

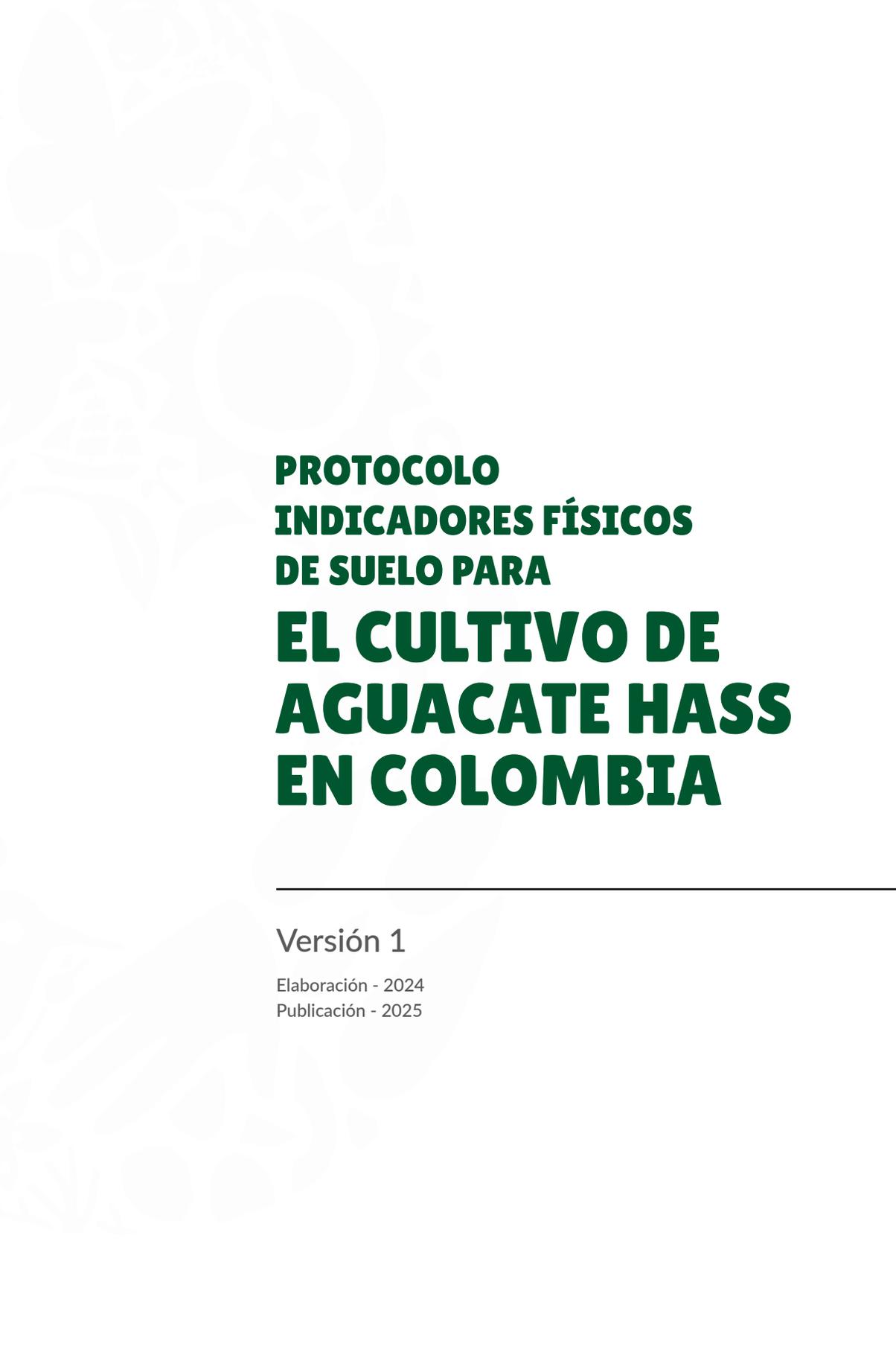


AVOCADOS
FROM
COLOMBIA

corpohass

**PROTOCOLO
INDICADORES FÍSICOS
DE SUELO PARA
EL CULTIVO DE
AGUACATE HASS
EN COLOMBIA**





**PROTOCOLO
INDICADORES FÍSICOS
DE SUELO PARA
EL CULTIVO DE
AGUACATE HASS
EN COLOMBIA**

Versión 1

Elaboración - 2024

Publicación - 2025

WALTER OSORIO

Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.

Formado como Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, M.Sc. y Ph.D. en Agronomía y Ciencias del Suelo de la University of Hawaii (HI, USA). A través de la Universidad Nacional de Colombia ha realizado múltiples investigaciones a nivel de Pregrado, Maestría y Doctorado y ha publicado libros y artículos científicos de carácter nacional e internacional sobre el Manejo Integral de los Suelos y la Nutrición Vegetal de Cultivos Tropicales, especialmente a través de la caracterización de la salud del suelo (física, química y biología del suelo), en lo cual se incluye el uso de biofertilizantes.

A través de su empresa BIOFERTILIZAR S.A.S. diagnostica la fertilidad del suelo y es consultor de diversas empresas en manejo sostenible de suelos y nutrición de cultivos.

MESA TÉCNICA CONEXIÓN HASS

Royal Hass SAS	Luz María Mejía
Avofruit S.A.S.	Jenifer Patiño
Investigador asociado	Gilma Urrego
Camposol Colombia S.A.S.	Sandra Espinoza
Camposol Colombia S.A.S.	Walter Asmat
Green Superfood S.A.S.	Cristian Zuleta
Westfalia Fruit Colombia S.A.S.	Wilmar Pérez
Westfalia Fruit Colombia S.A.S.	Francisco Lorza
Westfalia Fruit Colombia S.A.S.	Johan Velásquez
Hass Naranjo S.A.S.	Wilson Giraldo
Ecofarms Colombia S.A.S.	David Lynce

EQUIPO CORPOHASS

Presidente Ejecutiva	Katheryn Mejía
Subdirectora de Sostenibilidad	Ana María Torres
Subdirectora de Proyectos	Betsy Bermúdez
Subdirectora Experiencia al afiliado	Francy Heredia
Subdirectora Administrativa y Financiera	Vanessa Zuluaga

TABLA DE CONTENIDO



INTRODUCCIÓN

9

ASPECTOS BÁSICOS DE LA FÍSICA DEL SUELO

12

¿Qué es el suelo?	12
Perfil y horizontes del suelo	14
Textura del suelo	15
Estructura y porosidad del suelo	17
Estabilidad estructural	18
Retención de humedad del suelo	18
Densidad aparente y densidad real	20
Porosidad y distribución de poros	21
Compactación	22
Color del suelo	24

SUELOS CULTIVADOS CON AGUACATE –INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO–

28

Suelos cultivados con aguacate	28
Indicadores físicos para el cultivo de aguacate	30
- Textura	
- Compactación, densidad aparente, porosidad y distribución de poros en el perfil del suelo	
- Color del suelo en superficie y profundidad, estabilidad de agregados, profundidad del nivel freático	
- Infiltración	
- Cobertura del suelo	
- Forma del relieve	

PROTOCOLOS DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

36

Textura	37
Compactación	40
Densidad aparente y Porosidad	40
Estabilidad de agregados	42
Profundidad del nivel freático	46
Infiltración	47
Forma de relieve	48
Cobertura del suelo	49

ESTUDIOS DE CASO EN EL MONITOREO DE PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS CULTIVADOS CON AGUACATE

51

REFERENCIAS

63

INTRODUCCIÓN

El aguacate Hass se ha constituido en uno de los principales renglones de la economía agraria en muchos municipios de Colombia, particularmente en algunas regiones de los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda, Valle del Cauca, Quindío, Tolima y Huila. Desde el 2000, el cultivo ha crecido notablemente, aumentando así su área de ocupación, dado el alto potencial que tiene en productividad y calidad. Desafortunadamente, en algunos casos, las plantaciones no han tenido el desempeño deseado; en algunas áreas, se ha mantenido con una baja productividad anual (<10 t/ha), mientras que otras han desaparecido por enfermedades radiculares asociadas al exceso de agua en el suelo (*Fusarium*, *Verticillium*, *Phytophthora*, entre otros). Esto se ha visto agravado por la excesiva precipitación que se ha presentado en algunos años.

Muy buena parte de los problemas pueden explicarse a partir de las condiciones del suelo, el inadecuado manejo del enclamiento y la fertilización, la calidad del material vegetal de trasplante y la incompatibilidad patrón-copa, entre otros aspectos. A mi manera de ver, este tipo de problemáticas del cultivo está asociado a la falta de programas de investigación sobre su manejo y al poco tiempo que llevamos trabajándolo en ambientes tropicales húmedos altoandinos. Por otro lado, las experiencias globales en el manejo del suelo y del cultivo poco aplican a nuestras condiciones locales, ya que, usualmente, este se ha cultivado en regiones subtropicales secas. Por lo anterior, es necesario desarrollar criterios de manejo del suelo y del cultivo propios que nos garanticen la sostenibilidad productiva.

En nuestro país, las regiones por encima de los 1800 m de altitud han sido menos estudiadas y usadas intensivamente en cultivos permanentes. Usualmente, estas se han destinado a pasturas y a cultivos semestrales cuyos sistemas radicales no profundizan mucho. En esa franja altitudinal lluviosa encontramos Andisoles ricos en materia orgánica, pero con baja biodegradabilidad; fuerte a extremadamente

ácidos, con valores moderados a altos de aluminio; muy baja disponibilidad de fósforo; bajos contenidos de bases intercambiables y niveles de disponibilidad de azufre bajos; así como micronutrientes relativamente buenos a altos (excepto para zinc y boro). Esto nos lleva a un manejo de encalamiento frecuente y alta fertilización, aspectos que no son comunes para muchos de los cultivos ya mencionados. Por otro lado, percibimos que estos suelos, ricos en materia orgánica y con texturas medianas, presentan en todos los casos buenas condiciones físicas. Al menos, eso era lo que creíamos al juzgar por lo que sabemos del horizonte superficial A (0-30 cm).

