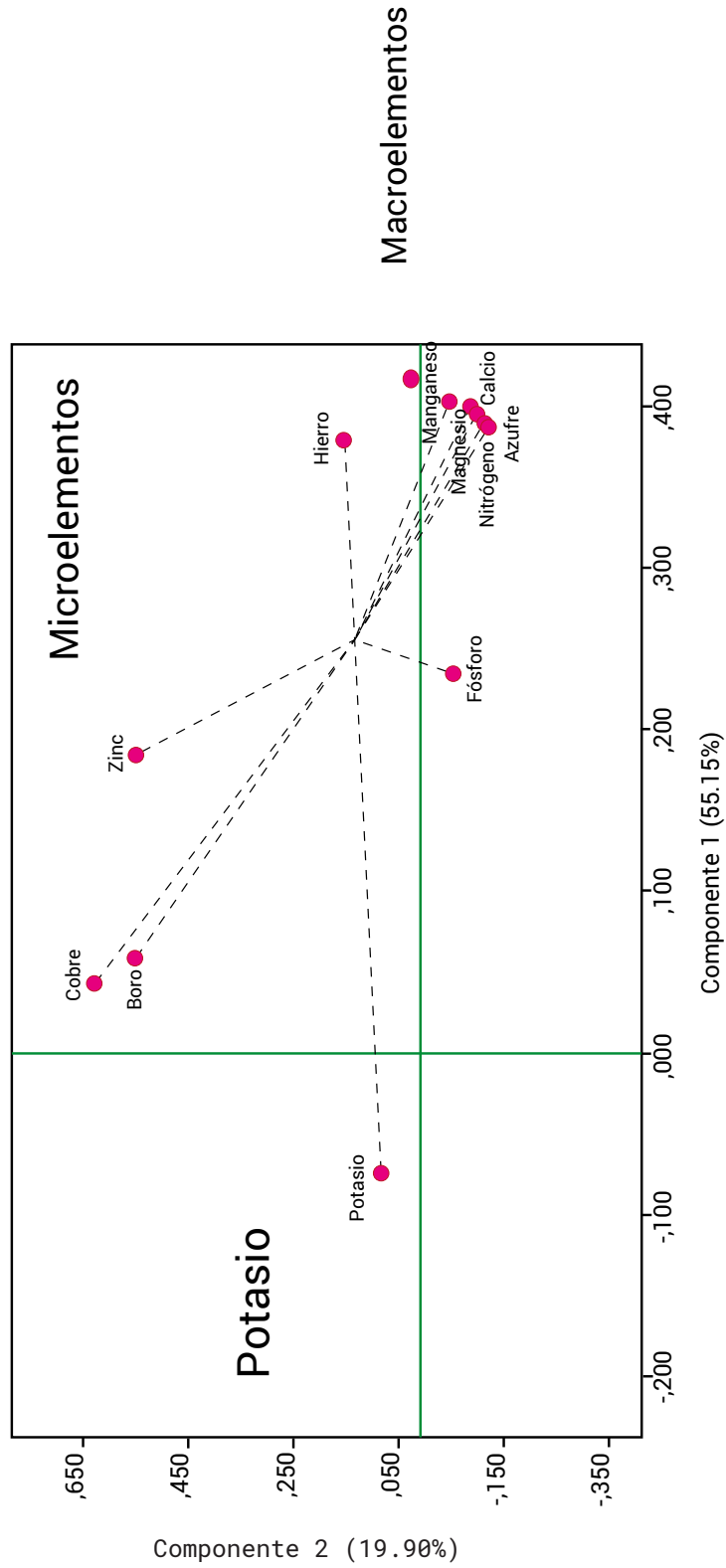
De acuerdo con estos hallazgos sobre el contenido de nutrientes en frutos, se identificaron cinco grupos de fincas con propiedades similares, las cuales permiten definir zonas diferenciales en cuanto a la calidad de la fruta y las recomendaciones de manejo nutricional del cultivo (figura 2.12a).

Las variables que determinan la diferenciación de los sitios corresponden a macroelementos como Ca, Mg y N, en una agrupación, y K para un segundo grupo, y los microelementos Cu, Z y B en un tercer agrupamiento (figura 2.12b).

Figura 2.12. Análisis clúster para diferenciar los grupos de sitios de cultivo evaluados según contenido de nutrientes en frutos. a. Grupos de cultivos con características físicas similares; b. Variables que diferencian los grupos.



b.



Factores edafoclimáticos que influyen en el desarrollo del aguacate Hass

La capacidad productiva del cultivo de aguacate Hass depende de múltiples factores, entre estos las características edafoclimáticas donde se establecen los huertos (Intagri, 2019). Por lo tanto, conocer los requerimientos de clima y suelo del cultivo es fundamental para definir prácticas de manejo que se adapten a cada región y, de esta forma, evitar que se adopten y apliquen modelos tecnológicos foráneos que no sean acordes con la oferta ambiental ni la demanda real de los cultivos en la región. Dado que los factores medioambientales influyen sobre todos los aspectos del crecimiento del aguacate y determinan la magnitud con la que se expresa su potencial genotípico (Gandolfo, 2008), la situación descrita puede originar una respuesta desfavorable del cultivar en cuanto a bajos rendimientos y calidad del fruto.

En Colombia, para el cultivo de aguacate, al igual que para muchos otros frutales, no se tienen en cuenta los componentes de la función productiva (genotipo, ambiente y la interacción genotipo x ambiente), aún cuando el conocimiento de estos factores permitiría entender con más precisión la respuesta de la especie a las condiciones tropicales en las que actualmente se aprovecha este frutal en el país.

De acuerdo con Mora et al. (2015), el éxito en la producción de un cultivo perenne se debe principalmente a la respuesta productiva de la especie a factores ambientales climáticos y edáficos, asociados al potencial genético del cultivar. Sin embargo, la presencia o ausencia de uno o más de estos factores puede limitar o potenciar el desarrollo del sistema productivo, por lo cual es fundamental que cuando se vaya a establecer una plantación de aguacate Hass, se identifiquen los requerimientos edafoclimáticos del cultivo, así como asociarlos a la oferta ambiental local, para conocer cuál es el potencial de la zona para producir aguacate Hass, los procesos de adaptabilidad y la respuesta productiva del cultivo.