Sin embargo, al tratar de encontrar razones para el pobre desempeño y la muerte de muchas plantaciones de aguacate Hass, he encontrado que, en los horizontes intermedios (B: 30-60 cm) y más profundos (BC: 60-90 cm, C: > 90 cm), se encuentran horizontes compactados, gleyzados y con alto nivel freático, esto último asociado a relieves cóncavos o cambios abruptos de pendientes fuertes a medias y moderadas, en donde se acumula el agua. Esto, por supuesto, se constituye en un limitante para el adecuado desarrollo de las raíces, que limita la absorción de nutrientes y favorece el ataque de fitopatógenos.

Por tanto, en este documento trataré los temas asociados al diagnóstico de las condiciones físicas del suelo, con el fin de establecer unos límites adecuados para ellas, de tal manera que le permita a los agricultores, administradores y técnicos monitorearlas, establecer planes de manejo y tomar decisiones sobre la viabilidad y sostenibilidad del cultivo. Estos criterios han sido desarrollados a partir de las innumerables visitas que he realizado a varias plantaciones, midiendo las propiedades físicas del suelo en plantaciones con excelente, buen, mediano y pobre desempeño. Definitivamente, es necesario estudiar el suelo en profundidad.

En primera instancia, se considerarán aspectos básicos-teóricos para facilitar el entendimiento de los temas aplicados; luego los criterios propuestos y, finalmente los protocolos de medición elaborados con apoyo gráfico para facilitar su uso.

Walter Osorio

Medellín, noviembre 2024



CAPÍTULO 1



ASPECTOS BÁSICOS DE LA FÍSICA DEL SUELO

¿QUÉ ES EL SUELO?

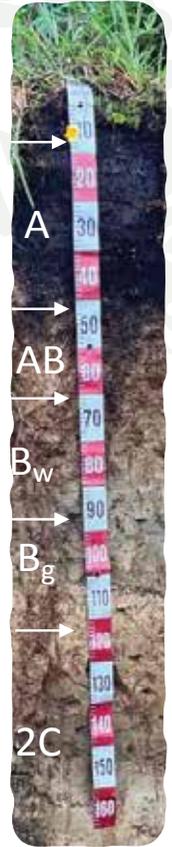
Entre las definiciones del suelo más completas está la publicada por el profesor G. Sposito (1984), en ella dice: *“El suelo es un medio poroso formado en la superficie terrestre por procesos de intemperismo que se derivan de la acción interactiva de fenómenos geológicos, hidrológicos y biológicos. El suelo difiere de la roca meteorizada por la presencia de estratos aproximadamente horizontales (horizontes) que se producen principalmente por una continua influencia del agua de percolación y de la acción de los organismos vivos. El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo. Desde el punto de vista químico, el suelo es un sistema multicompuesto, abierto y biogeoquímico que contiene sólidos, líquidos y gases. El que sea abierto significa que el suelo intercambia materia y energía con el medio (atmósfera, biosfera e hidrósfera). Estos flujos de materia y energía hacia o desde el suelo son variables en el tiempo y en el espacio, pero son esenciales para el desarrollo del perfil del suelo, determinan su fertilidad y en buena parte la nutrición vegetal”*. Un ejemplo del perfil se presenta en la Figura 1.

Esta definición empieza reconociendo ese componente esencial en la física del suelo: la fase porosa, en la cual fluye el aire y el agua de drenaje (macroporos) y en la que, al mismo tiempo se retiene el agua, o mejor, la solución del suelo (microporos). Una aplicación práctica de la física del suelo es estudiar el balance que debe haber entre macro- y micro-poros para que así, la planta/ árbol tenga suficiente oxígeno, agua y, en esta última, absorber los nutrientes disueltos en ella. Cuando un suelo tiene una alta proporción de macroporos sobre microporos, el suelo tendrá muy buena aireación, pero no retendrá suficiente agua, y los nutrientes disueltos en ella se lavarán del suelo. Por el contrario, si hay una mayor proporción de microporos en detrimento de los macroporos, el suelo tendrá mucha retención de agua, pero su aireación (suministro de oxígeno) será limitada. Las plantas necesitan el oxígeno para que sus raíces respiren y, así, puedan usar los fotosintatos que le son transferidos desde la parte aérea; de esa forma, podrá generar los ATP requeridos para los procesos de absorción de nutrientes, síntesis de nuevos compuestos, crecimiento y desarrollo de sus defensas contra patógenos. Las raíces gruesas crecerán entre los macroporos que se forman entre el espacio de agregados, mientras que las raíces finas crecen dentro de los agregados, donde se almacena la solución del suelo.

Figura 1. Perfil del suelo del municipio de Sonsón, Antioquia, cultivado con aguacate Hass. Note los horizontes ricos en materia orgánica en la superficie y los colores más claros en profundidad.

Este perfil no tiene horizonte O, ni E, el horizonte A tienen una profundidad entre 0-34 cm, el horizonte AB: 34-52, el B_w: 52-78 cm, B_g: 78-104 cm (color gris que denota que ha habido saturación y compactación del suelo que restringe el movimiento del agua), 2C: 104-160+ cm.

Foto y descripción del suelo:
N.W. Osorio, 2024.



De esta manera, el exceso de agua no es conveniente y, por eso, debemos monitorear que el suelo que escojamos para nuestros cultivos, sobre todos aquellos de carácter permanente, sea adecuado en el balance de macro y microporos. Esto cobra particular importancia para el cultivo de aguacate, que está reportado como sensible al exceso de agua en el suelo.

Adicional a lo anterior, el oxígeno es requerido por la población de microorganismos benéficos aeróbicos, que deseamos estén activos promoviendo la descomposición de la materia orgánica (nativa o aplicada), disolviendo minerales, fijando nitrógeno, simbiótica y asimbióticamente, estableciendo la asociación micorrizal y promoviendo el desarrollo y la sanidad de raíces.

PERFIL Y HORIZONTES DEL SUELO

El perfil del suelo es un corte vertical del suelo, que deja expuestos los diferentes horizontes que constituyen el suelo (Figura 1).

El horizonte O está compuesto principalmente por la hojarasca en diferentes estados de descomposición. Este horizonte está presente en los suelos de los bosques y plantaciones forestales; en los cultivos agrícolas y las pasturas, está ausente, ya que en la mecanización del suelo se incorpora la hojarasca al horizonte A. En la parte superior del horizonte O se pueden diferenciar las hojas de otros materiales; en la parte media, se detecta una transformación y fragmentación de materiales en virtud de la acción de insectos, lombrices, hongos y bacterias. En la parte inferior de este horizonte, las partículas están muy transformadas y no se pueden diferenciar unas de las otras a simple vista.

El horizonte A es un horizonte mineral, que representa la zona del suelo donde se combinan los minerales y la materia orgánica. Es una zona de alta actividad biológica, dada la presencia de raíces y microorganismos. La materia orgánica se descompone y se forman sustancias húmicas, que se integran a la matriz mineral para formar agregados más o menos estables. La presencia de materia orgánica (MO) le imprime al suelo colores negros a pardo-oscuros.

El horizonte E, llamado eluvial, es rico en cuarzo, de color blanco, y se forma a partir de suelos cuyo material parental es rico en este mineral, en regiones lluviosas, de superficies estables, más o menos planas, con poca erosión o remoción masal, que favorece la infiltración y el drenaje del suelo. Es poco común de encontrar.

El horizonte B es llamado iluvial o de acumulación, porque allí se acumulan iones, arcillas y humus, arrastrados por el agua desde horizontes suprayacentes. La actividad biológica es usualmente baja a media. En este horizonte se registra buena parte del proceso de evolución del suelo.

El horizonte C está constituido por el material parental que originó el suelo. En algunos casos, está compuesto por fragmentos de roca meteorizada envueltos en una matriz arcillosa o por partículas más finas cuando proviene de sedimentos (aluviales, eólicos). La actividad biológica es muy baja, por la baja concentración de O₂ y el bajo

contenido de materia orgánica. En algunos perfiles, se pueden encontrar discontinuidades litológicas entre el horizonte C y los horizontes más superficiales.

Entre estos horizontes principales, puede haber horizontes transicionales: AB, AE, EB y BC, en los cuales gradualmente se pierden las características del horizonte supra-yacente y aparecen las del sub-yacente. Los horizontes pueden subdividirse, para lo cual se usan números que siguen a la letra mayúscula; eventualmente, se pueden diferenciar por características muy específicas, que se designan con letras minúsculas. Cuando hay discontinuidad litológica, se usan números antes de las letras mayúsculas.

Se ha establecido que el límite inferior del suelo es el contacto con la roca continua o 2 metros, en cada caso, lo que sea más superficial. Así, debajo del suelo (subsuelo) tendremos, ya sea, la roca madre o los sedimentos a partir de los cuales se forma.

TEXTURA DEL SUELO

La textura del suelo está determinada por la proporción de arena, limo y arcilla en el material fino del suelo (< 2 mm). Las partículas del tamaño arena tienen un tamaño entre 2-0.02 mm; las del tamaño limo, están entre 0.02-0.002 mm, y las del tamaño arcilla, son <0.002 mm. En las partículas

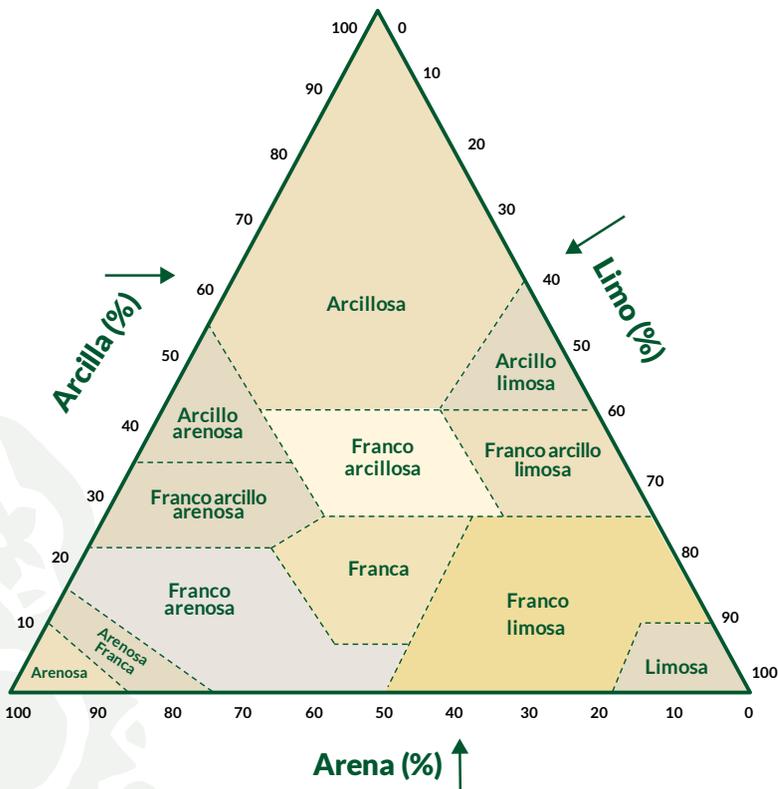
de arena se pueden encontrar minerales primarios resistentes a la meteorización, que se encontraban originalmente en el material parental del suelo, por ejemplo, cuarzo y feldspatos. En las partículas de limo, se tienen minerales en estado más avanzado de meteorización. En las partículas de arcilla, se tienen minerales de re-síntesis en el suelo (minerales secundarios), es decir, que se formaron en el suelo a partir de los productos de la meteorización de los minerales primarios. En esta fracción se destacan los filosilicatos cristalinos (clorita, vermiculita, montmorillonita, caolinita), no-cristalinos (alófana e imogolita) y los óxidos e hidróxidos de Fe y Al (goetita, hematita, gibsitita).

Dada la alta superficie específica de las partículas de arcilla, éstas son más activas física y químicamente. Estas partículas son responsables de la retención de agua del suelo y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y aniónico (CIA), que le permite al suelo retener iones (nutrientes) en contra del proceso de lixiviación.

Muchos de los suelos de la zona tropical húmeda (Oxisoles, Ultisoles) o formados a partir de cenizas volcánicas (Andisoles) tienen coloides arcillosos con carga positiva predominante en sus superficies, lo que les permite retener aniones (p.e., $H_2PO_4^-$, SO_4^{2-} , MoO_4^{2-}) y pocos cationes. La magnitud de esta carga positiva puede reducirse con el incremento del pH del suelo, convirtiéndose en carga negativa capaz de retener cationes (p.e., Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+).

De acuerdo a la proporción de arena, limo y arcilla, se generan 12 clases texturales (Figura 2). En general, se acepta que la clase textural franca es ideal para el crecimiento vegetal, sin embargo, en regiones lluviosas, para favorecer el drenaje y disminuir la excesiva retención de agua, se prefiere la clase textural franco arenosa. No obstante, esto trae más riesgo de tener lavado de nutrientes y, por ende, menos efectividad en la fertilización y menos sostenibilidad del efecto de enclamiento.

Figura 2. Triángulo textural y las clases texturales del suelo. Fuente: adaptado de Brady y Weil (1999).



ESTRUCTURA Y POROSIDAD DEL SUELO

Al tomar una muestra del suelo, se puede observar que hay dos fases: una sólida y una porosa. La fase sólida comprende la fracción mineral y la fracción orgánica. Las partículas sólidas están constituidas por agregados de diferente tamaño, comúnmente entre 0.5-3.0 cm. Estos agregados determinan una propiedad muy importante, llamada estructura del suelo. Cada agregado está constituido por partículas finas (arena, limo, arcilla y materia orgánica) (Figura 3).

Estas partículas están unidas entre sí por diferentes mecanismos, dentro de los cuales se destacan la presencia de iones de Ca^{2+} , Al^{3+} y Fe^{3+} , que actúan como agentes floculantes entre las partículas de arcillas y materia orgánica humificada (humus). Algunas sustancias excretadas por bacterias (exopolisacáridos) y hongos (p.e., glomalina) actúan como pegantes entre partículas. Igualmente, se pueden encontrar hifas de hongos y raíces, las cuales unen físicamente las partículas finas entre sí.

El arreglo de las partículas finas del suelo en los agregados determina, a su vez, la presencia de espacio poroso. Los poros grandes (>0.08 , >0.06 mm) son llamados macroporos: se encuentran entre agregados vecinos y permiten la circulación de agua y

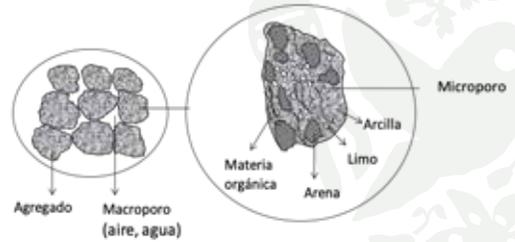


Figura 3. Las partículas finas del suelo (arena, limo, arcilla, materia orgánica) se unen para formar agregados. A la derecha una representación de agregados, entre ellos están los macroporos donde circula aire y agua de drenaje y dentro de los agregados (izquierda) están los microporos que retienen agua.

aire, además facilitan el crecimiento de raíces gruesas y la movilidad de pequeños insectos. Los poros finos (<0.08 , <0.06 mm) son llamados microporos y están dentro de los agregados. Estos son responsables de la retención de agua en el suelo, la cual es ejercida por partículas muy finas del suelo (arcillas y humus). Las raíces finas crecen dentro de los agregados y toman agua y nutrientes en el agua retenida entre estos microporos. En términos generales, se acepta que un suelo en buen estado de humedad para el crecimiento y actividad de raíces y microorganismos es aquel que tiene los microporos llenos de agua y los macroporos llenos de aire.

De esta manera, la estructura del suelo determina, en buena parte, la aireación del suelo y la retención de humedad. Entre los gases del suelo se destacan el N_2 , O_2 y CO_2 , entre muchos otros, los cuales se intercambian fácilmente con aquellos de la atmósfera. Cuando el suelo está saturado de agua, otros gases cobran gran relevancia: CH_4 , H_2S , N_2O , entre otros.

ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

Desafortunadamente, la estructura del suelo es una propiedad muy inestable. Algunas fuerzas físicas y químicas pueden hacer que los agregados se dispersen. Esto puede ocurrir por: el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie, la mecanización agrícola y el sobrepastoreo. Además, algunos iones dispersantes (p.e., Na⁺) pueden tener un impacto desfavorable en la estructura del suelo.

El daño físico del suelo permite que las partículas más finas (Ar) se liberen y taponen los poros del suelo, lo que reduce la infiltración y percolación del agua, la aireación, el intercambio gaseoso y, consecuentemente, aumenta la resistencia a la penetración de raíces. Al mismo tiempo, el suelo se hace más propenso a la erosión. Una forma de evaluar la estabilidad de la estructura del suelo consiste

en someter los agregados a agitación constante. Cuando las partículas chocan entre sí, la fricción y el impacto entre ellas pueden causar su dispersión total o parcial. Es decir, los agregados se pueden convertir en agregados más pequeños o, incluso, separarse en partículas primarias (A, L, Ar, MO).

RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

El suelo permite el flujo gravitacional del agua que está en los macroporos, mientras que, en los microporos, se retiene el agua por la matriz sólida debido a la fuerza de adhesión que opera entre partículas (arcillas y humus) y moléculas de agua, y a la fuerza de cohesión entre moléculas de agua. Adicionalmente, a estos poros se pueden encontrar mesoporos (intermedios) y nanoporos (muy finos) (Tabla 1).

TIPO	TAMAÑO (μm)	TENSIÓN (atm)*	FUNCIÓN
MACROPOROS	> 60	<0.05	Aireación, infiltración, conductividad hidráulica saturada.
MESOPOROS	10-60	0.05-0.33	Conducción lenta
MICROPOROS	0.2-10	0.33-15.0	Almacenaje, agua aprovechable
NANOPOROS	< 0.2	>15.0	Agua no disponible

*1 atm = 100 cbar

Tabla 1. Tipos de poros del suelo, tensión con la que retienen el agua y función en el suelo. Adaptado de Brady y Weil (2014).

La raíz puede tomar agua fácilmente, sin gastar energía, cuando esta retenida débilmente por el suelo.

En general, se considera que esta agua fácilmente aprovechable, está retenida entre 0.05-1 atm (5-100 cbar); sin embargo, esto puede cambiar entre especies vegetales y, muy probablemente, entre suelos. Cuando el agua se retiene por encima de 0.6-1.0 atm (60-100 cbar), la raíz debe gastar energía para absorberla, afectando así su capacidad de producir biomasa.

Tradicionalmente, se ha considerado que el agua entre 0.33-15 atm (33-1500 cbar) es agua aprovechable, pero cuando la humedad del suelo está retenida por encima de 0.6-1.0 atm, esto implica que la planta gaste energía y, entre más seco el suelo (y mayor retención), la planta entraría en un estado de estrés hídrico, deshidratándose y perdiendo su capacidad de absorber nutrientes y mantener su funcionalidad fotosintética y metabólica.

Por lo anterior, y de acuerdo con lo expuesto repetidamente por el Dr. Edgar Amézquita en sus continuas investigaciones en diferentes suelos, no se debe considerar el llamado punto de marchitez permanente (15 atm) como un criterio de manejo agronómico del riego, sino el punto de marchitez temporal (cercano a 0.6-1.0 atm). Esto debe ser materia de

investigación, no sólo en el escenario del manejo de riego, sino en el manejo del drenaje y la caracterización de las propiedades físicas, particularmente para el cultivo del aguacate.