Bernal-Estrada (2016) evaluó la influencia de siete condiciones climáticas, entre 1.340 y 2.420 m s. n. m., sobre el desarrollo, el rendimiento y la calidad del fruto en huertos de aguacate cv. Hass en el departamento de Antioquia. Este estudio ratifica que el cultivar debe ser establecido en zonas con climas desde los 1.700 hasta los 2.400 m s. n. m., pues se encontró que el rendimiento es mayor por encima de los 1.770 m s. n. m. ($13,9 \text{ t/ha}^{-1}$), mientras que en altitudes mayores a 2.000 m s. n. m. el peso de los frutos es superior y se obtiene la categoría extra (190 g). Lo anterior sugiere que las ventajas comparativas que presenta Colombia en relación con la oferta medioambiental requerida para alcanzar el potencial productivo de la especie deben ser aprovechadas para superar la brecha en los rendimientos que se presenta en comparación con otros países productores.

Por esta razón, a partir de las características particulares de algunas de las regiones productoras de aguacate Hass en países ubicados en diferentes latitudes, se identificó cuáles son los rangos adecuados de los requerimientos edafoclimáticos del cultivo. En la tabla 2.6 se describen los factores que influyen sobre el comportamiento productivo del cultivar de acuerdo con las condiciones de cada país productor, entre los cuales se encuentran factores de ubicación (altitud y pendiente), climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar) y edáficos (pH, profundidad efectiva, textura, materia orgánica, entre otros).

Específicamente, en Colombia se evidencia que en las zonas de producción existe una diferenciación de sistemas productivos, dado que los rangos de aptitud de las variables identificadas difieren entre regiones, como se evidencia entre Valle y Antioquia (tabla 2.6). Por esta razón es necesario hacer un análisis integral de la relación de variables y procesos propios en cada localidad, de tal manera que los resultados permitan tomar decisiones adecuadas respecto a la planificación y el manejo del cultivo.

Tabla 2.6. Valores referentes de requerimientos edafoclimáticos del cultivo de aguacate para diferentes regiones productoras

Factor ambiental	Variable	Zona productora aguacate hass								
		República Dominicana (1)	Honduras (2)	Costa Rica (3)	México (4)	Perú (5)	Colombia (6)	Colombia (7)	Colombia (Antioquia) (8)	Colombia (Valle) (9)
		Valor o rango óptimo								
Suelo	Altitud (m s. n. m)	700 - 1600	1500 - 2500	1200 - 1800	1600 - 2200	800 - 2500		1600 - 2100	1700 - 2200	
	pH	6,5 - 7,5	5,5 - 7	5,5 - 7	6,5	5,6 - 6,5	5,5 - 6,5		5,5 - 7,5	5,5 - 6,5
	Profundidad efectiva (m)		0,8 - 1	> 1,5	0,8 - 1	> 1	> 1	> 1	> 0,5	> 1
	Textura		F, FA, FAAr	F	F	FA	F, FA, FAra, FArl, FAr, FL, L	F, FA, AF		F, FA, AF
	Materia orgánica (%)	2,5 - 5	2,5 - 5	> 10			> 5		> 6	
Clima	Salinidad (dS/m)	< 2			< 3					
	Drenaje					Bien drenado	Bien drenado	Bien drenado	Bien drenado	
	Régimen de humedad						Údico		Ústico - údico	
	Pendiente (%)	< 15			2 - 15.		≤ 25	0 - 25	1 - 20.	0 - 12
	Temperatura (°C)	13 - 40	14 - 24	18 - 25	20 - 25	20 - 25	15 - 18	18 - 20	14 - 27	18 - 20
	Precipitación (mm.año ⁻¹)		1200 - 1800	1500	665 - 2200	1200	1000 - 2200	1500 - 2000	665 - 2000	1500 - 2000
	Brillo solar (h.día ⁻¹)						≥ 5	> 8	4 - 5,5	
	Humedad relativa		70 - 80	> 60	57 - 63			60 - 70	50 - 80	67 - 75

(1) Bisonó Pérez & Hernández (2008); (2) Alfonso Bartoli (2008); (3) Garbanzo (2013); (4) Anguiano et al. (2007); Garrido (2013); (5) CEDEPAS, (2009); (6) Fonseca et al (2018); (7) Lozano García et al (2013); (8) Rondón et al (2020); (9) Jines & Eitzinger (2021).

Fuente: Elaboración propia.

Factores climáticos

El aguacate es cultivado principalmente en tres zonas climáticas distintas: 1) los climas frescos, semiáridos y con lluvias predominantes en invierno, como California, Chile e Israel; 2) los climas subtropicales húmedos, con lluvias predominantes en verano, como en México, Sudáfrica y el este de Australia, y 3) los climas tropicales y semitropicales con veranos lluviosos, como en Brasil, Florida e Indonesia (Wolstenholme, 2013).

Las zonas productoras de aguacate en Colombia presentan grandes variaciones en altitud, radiación solar, humedad relativa, temperatura y precipitación, entre otros factores, lo cual proporciona una gran variación en la respuesta de los cultivares en cuanto a comportamiento agronómico, productividad, rendimiento y calidad de fruta (Bernal-Estrada & Díaz-Diez, 2020).

Sin embargo, no se conoce la información sobre las condiciones en las que se desarrolla el cultivo en Colombia, las cuales son muy diferentes a las de las zonas mencionadas por Whiley y Schaffer (1994). Este vacío de conocimiento trae como consecuencia que se adopten prácticas de otras latitudes, las cuales deben ser validadas, con el consecuente riesgo de que haya pérdidas del cultivo, inversión y tiempo de producción. Por esta razón, es importante y urgente hacer investigación básica que busque mejorar las condiciones del cultivo en los ambientes específicos que caracterizan las diferentes regiones productoras de aguacate Hass en Colombia (Bernal-Estrada & Díaz-Diez, 2020).