Se han establecido unos rangos del contenido de humedad que se pueden usar para facilitar la interpretación del estado de humedad del suelo en relación con las plantas cultivadas. No hay un consenso único sobre el límite de los tamaños de los poros y de los contenidos de humedad. En algunos casos, se han desarrollado estos conceptos considerando la relación suelo-agua y dejando de lado a las plantas, pero es necesario reconciliar conceptos para aprovechar los aspectos teóricos y su utilidad en el diagnóstico, manejo y monitoreo de los sistemas productivos.

En ciertas ocasiones, es necesario determinar localmente lo que representa la capacidad de campo, para lo cual se requiere hacer mediciones. En general, la capacidad de campo se puede obtener en un suelo 24-48 horas después de terminado un aguacero. Eventualmente, esta se puede inducir aplicando agua a un suelo y dejándolo drenar durante ese periodo de tiempo. Surge la dificultad de medir esto en aquellos suelos que tienen restricciones en el drenaje debido a horizontes profundos compactados, adensados, impermeables y/o con niveles freáticos altos por la posición geomorfológica.

HUMEDAD	TENSIÓN (atm)*	INTERPRETACIÓN
SATURACIÓN	<0.05, <0.10	Suelo con macroporos llenos de agua. Se limita la aireación y, por ende, la disponibilidad de oxígeno para plantas y microorganismos benéficos. Esta agua fluye fácilmente por la gravedad.
	0.05-0.33 0.10-0.33	Suelo con macroporos llenos de aire, y con mesoporos y microporos llenos de agua. El agua fluye lentamente.
CAPACIDAD DE CAMPO	0.33-0.60	Suelo con macroporos y mesoporos libres de agua y con microporos llenos de agua. Esta agua es retenida con una fuerza moderada. Se considera que es a 0.33 atm el contenido de humedad es ideal para las plantas y los microorganismos del suelo. Se considera que este nivel de humedad se logra 24-48 horas después de un aguacero. Rango variable dependiendo del cultivo y el suelo.
UMBRAL DE RIEGO	0.6-1.0	Suelo con contenido límite de humedad fácilmente aprovechable, por debajo de este contenido la planta se deshidrata (temporalmente) y pierde capacidad para producir biomasa. Es la condición para iniciar riego. Esto debe ser calibrado/ajustado para cada planta-suelo.
PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE	15	Suelo con un contenido de humedad tan bajo y con el agua retenida con tanta fuerza que la planta se mantiene deshidratada permanentemente. No se debe considerar llegar a este contenido de humedad. Eventualmente las plantas podrían llegar a absorber agua a este punto, pero a costa de su productividad.

Tabla 2. Contenidos de humedad del suelo, rangos de tensión asociada e interpretación. Adaptado de Brady y Weil (2014).

DENSIDAD APARENTE Y DENSIDAD REAL

Densidad aparente (Dap)

La densidad aparente (Dap) del suelo es una de las propiedades físicas más importantes. Al conocer el valor de la Dap del suelo, se pueden hacer estimaciones de la masa de suelo por unidad de volumen, lo cual es necesario en la determinación del requerimiento de cal, fertilizantes, enmiendas orgánicas y agua de riego.

Igualmente, la Dap permite hacer estimaciones del espacio poroso del suelo, el cual determina el movimiento y retención de agua y el intercambio gaseoso con la atmósfera.

La Dap varía con cambios en el contenido de materia orgánica, profundidad, textura, y contenido de humedad (en suelos expansivos), entre otros. La Dap también es un indicador del grado de compactación del suelo. Un incremento en su valor sugiere daño de la estructura del suelo y, en consecuencia, un nuevo arreglo de las partículas sólidas y una reducción en el espacio poroso.

La Dap puede ser definida a través de la siguiente fórmula:

$$Dap = Mss \div Vt$$

Donde,

Mss = masa del suelo seco

Vt = volumen total del suelo

Tradicionalmente, las unidades de la Dap han sido g/cm³, sin embargo, con el sistema internacional de unidades se recomienda usar Mg/m³. Los valores numéricos son iguales, es decir, que 1 g/cm³= 1 Mg/m³.

Los suelos orgánicos tienen valores entre 0.3-0.5 Mg/m³; los suelos derivados de cenizas volcánicas: < 0.9 Mg/m³, los suelos minerales: 1.0-1.3 Mg/m³. Se consideran compactados los suelos minerales con valores >1.3 Mg/m³ (suelos de textura fina), >1.4 Mg/m³ (textura media) y >1.6 Mg/m³ (textura gruesa).

Densidad real de partículas (Drp)

En el suelo existe también el concepto de densidad real de partículas (Drp), esta hace referencia a la relación entre la masa seca de una muestra de suelo y el volumen que ocupan estas partículas sólidas. Es decir, no se tiene en cuenta el volumen del espacio poroso.

$$Drp = Mss \div Vs$$

Donde,

Mss = masa del suelo seco

Vs = volumen de los sólidos del suelo

Esta puede tomar valores muy variables según la mineralogía del suelo. En suelos minerales la Drp tiene valor promedio de 2.65 g/cm³ (2.5-2.8 g/cm³), lo cual coincide con el valor de Drp de algunos minerales (arena y limo): cuarzo 2.65 g/cm³, feldespatos 2.5-2.8 g/cm³, micas 2.7-3.3 g/cm³, apatita 3.1-3.3 g/cm³, Drp de arcillas: 2.86 g/cm³.

Por su parte la Drp del humus es más baja: 1.3-1.5 g/cm³. Por ende, al aumentar el contenido de materia orgánica (MO) disminuye el valor de la Drp del suelo. Los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles; MO > 15%) tienen valores de 1.9-2.2 g/cm³.

Porosidad y distribución de poros

Para medir la porosidad total (Pt) del suelo se utiliza la siguiente fórmula:

$$Pt (\%) = 100 \times [1 - (Dap \div Drp)]$$

Donde,

Dap = densidad aparente

Drp = densidad real de partículas

Como se mencionó, los suelos exhiben microporos (mp) y macroporos (Mp), que cumplen diferentes funciones en el suelo. Por lo tanto, es más útil conocer su distribución que el valor de la porosidad total (Pt) del suelo.

En general, se considera que una Pt de 50-60% es adecuada para el crecimiento de las plantas. Asimismo, se considera que una distribución de poros equitativa es adecuada.

Se puede aceptar que los microporos y macroporos pueden estar entre 25-30%, cada uno. Algunos autores han propuesto que, como mínimo, se debe tener 15% de cada uno de ellos.

COMPACTACIÓN

Un parámetro físico del suelo que va ganando mucho interés es la resistencia mecánica a la penetración (RMP) o compactación. Para determinarla, se introduce una punta metálica en forma de cono en el suelo a diferentes profundidades y se mide la resistencia que ejerce el suelo a dicha penetración, la cual es registrada en un sensor análogo o digital.

Las unidades de medida son PSI (libras por pulgada cuadrada) o kg/cm² o kPa (kilopascales). Si la RMP del suelo es < 200 PSI, se considera que es baja y no será restrictiva al crecimiento de las raíces; algunas han bajado el límite a <150 PSI. Por el contrario, si la RMP es > 300 PSI (o > 250 PSI), se espera que las raíces no podrán crecer bien debido a la resistencia que ejerce el suelo a dicha penetración.

Si se considera el penetrómetro de bolsillo (ver Figura 4) los límites son: <1.5 kg/cm²: no compactación, 1.5-3.0 kg/cm²: compactación; >1.5 kg/cm²: compactación severa.

Esta compactación está asociada a un adensamiento del suelo ocasionado por una pérdida de la estructura del suelo causada por sobrepastoreo, sobremecanización u otros factores.

De esta manera, las partículas finas del suelo se reacomodan y ocupan los macroporos, por donde crecen las raíces gruesas y circulan el agua y el aire.

Las medidas se pueden tomar en el área de crecimiento de raíces, o en las calles para hacer comparaciones o entre lotes vecinos. Se puede usar un monitoreo en cuadrícula para establecer un mapa de la distribución espacial de la variable.

Indudablemente, medir la RMP es un herramienta de diagnóstico general y rápida de problemas físicos del suelo, que, al combinarse con otras medidas, ofrece una evaluación del estado físico del suelo. Igualmente, se puede comparar con el desempeño de la planta y, muy particularmente, con el crecimiento de raíces (longitud, grosor). Igualmente, al estar compacto el suelo, se restringe la entrada (infiltración) y circulación (percolación) de agua en el suelo, así como la capacidad de las raíces para crecer en el suelo y absorber los nutrientes.

Se recomienda que las medidas se hagan en un estado de humedad similar, ya que esto puede afectar el valor. La presión que se ejerce sobre el equipo para introducir la punta debe ser más o menos constante y firme. Los valores se pueden registrar en función de la profundidad (usualmente hasta 60 cm), y así se pueden detectar “piso de arado” u horizontes compactados o cementados. Algunos equipos funcionan con puntas metálicas de diferente diámetro, y esto debe ser

considerado en la medición e interpretación. Otros equipos son más pequeños (de bolsillo) y se pueden utilizar para lecturas más puntuales y dentro de las calicatas (Figura 4).

En Andisoles, sin mecanización y cultivados orgánicamente, se han encontrado valores de 50-100 PSI, mientras que en los cultivados con mecanización continua y con agricultura convencional, los valores pueden estar entre 200 a 250 PSI.



Figura 4. Uso de penetrómetro de punta (izquierda) y su respectivo manómetro (centro). Penetrómetro de bolsillo (derecha).

INFILTRACIÓN DE AGUA

La infiltración de agua en el suelo es un aspecto clave en el funcionamiento de los ecosistemas. Parte del agua que se infiltra será luego retenida, para luego proveerla a las raíces de plantas que crecen en el suelo y, al no correr por escorrentía, sirve para regular los caudales de la cuenca. De esta manera, se puede establecer que, de una buena infiltración, dependerá la erodabilidad del suelo y su capacidad para facilitar el crecimiento vegetal.