Con este propósito, a continuación se relacionan los principales factores que influyen en los requerimientos de clima para la producción de aguacate Hass y que se deben considerar para establecer y desarrollar los cultivos

Precipitación

El rango óptimo de precipitación para desarrollar el cultivo de aguacate Hass se encuentra entre 1.000 y 2.000 mm/año, distribuidos uniformemente en el año (Bernal-Estrada & Díaz-Diez, 2020; Narváez-Cerón, 2010).

En zonas productoras identificadas en el departamento del Cauca, se estima un promedio acumulado de lluvias de 1.933,9 mm/año, lo cual permite inferir sobre la alta disponibilidad de agua para el cultivo en la región. Sin embargo, es necesario que se analice la distribución de lluvias en el año, con el fin de establecer periodos críticos por exceso o déficit hídrico que puedan afectar el desarrollo y la producción del cultivo (figura 2.13a).

Temperatura

El aguacate Hass requiere temperaturas que fluctúen entre los 15 °C y los 18 °C, aunque el cultivo puede adaptarse a temperaturas de hasta 10 °C, rango en el cual la planta realiza sus procesos fisiológicos para obtener frutos de buena calidad (Bernal-Estrada & Díaz-Diez, 2020; Miranda, 2012; Narváez-Cerón, 2010). Para condiciones del departamento del Cauca, se tienen temperaturas medias entre los 16,8 °C y los 17,5 °C, así como un rango entre máximas y mínima promedio de 21,7 °C a 12,7 °C (figura 2.13b).

Brillo solar

Esta variable climática influye tanto sobre las coberturas vegetales del suelo como sobre los cultivos, en sus procesos de fotosíntesis, formación de hojas y estructura física de la planta.

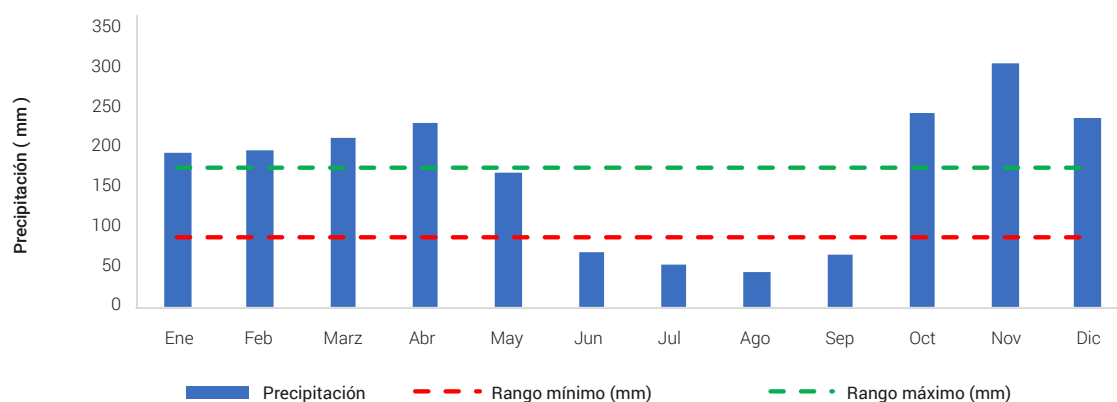
El aguacate se considera una planta altamente heliófila que presenta óptimos resultados con más de 2.000 horas luz/año⁻¹ (5,4 h luz/día⁻¹), de modo que los lotes para la producción comercial deben estar ubicados en áreas de elevada luminosidad. Sin embargo, un exceso de radiación produce quemaduras en las ramas



y golpe de sol en el fruto (Fisher & Ordúz, 2012; Fonseca et al., 2018; Miranda, 2012; Saavedra et al., 2012).

Para aguacate Hass se considera que un brillo solar superior a 5 horas día/sol⁻¹ es apropiado para un adecuado desarrollo, crecimiento y producción del cultivo (Bernal-Estrada & Díaz-Diez, 2020; Bancoldex, 2015) (figura 2.13b).

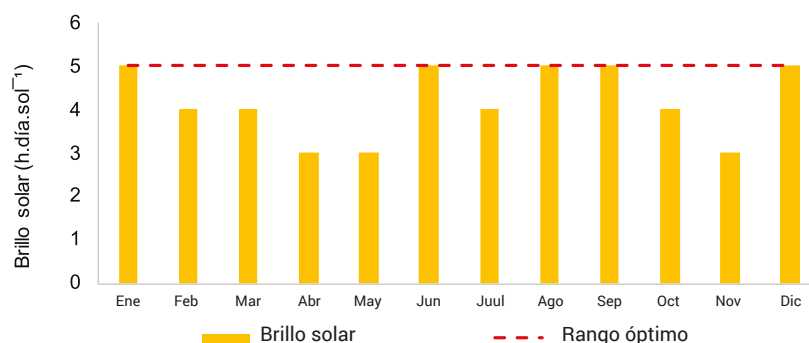
Figura 2.13. Comportamiento de variables climáticas en zonas productoras de aguacate Hass en el departamento del Cauca. a. Precipitación promedio anual (mm/mes); b. Temperatura mínima, máxima y media promedio anual; c. Brillo solar promedio por día.



a.



b.



C.

Fuente: Elaboración propia.

Factores de ubicación de los cultivos

En este apartado se describen los factores de ubicación de los cultivos en relación con aspectos como la altitud y la pendiente según el relieve, los cuales influyen en las características del clima y de los suelos requeridas para el cultivo de aguacate Hass (figura 2.14).

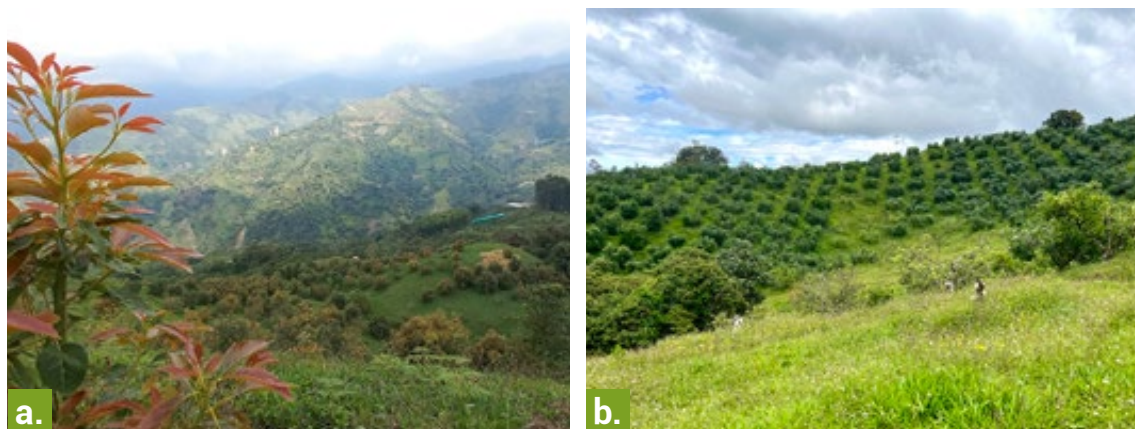
Altitud

De esta variable dependen la precipitación, la temperatura del aire y el contenido de MO en el suelo, entre otros. Para que el cultivar exprese su potencial productivo, se debe considerar una altitud entre los 1.800 y los 2.000 m s. n. m.

Pendiente del terreno

Para establecer cultivos de aguacate Hass se considera como óptimo inclinaciones con valor menor a 25 % y aceptable entre 25 % y 50 %.

Figura 2.14. Factores de ubicación de los cultivos en zonas productoras de aguacate Hass en el departamento del Cauca. a Gradiente de altitud; b. Pendiente del terreno.



Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán y Diana Lucía Correa

Factores edáficos

El desarrollo exitoso y sostenible de un cultivo de aguacate Hass requiere prestar especial atención a factores edáficos, sobre todo a los que tienen relación con la salud del sistema radicular, la humedad, la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad del suelo (Martín, 2022).

El aguacate se adapta a una gran gama de suelos, desde los arenosos hasta los arcillosos, siempre y cuando posean un buen drenaje interno, factor que es de vital importancia (Bernal-Estrada & Díaz-Diez, 2020; Galán-Saúco, 1990). Específicamente, los suelos con texturas francas, franco arenosas, franco limoso y franco arcillo arenosas bien drenados se consideran apropiados para establecer y producir el cultivo a escala comercial, ya que evitan encharcamientos y excesos de humedad que afectan su productividad y sanidad (figura 2.15).

Figura 2.15. Factores edáficos que se deben considerar en requerimientos del cultivo en zonas productoras de aguacate Hass en el departamento del Cauca. a. Texturas livianas: F, FA y FAr; b. Profundidad efectiva: > 1 m; c. Drenaje interno bueno: evitar suelos con drenaje imperfecto o encharcados; d. Contenido de materia orgánica: > 5 %.



Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán, Fredy Neira y Sebastián Polo y Diana Lucía Correa.

El régimen de humedad adecuado del suelo es el údico, ya que representa las mejores condiciones para el cultivo porque mantiene su humedad durante todo el año, dada su alta capacidad de retención y movilidad del agua a través de los poros del suelo.

El régimen de humedad adecuado del suelo es el údico, ya que representa las mejores condiciones para el cultivo porque mantiene su humedad durante todo el año, dada su alta capacidad de retención y movilidad del agua a través de los poros del suelo. In-

directamente, este régimen de humedad indica buena distribución de las lluvias en la región, mientras que el régimen ústico indica que, en alguna época del año, la humedad debe suministrarse por medio de algún sistema de riego (Fonseca et al., 2018; Miranda, 2012).

La profundidad efectiva ideal para el desarrollo de las raíces del aguacate Hass es aquella mayor o igual a 1 m. A profundidades menores, y dependiendo del tipo de textura, se requiere prestar especial atención a problemas de crecimiento deficiente del sistema radical, atrofiamiento, dificultades de anclaje y reducción del crecimiento del árbol (Miranda, 2012; Saavedra et al., 2012).

El rango de pH óptimo para el desarrollo del aguacate Hass es de 5,6 - 6,5, es decir, suelos entre moderadamente a ligeramente ácidos (Bernal-Estrada & Díaz-Díez, 2020). Esta condición determina la disponibilidad de elementos para la nutrición del cultivo, pero también la alta concentración de iones como el Al y Fe, que pueden resultar limitantes para el desarrollo de las plantas, de manera que se considera como valor óptimo para el cultivo de aguacate una saturación de Al ≤ 15 %.

El aguacate Hass se desarrolla adecuadamente en suelos con una capacidad de intercambio catiónico (CIC) ≥ 10 cmol/kg suelo⁻¹. No obstante, y como resultado del pH y la capacidad de intercambio catiónico, se deben verificar los contenidos de P, micronutrientes y bases intercambiables como Ca, Mg y K para garantizar su disponibilidad y que puedan ser absorbidas por el cultivo en sus diferentes estados de desarrollo.

Finalmente, respecto al contenido de MO en el suelo, se consideran adecuados para la producción de aguacate niveles superiores al 5 %. La MO tiene gran importancia en procesos bioquímicos y físicos que se dan en el suelo porque contribuye a la disponibilidad de nutrientes, la estructura física del suelo, la retención de humedad y aireación, así como en la actividad microbiana.