La infiltración se mide a través de la velocidad de infiltración. Esta se refiere al ingreso de una lámina de agua en un periodo de tiempo dado. Al inicio, la velocidad de infiltración es rápida, en parte debido a que el suelo puede estar relativamente seco, y luego la velocidad va disminuyendo hasta volverse constante. Este valor es llamado velocidad de infiltración básica. Por lo anterior, es necesario hacer varias mediciones, y estas pueden durar al menos una hora o, a veces, más.

Se ha considerado que, al medir la infiltración del suelo, se evalúa integralmente el estado físico del suelo, particularmente de la textura, de los macroporos y la estructura misma. Así, un suelo que presente una buena infiltración se espera que tenga una buena estructura y porosidad, buena percolación al interior del perfil y baja erodabilidad. Una infiltración muy alta denota un suelo muy arenoso, mientras que una baja infiltración indica la pérdida de estructura, baja macroporosidad y alta erodabilidad en ladera o encharcamientos en zonas planas.

El valor de la velocidad de infiltración es útil en los sistemas de riego para planificar la cantidad y duración del riego que se le da al cultivo.

COLOR

El color del suelo es una propiedad física de interés en su descripción y, en algunos casos, puede ser útil para el manejo y el diagnóstico de otras propiedades del suelo. Normalmente, es un indicador de la presencia/dominancia de minerales, contenido de materia orgánica, condiciones de óxido-reducción, entre otros. Si bien hablamos de color del suelo, es importante aclarar que, normalmente, un suelo tiene varios colores en sus horizontes, pero en algunos casos, es de un solo color.

Los colores comúnmente encontrados en los suelos son negro, café, rojo, amarillo, blanco y gris. El **color negro** está usualmente asociado a la materia

orgánica, de tal manera que, a mayor contenido de esta, el color es más oscuro. De hecho, en los Andisoles (derivados de ceniza volcánica) existe, en su taxonomía, el concepto de horizonte melánico para denotar el alto contenido de materia orgánica humificada. Esto puede relacionarse a climas fríos, en los cuales la materia orgánica no se mineraliza, sino que se humifica. También puede ser el resultado de anegamiento, que no permite una rápida descomposición de la materia orgánica.

Sin embargo, el color negro en el suelo puede deberse a la presencia de pirolusita $[MnO_2]$, biotita $[K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH, F)_2]$, a residuos de carbón de quemas, y en algunos casos, la superficie del suelo desnudo puede lucir oscura por la presencia de costras de algas secas. En cualquier caso, una observación detallada y algunas pruebas de campo con H_2O_2 puede ser útil para discernir la razón del color.

El **color rojo** es indicador de la presencia de óxidos de hierro en estado férrico (+3). Este color puede estar presente en todo el perfil, como sucede en algunos Oxisoles y Ultisoles, o en algunos horizontes de varios tipos de suelos. Sin embargo, es importante no asumir que todo suelo rojo es altamente meteorizado, ya que suelos poco evolucionados de regiones secas tienden a dar colores rojizos muy marcados. El color amarillo, normalmente, indica la presencia de óxidos de hierro hidratado, lo que sugiere una moderada limitación de drenaje.

El **color gris**, normalmente, denota gleyzación, es decir, saturación de agua por periodos muy largos, que generan una fuerte reducción de elementos. También puede indicar alternancia de periodos de oxidación y reducción cuando hay moteados (combinación de colores grises y rojos). Esto se debe a que, cuando falta el oxígeno, el hierro es reducido de Fe^{3+} a Fe^{2+} . El primero reacciona con oxígeno y OH^- , y se precipita formando compuestos insolubles de color rojo. El segundo es un ión más soluble, que tiende a moverse con el flujo del agua de drenaje que lo arrastra. Cuando un suelo así se seca, se vuelve de color gris. También el color gris puede deberse a colores propios de los minerales (litocrómicos), que le heredan la coloración sin que ocurra gleyzación. Esto debe ser revisado cuidadosamente.

Los **colores café o pardos** son, en muchos casos, la combinación de materia orgánica con algunos de los anteriores, dando lugar a tonalidades como pardo rojizo, pardo amarillo, pardo gris. En este caso, el contenido de materia orgánica no es tan alto (< 7%).

Color púrpura: algunos suelos pueden presentar tonalidades moradas por la combinación de óxidos de hierro férrico y óxidos de manganeso.

El **color blanco** está asociado a varios minerales: arenas cuarcíticas y arcilla caolinita, formadas en ambientes

lluviosos. Asimismo, puede deberse a la presencia de carbonatos de calcio. La determinación de la textura y la reacción positiva a HCl pueden indicarnos la diferencia. El **color rosado** puede resultar de una mezcla de caolinita y óxidos de hierro férrico.

El **color verde** oliva no es tan común, pero se puede observar en algunos horizontes asociados al tipo de material parental rico en minerales como serpentina, antigorita y olivino, ricos en magnesio. Algunos ejemplos de colores pueden observarse en las Figuras 5A-5D.



Figura 5A. Diversidad de colores en muestras de suelos.



Figura 5B. Suelo predominantemente blanco. La Unión, Antioquia, Colombia.



Figura 5D. Suelo con tonalidades gris-oliva en superficie, amarillo en profundidad.



Figura 5C. Suelo predominantemente rojo (Oxisol). Puerto Gaitán, Colombia.



CAPÍTULO 2



SUELOS CULTIVADOS CON AGUACATE: INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO

SUELOS CULTIVADOS CON AGUACATE

En busca de suelos y condiciones climáticas adecuadas para el cultivo de aguacate cv. Hass, se han escogido suelos de clima frío. En particular, en la región Andina, estas zonas están ocupadas por suelos derivados de cenizas volcánicas, llamados Andisoles en la clasificación del USDA y Andosoles en la clasificación de la FAO.

Estos suelos predominan en regiones como el Oriente Antioqueño, el Suroeste Antioqueño, parte del Norte de Antioquia, Norte de Caldas, Risaralda, Quindío, las zonas montañosas y húmedas del Tolima y Huila y la parte montañosa del Norte del Valle del Cauca (Figura 6). Algunas de las características sobresalientes son:

Figura 6. Andisol ácido y arenoso, cultivado con aguacate en Abejorral, Antioquia.

Note el color negro en el horizonte superficial que denota alto contenido de MO (baja biodegradabilidad).

En la parte media del perfil se observan colores rojos que indican condiciones aeróbicas; en profundidad hay un color gris que indica gleyzación.

El barreno tiene 1 metro de longitud.



CARACTERÍSTICAS	VALOR	IMPLICACIONES
ALTO CONTENIDO DE MO	10-30%	Baja tasa de degradación de la MO; muy baja mineralización del N; deficiencia de nitrógeno para el cultivo.
BAJA DENSIDAD APARENTE	0.6-0.8 g/cm ³	Aireación. Alta retención de agua.
TEXTURAS GRUESAS	F, FA, AF	Lixiviación de Ca, Mg, K, baja eficiencia de la fertilización y baja sostenibilidad del encalamiento.
PH BAJO	< pH 5.5	Extremadamente-fuertemente ácido, alta probabilidad de encontrar toxicidad por Al en las plantas cultivadas. Alta disponibilidad de Fe y Mn; este último se ha encontrado causando toxicidad en algunas regiones del Suroeste Antioqueño.
ALOFANA COMO COLOIDE ARCILLOSO	-	Carga positiva a pH < 6, alta lixiviación de bases, particularmente K, en zonas lluviosas; alta superficie específica: alta fijación de P; baja disponibilidad de P (P-Bray II < 10 mg/kg; bajo; P en solución del suelo, 0.002-0.05 mg/L). Alto requerimiento de fertilizante fosfórico.
BAJA DISPONIBILIDAD DE ZN Y B	Zn < 3 mg/kg B < 0.5 mg/kg	Estas deficiencias producen bajo cuaje de frutos ya que ambos elementos determinan la viabilidad del polen.

— **Tabla 3.** Característica de los Andisoles de la región alto-andina Colombiana.

INDICADORES FÍSICOS PARA EL CULTIVO DE AGUACATE

A continuación, se presentan los indicadores físicos del perfil del suelo recomendados para aguacate cv. Hass en Colombia. Es importante resaltar que los valores que se reseñan hacen referencia al perfil de suelo en los primeros 0-100 cm (Tabla 4).

La clase textural, en sí misma, no parece ser un limitante para el cultivo de aguacate cv. Hass, ya que se ha

reportado que se han establecido plantaciones en otros países (p.e., Suráfrica, Australia) en suelos arcillosos con niveles de precipitación bajos (<1500 mm/año). El punto es que, en las zonas donde se cultiva aguacate cv. Hass en Colombia, se reciben al menos 2000 mm/año, y en años lluviosos puede fluctuar entre 3000-4000 mm/año. Esa combinación es la que puede generar problemas.

En algunos casos, se han encontrado árboles de aguacate cv. Hass creciendo bien en suelos franco-arcillosos y de regiones lluviosas de Betulia, Antioquia, pero con mucha pedregosidad, lo que favorece el drenaje. Sin embargo, esta es una excepción, ya que en muchos casos

se encuentra, debajo de un suelo derivado de ceniza volcánica de textura Franco-Arenosa, horizontes arcillosos derivados del Batolito Antioqueño, lo cual crea no sólo una discontinuidad litológica, sino también hidráulica, que no favorece el desarrollo de las raíces en profundidad. Esto es bastante común en el departamento de Antioquia.

Medir el grado de compactación del suelo se ha constituido en una práctica cada vez más común en algunas plantaciones de aguacate de Colombia (Tabla 5).