Requerimientos edafoclimáticos para aguacate Hass en zonas productoras del departamento del Cauca

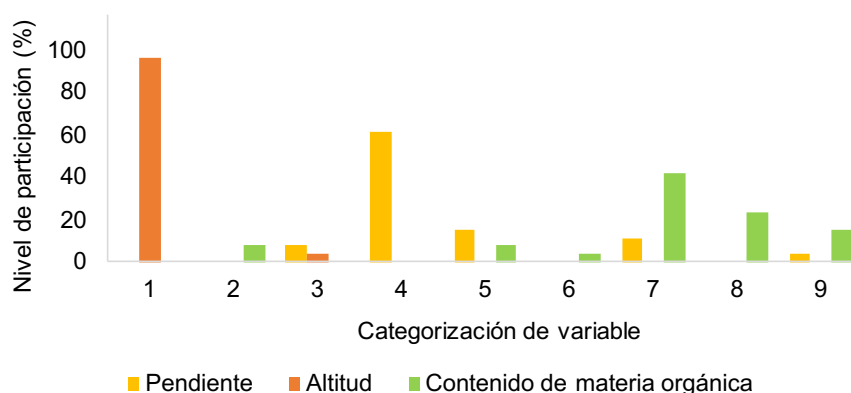
Para conocer el potencial productivo de una zona geográfica, es necesario evaluar los requerimientos mínimos para el establecimiento, desarrollo y producción del aguacate Hass. Por esta razón, a partir de un ejercicio participativo con productores del departamento del Cauca y expertos, se consolidaron los principales factores edafoclimáticos que influyen en el comportamiento productivo del cultivar y se definieron los requerimientos en el contexto local como una herramienta para la planificación y el manejo sostenible del cultivo.

El análisis de la percepción sobre los requerimientos edáficos permitió establecer la similitud en la visión de productores y expertos en relación con los factores más relevantes o que representan una mayor restricción para el cultivo. De esta manera, aspectos como la altitud (m s. n. m.), la textura del suelo, el drenaje y la pendiente del terreno son considerados de importancia porque están ligados al movimiento y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

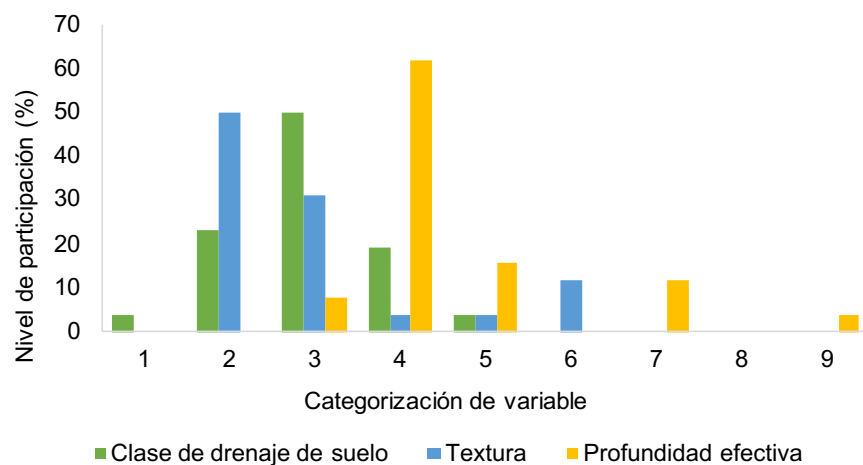
En cuanto a las variables químicas del suelo, se considera que el pH es el de mayor importancia, seguido por los contenidos de MO. De acuerdo con esta percepción, los participantes en el ejercicio concuerdan en que la MO es un factor en el cual se puede intervenir, de manera que si se encontrara algún tipo de limitación en los

contenidos en el suelo, esta se puede aportar durante el desarrollo del cultivo y mejorar la condición (figura 2.16).

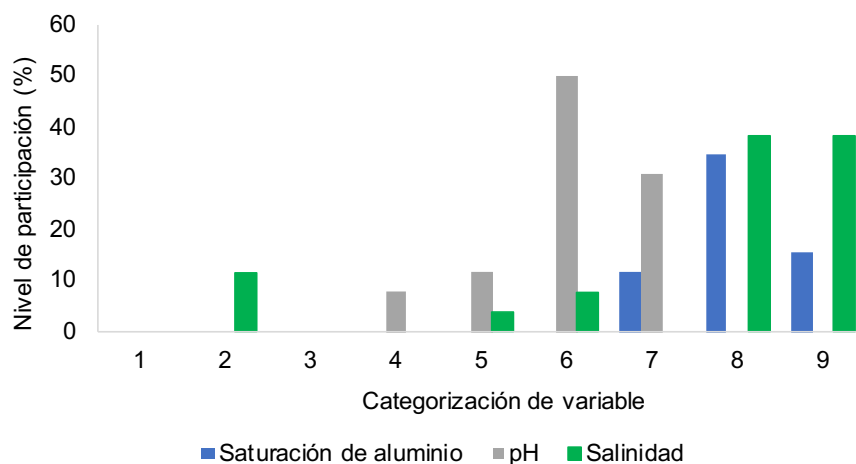
Figura 2.16. Nivel de categorización de variables ambientales que influyen en el comportamiento productivo de aguacate Hass en el departamento del Cauca (% participantes). a. Factores de ubicación de los cultivos; b. Factores edáficos; c. Factores químicos del suelo.



a.



b.



C.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a variables como la saturación de Al y la salinidad, en general los productores no relacionan efectos sobre el comportamiento productivo del aguacate Hass, sin embargo, los expertos los consideran como limitantes para la producción del cultivar, especialmente si se desconocen sus efectos y no se manejan estas condiciones en el suelo.

De acuerdo con los expertos consultados y autores como Carreño y Chaparro-Giraldo (2013), en suelos ácidos (pH 4,5 – 5,5) el Al puede ser soluble y móvil, condición que facilita el ingreso a la raíz y limita su crecimiento, lo cual, a su vez, afecta la absorción de agua y de nutrientes esenciales para la planta. Respecto a la salinidad, aunque se asocia a suelos alcalinos (pH > 7,5 – 8) que son poco factibles de encontrar en las zonas productoras, los expertos señalan que el mal manejo de la fertilización y del suelo puede incrementar los contenidos de sales solubles, de allí que sea importante tener en cuenta este factor porque el aguacate Hass es una especie bastante susceptible a suelos con estas características (Castro et al., 2015).

A partir de la información recopilada, la percepción de los productores y los expertos en el cultivo, comparada con los estudios reportados en la bibliografía, se identificaron las variables de

mayor importancia y sus rangos como insumo para determinar los requerimientos del cultivo e identificar las zonas con aptitud para el sistema productivo de aguacate Hass en las condiciones específicas del departamento de Cauca (tabla 2.7). De esta manera y en orden de importancia, se destacan las siguientes variables:

1. **Altitud:** influye directamente en las condiciones climáticas.
2. **Textura del suelo:** relacionada con la capacidad de drenaje, la retención de humedad y la aireación del suelo.
3. **Drenaje del suelo:** vinculada principalmente con la susceptibilidad de las plantas de aguacate al exceso de humedad e incidencia de patógenos de la raíz.
4. **pH del suelo:** variable que incide sobre la disponibilidad de los nutrientes.
5. **Pendiente del terreno:** facilita o limita las condiciones de la zona para el laboreo y el drenaje del suelo.

Tabla 2.7. Consolidado de requerimientos edáficos del cultivo ajustados a condiciones de las zonas productoras del departamento del Cauca

Categoría	Factor	Rango de aptitud					
		Óptimo		Moderado		Restringido	
1	Altitud (m s. n. m.)	1.800	2.000	1.700	2.300	< 1.500	> 2.500
2	Textura (gruesa, fina, media)	Franco arenoso, franco limoso, limoso, franco, franco arcillo arenoso		Franco arcilloso, franco arcillo limoso; arenoso, arenoso franco		Arcilloso, arcillo limoso, arcillo arenoso	
3	Clase de drenaje del suelo (clase)	Bien drenado		Moderadamente a imperfectamente drenado		Pobrementemente a muy pobrementemente drenado	
4	Pendiente (%)	0	25	25	50	50	75
5	pH (reacción)	5,5	6,5	5,0 - 5,5	6,6 - 7,3	< 5,0	> 7,3
6	Profundidad efectiva del suelo (cm)	1	150	50	100	0	25
7	Contenido de materia orgánica (%)	> 5		2	5	< 2	
8	Salinidad (ds/m)	< 2		2	4	> 4	
9	Saturación de aluminio (%)	0	15	15	30	>30	

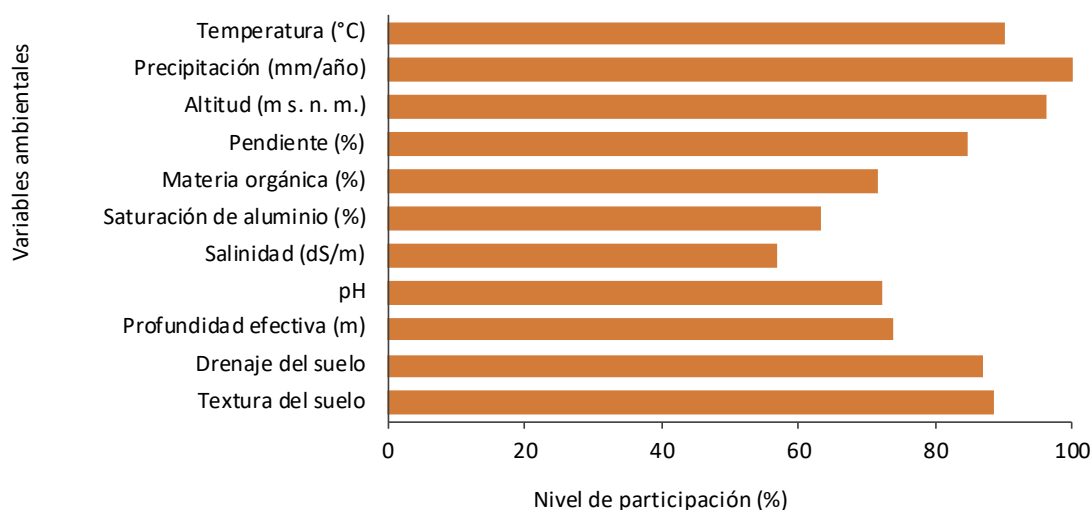
Fuente: elaboración propia.

Estos resultados de la aproximación a los requerimientos edáficos del cultivo de aguacate Hass coinciden con lo reportado por el trabajo de Intagri (2019), en el cual se consultó a diversos expertos para definir y establecer rangos óptimos de variables de suelo y clima, como profundidad efectiva, temperatura, precipitación, pH del suelo, textura, materia orgánica y salinidad. Asimismo, los resultados se relacionan con la información de los requerimientos edafoclimáticos para el cultivo reportados en diferentes zonas productoras del cultivo en Colombia y otros países de América (Bisonó & Hernández, 2008; Fonseca et al., 2018; Garbanzo-Solís, 2011; Garrido-Ramírez, 2013; Jines-León & Eitzinger, 2021; Rondón-Salas et al., 2020).

De acuerdo con los resultados de la validación, los participantes eligieron la altitud como la variable que más influye en el comportamiento productivo del aguacate Hass (96,2 % de los participantes), dado que se considera un factor asociado a variables climáticas como la temperatura y la precipitación, así como con algunas características del suelo como el contenido de MO, pH y drenaje del suelo. Otro factor biofísico importante es la pendiente (84,6 % de las respuestas), por su relación con procesos de formación de suelos, el drenaje y la erosión (figura 2.17).



Figura 2.17. Percepción de los encuestados sobre las variables que influyen en el comportamiento productivo del aguacate Hass en el departamento del Cauca.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a variables de suelo, los encuestados afirman que la textura y el drenaje del suelo tienen mayor relevancia para el cultivo (88,5 % y 86,9 % de las respuestas, respectivamente). Entre las características químicas, señalan que el pH (72,3 %) es el más influyente en el comportamiento del cultivo, seguido del contenido de MO (71,5 %), la saturación de aluminio (63,1 %) y la salinidad (56,9 %). En cuanto a los factores climáticos, escogieron a la precipitación como la variable de mayor importancia, con el 100 % de las respuestas, seguido por la temperatura con el 90 %.