Es importante considerar que el suelo debe estar húmedo, ya que, si está relativamente seco, los valores aumentan de forma natural. Especial atención hay que poner en el uso de las puntas en el penetrómetro de punta; una de ellas es de ½ pulgada, mientras que la otra es de ¾ de pulgada, y cada una de ellas tiene un arco distintivo en el manómetro que permite su lectura correcta. Esto debe ser tenido en cuenta porque es una fuente de error algo común.

Tabla 4. Condición textural del perfil del suelo para el aguacate hass en Colombia.

CALIFICACIÓN	ARCILLA	LIMO	ARENA	TEXTURA*
	%	%	%	CLASE
FAVORABLE	<25	10-30	50-75	FA
CRÍTICO	25-30	30-60	75-90	FAR
DESFAVORABLE	>30	>60	>90	Ar

*FA= Franco arenosa; FAR= Franco arcillosa; Ar= Arcillosa.

CALIFICACIÓN	COMPACTACIÓN		DAP	DRP	POROSIDAD TOTAL	MICROPOROS	MACROPOROS
	*PSI	**kg/cm ²	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%
FAVORABLE	<200	<1.5	<1.0	<2	40-60	25-30	25-30
CRÍTICO	200-300	1.5-3.0	1.0-1.2	-	30-40	30-40	15-25
DESFAVORABLE	>300	>3.0	>1.2	>2	<30	>40	<15

*Penetrómetro de punta; **Penetrómetro de bolsillo.

Tabla 5. Compactación, densidad aparente, porosidad y distribución de poros en el perfil del suelo.

La densidad aparente (Dap) puede ser medida a través del método del cilindro bicelado. Normalmente estos son metálicos, pero en suelos con alto contenido de MO y derivados

de ceniza volcánica, se puede usar aquellos hechos de PVC. Es importante que sean bien elaborados, con medidas precisas de diámetro y altura, para así garantizar un volumen

bien determinado. Alternativamente, la densidad aparente puede medirse a través del método del terrón parafinado o a través del método del hoyo, lo cual se explica más adelante en el texto.

La Densidad real de partículas (Drp) se mide tradicionalmente a través del método del picnómetro.

La porosidad total se mide a través de la fórmula con Dap y Drp:

$$Pt (\%) = 100 \times [1 - (Dap/Drp)]$$

Para el caso de la distribución de poros, se puede medir el contenido de humedad gravimétrico a capacidad de campo (θ_{ccg}) (24-48 h después de un aguacero) y, con esto, determinar el contenido de humedad volumétrico, el cual coincide, a este nivel de humedad, con el volumen de microporos:

$$\theta_{ccg} = 100 \times [(Masa\ suelo\ humedo - Masa\ suelo\ seco) / Masa\ de\ suelo\ seco]$$

$$\theta_{ccv} = \theta_{ccg} \times Dap = \text{volumen microporos}$$

$$Pt (\%) = \text{volumen de macroporos} + \text{volumen de microporos}$$

$$\text{Volumen de macroporos (\%)} = Pt - \text{volumen de microporos}$$

Lo anterior aplica bien si no hay restricciones en el drenaje del suelo impuestas por un horizonte compactado o un nivel freático alto (a < 50 cm de profundidad).

El color del suelo es un indicador cualitativo de interés, de fácil detección, y por eso recomiendo que se tenga en cuenta (Tabla 6). En superficie, donde tenemos las raíces más activas, es deseable que el suelo sea de color negro, lo cual denota un alto contenido de materia orgánica, >10%. Cuando es color pardo (café), el valor de materia orgánica es un poco más bajo, normalmente en el rango de 4-8%.

Cuando es más claro o pálido (amarillo, rojo, gris, etc.), indica que hay un bajo contenido de MO (< 3%), lo cual no es deseable porque sugiere una estructura inestable. Si es gris, podría ser el peor escenario, porque podría indicar gleyzación en o cerca de la superficie.

CALIFICACIÓN	COLOR EN LA SUPERFICIE	COLOR EN PROFUNDIDAD	ESTABILIDAD DE AGREGADOS	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO	INFILTRACIÓN
	(< 30 CM)	(< 100 CM)	%	CM	MM/H
FAVORABLE	Negro	Rojo	75-100	>100	10-20, >20
CRÍTICO	Pardo	Moteados grises	50-75	< 100	5-10
DESFAVORABLE	Gris	Gris	< 50	<50	<5

Tabla 6. Color del suelo en superficie y profundidad, estabilidad de agregados al agua, profundidad del nivel freático, infiltración.

En profundidad, donde no hay tantas raíces activas, no es necesario que el suelo sea de color oscuro. En este punto, es importante que no sea gris; si es de color rojo, sugerirá que hay buena aireación. Esto deberá ser cruzado con los datos de otras variables, p.e., la porosidad, la densidad aparente, entre otras. Es importante que el color gris de la gleyzación no se deba a colores litocrómicos asociados a minerales de color gris en el material parental.

La estabilidad de agregados se recomienda medirla a través del método de Yoder, en el cual el suelo se somete a una agitación mecánica en húmedo (con agua) en un juego de tamices. Si el suelo es estable, permanecerá en una gran proporción (>75%) con el tamaño original de la muestra (4-5 mm de diámetro); en caso contrario, los agregados de la muestra se dispersarán y se irán colando hacia tamices finos.

La profundidad del nivel freático puede ser usada como un indicador efectivo y de fácil implementación (Tabla 6). Esto puede ser realizado a través de la instalación de pozos de observación (piezómetro o freatómetro). Para esto, se instala un tubo de PVC de 2-3 pulgadas de diámetro y de 1.5 m de longitud en el sitio que se desea medir.

El tubo se entierra verticalmente, de manera que sobresalga 50 cm de la superficie. La longitud del tubo que quedará enterrada se perfora muchas veces con una broca, de tal manera que el agua de saturación del suelo fluya a través de estos huecos.

El sitio en el que se instala el freatómetro puede ser escogido al azar o según un patrón de distribución asociado a lotes en buen estado, enfermos o improductivos; en zonas donde hay cambios de pendiente o concavidades; en las zonas bajas de la pendiente y donde se sospeche que haya un alto nivel freático.

COBERTURA DEL SUELO

La presencia de cobertura muerta (mulch) o con cultivos de cobertura, por supuesto, no es una propiedad física, pero tiene implicaciones en el suelo y las raíces. En primer lugar, al estar cubriendo el suelo, estas protegen la superficie del suelo del impacto directo de las gotas de lluvia, las cuales tienen la energía cinética para destruir agregados. Estos materiales finos dispersos pueden llenar macroporos del suelo en la superficie y causar sellamiento. Esto reduce la infiltración, la aireación y promueve el encharcamiento en zonas planas o cóncavas, o la escorrentía en pendientes, con el consecuente riesgo de erosión.

Adicionalmente, las coberturas pueden mantener la temperatura de la superficie del suelo a niveles favorables para el funcionamiento de las raíces y de los microorganismos del suelo. Igualmente, reducen las pérdidas de agua de la superficie, evitando así que las raíces se deshidraten.

Con frecuencia, se encuentran plantaciones con suelo descubiertos, en los cuales escasean las raíces. Por el contrario, cuando hay cobertura, tales como residuos de desyerbas de arvenses, residuos de cosechas, podas, compost, entre otros, hay una mayor abundancia de raíces finas y sanas en la superficie.

Persiste la preocupación de que las coberturas, al mantener el suelo más húmedo, pueden facilitar la incidencia de enfermedades e insectos plaga, pero no hay evidencia experimental sobre esto. Y, si así fuese, habría que tratar de resolver esa situación de otras formas en lugar de mantener el suelo descubierto.

Las investigaciones realizadas por Tamayo en plantaciones de aguacate en Antioquia, monitoreando el aporte y la descomposición de hojarasca que generan los mismos árboles de aguacate (>7 años), muestran que esto ayuda a mantener mejores niveles de fertilidad del suelo que cuando no existe tal hojarasca.

FORMA DEL RELIEVE

La forma del terreno tiene una influencia significativa en la cantidad de agua que le llega al suelo y que, en muchos casos, no se puede evacuar durante los períodos más lluviosos del año.

Por ejemplo, cuando luego de la pendiente sigue hacia abajo un relieve plano o cóncavo, en ese caso el agua tiende a acumularse y los árboles que se establecen en esos sitios tienen un desempeño muy deficiente o mueren.

Igualmente sucede en las zonas de concavidades de pendiente, ya que allí confluyen aguas de varias vertientes, particularmente si están en el piedemonte de largas pendientes. En esas zonas, nuevamente, los árboles comúnmente se enferman y mueren.

Estos sitios son muy fáciles de detectar y se debe evitar sembrar en ellos. Así, se pueden reducir muchos problemas y evitar pérdidas económicas y poner en riesgo los árboles vecinos que podrían enfermarse.

An aerial photograph showing a dense forest of small, rounded trees on the left, which gradually transitions into a grassy field on the right. The trees are mostly green, with some showing yellowish-brown hues. The field is a mix of green and brown grass, with a faint dirt path visible. A bright green, irregularly shaped graphic element is overlaid at the bottom of the image.

CAPÍTULO 3



PROTOCOLOS DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

TEXTURA

Con este método se pretende determinar en el laboratorio los porcentajes de A, L y Ar de muestras de suelo tomadas a diferentes profundidades en el perfil del suelo (0-30, 30-60, 60-100 cm). Se espera que en el perfil los valores de arcilla sean <25%. Un contenido de arcilla del 25-30%, es crítico; pero si es en una zona relativamente adecuada, se podría ser viable su siembra. No se recomienda sembrar un campo que en su perfil tenga >30% de arcilla.

El método de Bouyoucos es el estándar para determinar la textura del suelo. Este se basa en la ley de Stokes, según la cual “la velocidad de sedimentación de partículas sólidas en un medio líquido depende del tamaño de cada partícula”. A mayor tamaño de la partícula, mayor será su velocidad de sedimentación.