Con los resultados de la consolidación y validación de los requerimientos edafoclimáticos del cultivo ajustados a las condiciones actuales del sistema productivo en la región, se fundamenta la metodología para identificar los nichos productivos o las zonas aptas para el sistema productivo de aguacate Hass en las condiciones del departamento del Cauca. Asimismo, la aproximación a los requerimientos del cultivo permitirá que los productores, con acompañamiento técnico, puedan ajustar las prácticas de manejo agronómico a las condiciones locales de producción, lo cual

conducirá, en un mediano plazo, a un mejoramiento de los rendimientos y la calidad de la fruta.

Referencias

- Alfonso-Bartoli, J. (2008). *Manual técnico del cultivo del aguacate Hass* (Persea americana L.). Fundación Hondureña de Investigación. <https://www.avocadosource.com/books/AlfonsoJose2008.pdf>
- Anguiano-Contreras, J., Coria-Avalos, V. M., Ruiz-Corral, J. A., Chávez-León, G., & Alcántar-Rocillo, J. J. (2007). Caracterización edáfica y climática del área productora de aguacate Persea americana cv. "Hass" en Michoacán, México. *Proceedings VI World Avocado Congress* (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate, Viña del Mar, Chile, 12 – 16 de noviembre). https://www.avocadosource.com/wac5/papers/wac5_p323.pdf
- Bancoldex. (2015). *Documento final de conclusión de la metodología, memorias técnicas y mapas por aptitud de uso para cultivos comerciales del aguacate Hass en Colombia, a escala 1:100.000*. Bancoldex.
- Barrientos-Priego, A. F., & López-López, L. (1998). Historia y genética del aguacate. En *Memoria 1988* (pp. 33-51). Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Aguacate en el Estado de México. https://www.avocadosource.com/journals/cictamex/cictamex_1998/cictamex_1998_33-51.pdf
- Bernal-Estrada, J. A., & Díaz-Diez, C. A. (Eds.). (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>
- Bernal-Estrada, J. A., Tamayo-Vélez, A. de J. & Díaz-Diez, C. A. (2020). Dynamics of Leaf, Flower and Fruit Abscission in Avocado cv. Hass in Antioquia, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14, 324-333. <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i3.10850>
- Bernal-Estrada, J. (2016). *Estudios ecofisiológicos en aguacate cv. Hass en diferentes ambientes como alternativa productiva en Colombia* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55435>

- Bisonó, S. M., & Hernández, J. R. (2008). *Guía tecnológica sobre el cultivo del aguacate*. Consejo Nacional de Competitividad. <http://bvirtual.infoagro.hn/xmlui/handle/123456789/656>
- Bost, J. B., Smith, N. J., & Crane, J. H. (2013). History, Distribution and Uses. En B. A. Schaffer, B. N. Wolstenholme, & A. W. Whiley (Eds.), *The Avocado: Botany, Production and Uses* (pp. 10-30), CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9781845937010.0000>
- Carreño, A., & Chaparro-Giraldo, A. (2013). Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Universitas Scientiarum*, 18(3), 283-310. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC18-3.taev>
- Castro, M., Fassio, C., Cautin R., & Ampuero, J. (2015). UCV7, portainjerto de aguacate tolerante a salinidad. *Rev. Fitotec. Mex.*, 38(1), 85-92. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n1/v38n1a11.pdf>
- Centro Ecuménico de Promoción y Acción Social Norte [CEDEPAS]. (2009). *Bondades y manejo básico del palto*. Cedepas. <https://www.cedepas.org.pe/content/bondades-y-manejo-t%C3%A9cnico-de-palto>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. (2015). Producto 2: Mapas de zonificación de la aptitud agroclimática e identificación de nichos productivos por eventos de variabilidad climática para Cacao (Mercaderes), Aguacate (Tambo) y Pasturas (Patía). Departamento del Cauca. Proyecto Reducción del Riesgo y Adaptación Al Cambio Climático. Fondo Adaptación – CORPOICA. [Documento técnico]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA
- Crane, J. H., Douhan, G., Faber, B. A., Arpaia, M. L., Bender, G. S., Balardi, C. F., & Barrientos-Priego, A. F. (2013). Cultivars and Rootstocks. En B. Schaffer, B. N. Wolstenholme, & A. W. Whiley (Eds.), *The Avocado: Botany, Production and Uses* (2nd ed.; pp. 200-233). CABI Publishing.
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). *The nature, properties and management of volcanic soils*. *Advances in Agronomy*, 82(3), 113-182. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
- Dorado-Guerra, D., Grajales-Guzmán, L. C., & Rebolledo-Roa, A. (2017). *Requerimientos hídricos del cultivo de aguacate (Persea americana) variedad Hass* (1.a ed.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/14/12/115-1?inline=1?inline=1>

- Fisher, G., & Ordúz-Rodríguez, J. (2012). Ecofisiología en frutales. En G. Fisher (Ed.), *Manual para el cultivo de frutales en el trópico* (pp. 54-72). Produmedios.
- Fonseca, F., Aguilar, D., Siachoque, R., Urbina, J., Otero, J., Páramo, G., & García, E. (2018). *Zonificación de aptitud para el cultivo comercial de aguacate Hass en Colombia, a escala 1:100.000*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). https://upra.gov.co/es-co/Publicaciones/Zonas_aptas_aguacatehass.pdf
- Galán-Saúco, V. (1990). Aguacate. En *Los frutales tropicales en los subtrópicos. I. Aguacate, mango, litchi y longan* (pp. 25-58). Ediciones Mundi-Prensa. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2013). *Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios. Metodología a escala general (1:100.000)*. UPRA. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/36447>
- Gandolfo, S. (2008). *Factores ecofisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, floración y desarrollo del fruto del aguacate* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Producción Vegetal]. Repositorio institucional. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/3441/tesisUPV2868.pdf>
- Garbanzo-Solís, M. (2011). *Manual de aguacate: Buenas prácticas del cultivo variedad Hass* (2da ed.). Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-4259.pdf>
- Garrido-Ramírez, E. (2013). Áreas potenciales para el cultivo de Aguacate (*Persea americana* L.) cultivar “Hass” en el Estado de Guerrero, México. *Agro Productividad*, 6(5). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/484>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (1995). *Suelos de Colombia: Origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. IGAC.
- Intagri. (2019). Requerimientos de suelo y clima del cultivo de aguacate [Folleto]. https://www.intagri.com/public_files/56.-Requerimientos-de-Suelo-y-Clima-del-Cultivo-de-Aguacate.pdf#:~:text=Requerimientos%20ed%C3%A1ficos%20Materia%20org%C3%A1nica.%20El%20cultivo%20de%20aguacate,que%20presenta%20el%20aguacate%20a%20la%20as%1Fxia%20radi
- Jines León, A., & Eitzinger, A. (2021). *Identificación de las zonas de ladera aptas para el cultivo de aguacate Hass en el territorio del Valle del Cauca*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80866>

- Lemus, G., Ferreyra, R., Gil, P., Sepúlveda, P., Maldonado, P., Toledo, C., Barrera, C., & Celedón, J. M. (2010). *El cultivo del palto* [Boletín INIA, n.º 129]. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7333?&locale-attribute=es>
- Martín, M., Álvarez, O., Martínez-Ferri, E., Moreno-Ortega, G., Moreno Pérez, A., Pliego, C., Palacios, M., & Lorite, I. (2022). *Consideraciones en el diseño de un proyecto de aguacate sostenible*. AGBAR. <https://agbaragriculture.com/wp-content/uploads/2022/07/EstudioIFAPAAgbarAgricultureDEF.pdf>
- Miranda, D. (2012). Establecimiento de huertos frutícolas. En G. Fischer (Ed.), *Manual para la producción de frutales del trópico* (pp. 99-119). Produmedios.
- Mora, F., Muñoz, R., Meza, V., & Fonseca, W. (2015). Factores edáficos que influyen en el crecimiento de *Vochysia guatemalensis* en la región Huetar Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 71-89. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19547>
- Narváez-Cerón, F. V. (2010). *Manejo técnico para la producción de aguacate (Persea americana Mill.) variedad Hass en la meseta de Popayán* [Tesis de pregrado, Universidad del Cauca]. Repositorio Unicauca. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/744/MANEJO%20T%C3%89CNICO%20PARA%20LA%20PRODUCCI%C3%93N%20DE%20AGUACATE%20HASS%20EN%20LA%20MESETA%20DE%20POPAY%C3%81N.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quiceno-Rico, J. M., Londoño-Chica, S., Mora-Gaviria, G. A., Ricardo Molina, A., Morales-García, B. L., & Pássaro Carvalho, C. (2019). Diagnóstico de aspectos productivos y ambientales en el cultivo de aguacate Hass del Oriente Antioqueño. *Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño*, 45-63. <https://doi.org/10.23850/26652447/5/1/2767>
- Ramírez-Gil, J. G., Henao-Rojas, J. C., Díaz-Díez, C. A., Peña-Quñones, A. J., León, N., Parra-Coronado, A., & Bernal-Estrada, J. A. (2023). Phenological Variations of Avocado cv. Hass and their Relationship with Thermal Time under Tropical Conditions. *Heliyon*, 9(9), e19642. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19642>
- Rebolledo-Roa, A., & Dorado-Guerra, D. Y. (2017). *Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado* (1.a ed.). Corporación Colombiana de

Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7402384>

- Ríos-Gallego, G., Franco, G., Sandoval-Arana, A. P., Vásquez Gallo, L. A., & García-Lozano, J. (2013). Atlas: *Zonificación de las tierras para el uso del cultivo de aguacate Cv. Hass en Colombia* [Boletín técnico]. Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12606>
- Rondón-Salas, T., Builes-Gaitán, S., Casamitjana-Causa, M., Duque-Ríos, M., Rodríguez-León, A. K., Vega-Marín, C., Ruiz, D., Rodríguez-Yzquierdo, G. A. (2020). Perspectiva del ordenamiento productivo del aguacate cv. Hass en Antioquia. En J. A. Bernal-Estrada, & C. A. Díaz-Díez (Eds.), *Actualización tecnológica y buenas prácticas agrícolas (BPA) en el cultivo de aguacate* (pp. 715-756). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/162/153/1130-1?inline=1>
- Saavedra, R., H. Vásquez., & E. Mejía, E. (2012). Aguacate (*Persea americana* Mill.). En G. Fisher (Ed.), *Manual para el cultivo de frutales en el trópico* (pp. 319-348). Produmedios.
- Sadeghian, S. (2009). La materia orgánica en agroecosistemas cafeteros de Colombia. En Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelos & Centro Nacional de Investigaciones de Café (Eds.), *Materia orgánica biología del suelo y productividad agrícola: Segundo seminario regional comité regional eje cafetero* (pp. 72-99). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0003_4
- Sánchez Espinosa, J. A., & Rubiano Sanabria, Y. (2015). Procesos específicos de formación en andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, 12(2), 85-97. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/709>
- Unidad de Planificación Agropecuaria [UPRA]. (2013). *Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios. Metodología a escala general (1:1.00.000)*. UPRA
- Whiley, A. W., & Schaffer, B. (1994). Avocado. En B. Schaffer, & P. C. Andersen (Eds.), *Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops: Subtropical and Tropical Crops* (pp. 165-197). CRC Press.
- Wolstenholme, B. N. (2013). Ecology: climate and soils. En B. Schaffer, B. N. Wolstenholme, & A. W. Whiley, *The Avocado: Botany, Production and Uses* (pp. 86-117). CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9781845937010.0000>