Para que el método de Bouyoucos funcione adecuadamente, es necesario dispersar los agregados estructurales del suelo. De esta forma, las partículas del suelo (Arena, Limo y Arcilla) que forman los agregados se separan unas de otras y pueden sedimentarse en agua en función de su tamaño.

Para dispersar los agregados de una muestra de suelo de 50 g (100 g si el suelo es muy arenoso) se adicionan 10-20 cm³ de una solución

dispersante. Simultáneamente, se realiza una dispersión mecánica, para ello la muestra de suelo se agita con una batidora durante 10 minutos. Luego, la muestra es transferida a un cilindro graduado de 1000 cm³ y se ajusta el volumen con agua corriente. Nuevamente, la muestra se agita vigorosamente con un émbolo por unos 5-10 segundos. Al terminar la agitación, el cilindro se coloca sobre una mesa y, luego de 40 segundos, las partículas más gruesas (arena) se han decantado en el fondo del cilindro. En este momento, se usa un instrumento llamado **hidrómetro** (ASTM-152H).

El hidrómetro mide la densidad del líquido en el cilindro. La densidad del líquido está afectada por las partículas suspendidas en él. La lectura del hidrómetro muestra la masa de las partículas que están suspendidas en el agua en un momento dado. A 40s, la lectura del hidrómetro muestra la masa (g) de limo y arcilla suspendidas, pues la arena ya se ha decantado. El limo se decanta en 2 horas, así que una medida a ese tiempo indica la masa de la arcilla suspendida. Las arcillas tienden a permanecer en suspensión por períodos de tiempo más largos (días).

Procedimiento:

- Transfiera 50 g de suelo seco al vaso de la batidora.
- Adicione 200-300 cm³ de agua y 20 cm³ de solución dispersante.

- Agite durante 10 minutos.
- Transfiera la suspensión a un cilindro graduado de 1000 cm³ y agite.
- Veinte segundos después de que se ha interrumpido la agitación, inserte cuidadosamente el hidrómetro en el líquido.
- Registre la lectura del hidrómetro en la parte baja del menisco a los 40 s y 2 h. Igualmente, registre la temperatura en ambos tiempos. Use su dedo para estabilizar el flotamiento del hidrómetro.
- Sea cuidadoso con el hidrómetro. Es frágil y costoso.

Cálculos y determinación de la clase textural

El método de Bouyoucos, fue calibrado para trabajar a 19.4°C. Si la temperatura del líquido incrementa, las partículas caen más rápidamente que si el líquido es más frío; debido a diferencias en la viscosidad del agua. Por esta razón, es necesario adicionar 0.2 g L⁻¹ a la lectura del hidrómetro por cada grado centígrado por encima de 19.4°C, o sustraer 0.2 g L⁻¹ a la lectura por cada grado centígrado por debajo de 19.4°C.

Luego de realizar las correcciones respectivas, se utilizan las siguientes fórmulas para calcular los contenidos de A, L y Ar:

$$\text{Arena (\%)} = [(50 \text{ g} - \text{lectura a } 40 \text{ s}) / 50 \text{ g}] \times 100$$

$$\text{Arcilla (\%)} = (\text{lectura a } 2 \text{ h} / 50 \text{ g}) \times 100$$

$$\text{Limo (\%)} = 100 \% - A (\%) - \text{Ar} (\%)$$

Una vez determinados los porcentajes de arena, limo y arcilla, se procede a ubicar la muestra dentro del triángulo textural (Figura 2) para definir su textura.

Estimación de la textura al tacto

La estimación de la textura al tacto cobra importancia para trabajos de campo, que luego son validados en el laboratorio. Además, dadas las dificultades para determinar con exactitud los contenidos de arcillas de algunos suelos (Andisoles) a través del método de Bouyoucos, es importante conocer el método al tacto para validar o corregir medidas hechas en laboratorio.

En la Figura 7 se presenta una guía para la estimación de la textura al tacto. Se pueden considerar varios criterios secuenciales: (i) formación o no de una bola al amasar la muestra de suelo húmedo, (ii) formación o no de una cinta de una longitud de al menos 2.5 cm, 2.5-5.0 cm, > 5.0 cm, (iii) predominancia de granos visibles (arena) y suavidad (limo).

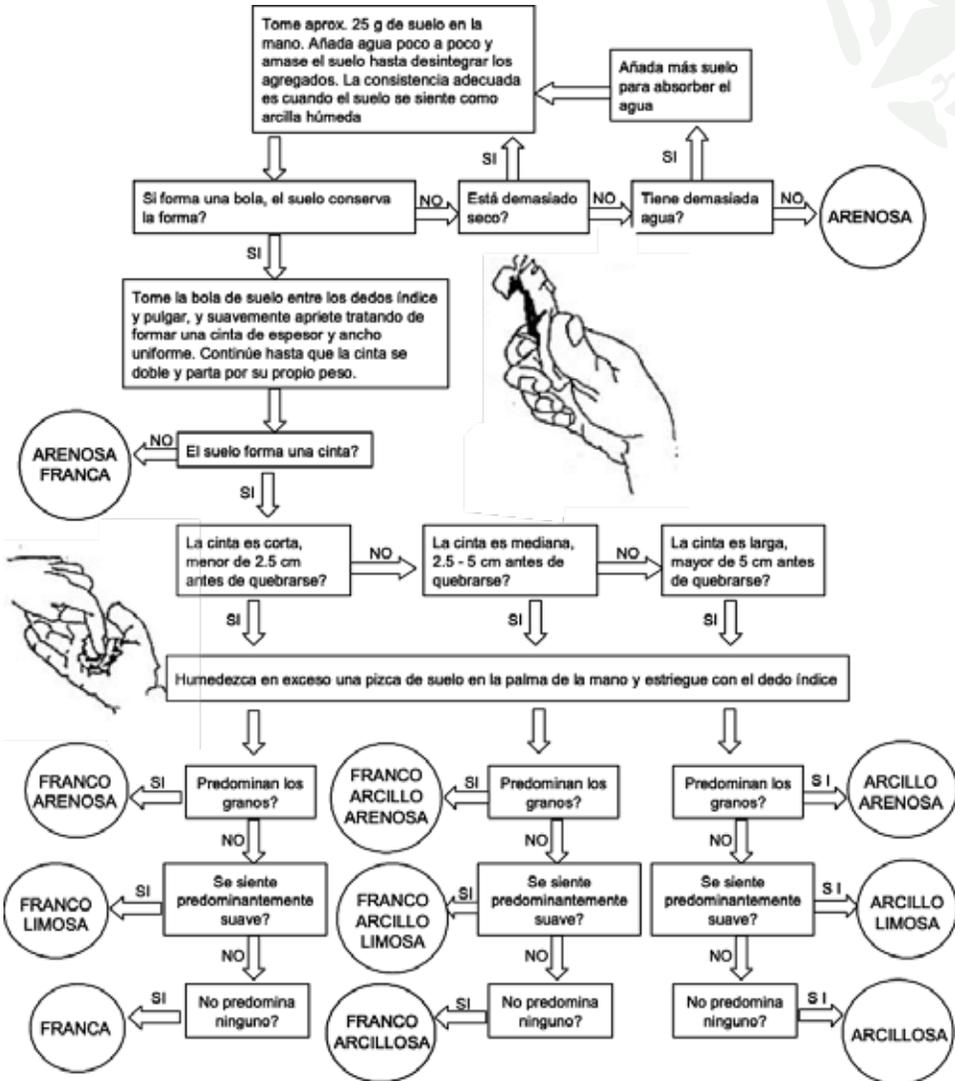


Tabla 7. Diagrama para la estimación de textura en campo (modificado de Harris, 2005).

COMPACTACIÓN DEL SUELO

La idea es determinar el grado de compactación del suelo en el perfil, lo cual puede hacerse cada 20 cm (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) o hacer las mediciones en función de los horizontes presentes en el perfil. Si se usa el penetrómetro de punta desde la superficie, es importante considerar que este normalmente tiene 75-80 cm de longitud, por lo que será necesario abrir huecos para poder alcanzar la profundidad seleccionada. Si se hacen mediciones en sitios de una cuadrícula cada 50-100 m, se pueden hacer mapas de distribución de estas variables a las diferentes profundidades.

Igualmente, se puede determinar los perfiles más comunes en la finca y en ellos hacer calicatas para medir con el penetrómetro de bolsillo en cada horizonte, al menos cinco lecturas por horizonte.

Se recomienda establecer una plantación de aguacate cuando en el lote se tengan mediciones < 200 PSI en el perfil del suelo o > 1.5 kg/cm² con el penetrómetro de bolsillo.

Si la compactación está en los primeros 30 cm, como ocurre en los lotes que previamente se usaron en ganadería y están compactados superficialmente, estos pueden descompactarse usando el implemento Hércules o con subsolador acoplado a un tractor, si la pendiente lo permite.

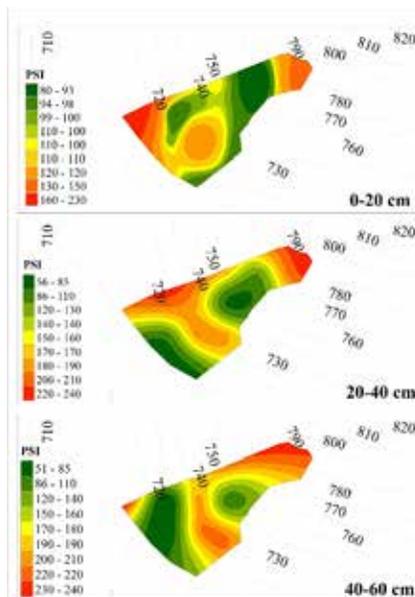


Figura 8. Mapa de distribución del grado de compactación de un suelo a tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm). Elaborado por Cristian Rincón. Noviembre 2024. Note que las zonas rojas son las que presentan mayor compactación.

Si la compactación es profunda (> 40 cm) y no es posible descompactar el suelo, es mejor no sembrar aguacate cv. Hass en este terreno.

DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD

El sitio de muestreo debe ser representativo de la condición a evaluar. Por ejemplo, si se desea medir la Dap de un suelo sin disturbar, se debe evitar tomar muestras en caminos. Sin embargo, este será el sitio de muestreo si el objetivo es medir la compactación en los caminos. En cada sitio de muestreo, es necesario remover la hojarasca y las plantas en un área de 40 cm x 40 cm.

Método del cilindro

- Cilindro metálico biselado en la base, con altura y diámetro alrededor de 5-7 cm
- Bloque de madera
- Martillo
- Pala
- Cuchillo
- Bolsas plásticas
- Balanza electrónica
- Estufa
- Recipientes para secado

El cilindro se introduce completamente en la porción del suelo que se desea muestrear, poniendo el bloque de madera sobre él y golpeándolo con el martillo (Figura 9). Se debe procurar disturbar lo menos posible la muestra de suelo. Luego, con una pala, se retira el cilindro lleno con la muestra, se enrasan sus bordes con un cuchillo y se transfiere la muestra a una bolsa plástica. Si se desea medir la Dap en diferentes horizontes del suelo, se puede tomar la muestra insertando el cilindro en forma horizontal, tratando, igualmente, de disturbar lo menos posible el suelo.

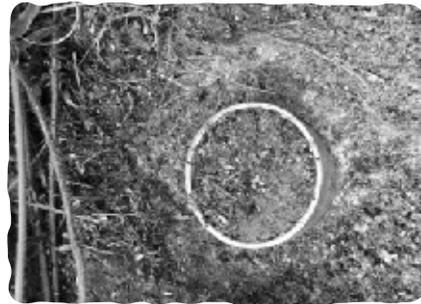
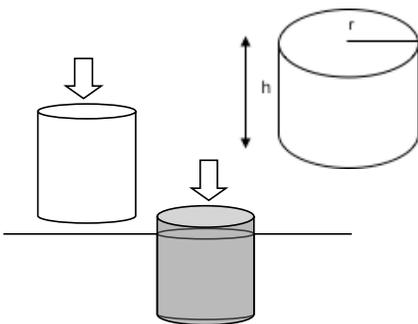


Figura 9. Introducción del cilindro en la porción del suelo que se desea muestrear. En las imágenes se observa cómo se toma la muestra a diferentes profundidades (20 cm y 60 cm) en una plantación de aguacate cv. Hass en Urrao, Antioquia.

La muestra se lleva a una estufa a 105 ° C durante 48 horas, al cabo de ese tiempo se determina la masa seca del suelo (Mss). Si se desea conocer el contenido de humedad del suelo, al momento del muestreo, se determina la masa de la muestra húmeda (Msh).

El volumen de la muestra de suelo (Vt) se calcula con la fórmula del volumen del cilindro (Figura 9):

$$Vt = \pi r^2 h$$

Donde,

r = radio del cilindro

h = altura del cilindro

Para conocer el valor de Dap se reemplazan los valores en la fórmula.

Para estimar el contenido de humedad gravimétrico del suelo (Θ_g) se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Theta_g (\%) = [(Msh - Mss) \div Mss] \times 100$$

Si se desea conocer el contenido de humedad volumétrico (Θ_v) del suelo se tiene en cuenta que:

$$\Theta_v = \Theta_g \times Dap$$

Para estimar la porosidad total (Pt) del suelo se utiliza la siguiente fórmula:

$$Pt (\%) = [1 - (Dap \div Dr)] \times 100$$

Donde,

$$Dr = Mss \div Vs$$

Dr es la densidad real de partículas, es decir, la densidad de los sólidos, para su estimación se excluye el espacio poroso. Para efectos prácticos, en los suelos minerales se asume que Dr =

2.65 Mg m⁻³. Para suelos derivados de ceniza volcánica el valor está usualmente entre 1.9-2.2 Mg m⁻³.

ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

La muestra de suelo que se emplea para esta prueba debe tener agregados grandes, usualmente > 2 mm. Tales agregados son colocados en la parte superior de un juego de tamices con diámetros de apertura (μ) de 2.00, 1.18, 0.50, 0.25 y 0.212 mm.

Luego, el juego de tamices es agitado durante 10 min, lo que ocasiona el choque entre agregados. Una vez que los agregados grandes se fragmentan o dispersan, estos pasarán de tamiz en tamiz. La forma en que estos se distribuyen en los diferentes tamices indica su estabilidad estructural. Para esto, se determina la masa seca (Ms) que queda en cada uno de los tamices.

Un suelo con una estructura bastante estable mantendrá agregados relativamente grandes, mientras que uno con estructura inestable tendrá, al final, agregados muy finos o partículas dispersas. Partículas <0.25 mm son muy susceptibles a perderse por erosión.

Para efectos de comparación entre suelos, es conveniente expresar las cantidades que quedan en cada tamiz en términos relativos (%) con respecto a la cantidad total originalmente empleada en el tamiz superior.

Debido a que la estabilidad de los agregados cambia con el estado de humedad (seco vs. húmedo), es necesario emplear el método bajo ambas condiciones. Sin embargo, es más común referirse la estabilidad en húmedo, y ese es el protocolo que se considerará a continuación. La muestra que se agita en húmedo debe ser previamente asperjada con agua para evitar su destrucción por razones diferentes a la agitación.

- Muestra de suelo seco al aire (aunque la muestra está seca al aire, hay un contenido de humedad que se debe determinar secando la muestra en una estufa a 105°C).
- Juego de tamices (con diámetro de apertura $\mu = 2.00, 1.18, 0.50, 0.25$ y 0.212 mm) (Figura 10).
- Agitador mecánico.
- Balanza electrónica.
- Estufa.
- Recipientes para secado.

Figura 10. Materiales usados en la determinación de la estabilidad estructural.



Tamices usados en la prueba



Equipo de agitación



Detalle de interior

Procedimiento

1. Determine el contenido de humedad de la muestra tomando una alícuota de 3 g y transférala a la estufa durante 24 horas a 105 °C (alternativamente, puede secar en horno microondas por 10 min, en intervalos de 2.5 min). Determine la masa seca en estufa (Mse).
2. Pase la muestra de suelo a través de un juego de tamices de 4.75 y retenga en un tamiz de 2 mm, hasta obtener aproximadamente entre 15-50 g de agregados. Use la tapa y la base y agite vigorosamente la muestra.
3. Organice un juego de tamices en orden descendente, de manera que el de mayor diámetro de apertura quede arriba (2.00, 1.18, 0.50, 0.25 y 0.212 mm) (Figura 9.2).
4. Transfiera entre 15-50 g (Msh) de agregados (4.75-2.0 mm) al tamiz superior de 2 mm (registre el valor pesado de Msh). La muestra sobre ese tamiz debe ser humedecida con un atomizador: esto evitará que un rápido humedecimiento destruya los agregados antes de empezar la prueba.
5. Coloque el juego de tamices en el soporte de la máquina agitadora, de manera que quede sumergido en agua hasta la base del tamiz de 2 mm (Figura 9.3).
6. Agite juego de tamices durante 10 minutos. La oscilación arriba-abajo es de 3 cm y se hacen 30 oscilaciones por minuto.
7. Retire los tamices de los soportes, deje escurrir el agua del juego de tamices y separe cuidadosamente los tamices.
8. Transfiera separadamente el contenido de los tamices a recipientes metálicos. Asegúrese de que los recipientes estén adecuadamente marcados.
9. Lleve el suelo húmedo en los recipientes a una estufa, déjelos durante 24 horas a 105 °C.
10. Determine la masa seca en cada recipiente (Msi).
11. Reporte los datos en la tabla de resultados; tenga en cuenta hacer la corrección por el contenido de humedad inicial.



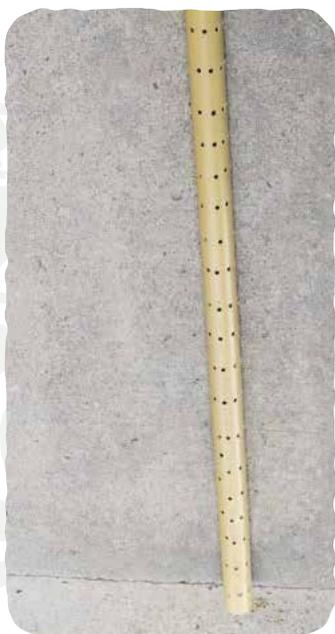
Figura 11. Medición de estabilidad de agregados con el método de Yoder.

PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO

A continuación, se ilustra la instalación de los freatómetros. Se usa un tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 150 cm de longitud. Note que está perforado de 50-150 cm de longitud (Figura 12). La parte perforada se recubre con geotextil o sarán y se amarra con cables. Luego, se entierra verticalmente en un hueco con una barra o un “pala-coca”. La parte perforada se entierra, y sobresalen de la superficie el tubo de 0-50 cm. Se pone un tapón para evitar que entre agua de lluvia. El hoyo se rellena con suelo o con grava. Las observaciones se hacen con frecuencia (1 vez por semana) o un día después de un aguacero.



Figura 12. Instalación de freatómetro para monitorear el nivel freático del suelo.



INFILTRACIÓN

Para el caso de la velocidad de infiltración se puede instalar un par de cilindros (diámetro: 30 cm y 20 cm; altura 25-30 cm) en sitios claves de monitoreo (Figura 13). Estos cilindros se ubican concéntricamente, y sobre el anillo externo se adiciona agua para mantener húmedo el suelo. Luego, se adiciona en el centro una lámina de agua de al menos 20 cm. Luego se monitorea a intervalos regulares (cada minuto durante los primeros 10 minutos; luego, cada 5 minutos durante 20 minutos; posteriormente cada 10 minutos por 30 minutos y hasta pasados 90 minutos totales desde el inicio de la adición de agua en el centro).

El objetivo es registrar el ingreso de la lámina de agua en función del tiempo, para así medir la velocidad de infiltración básica, que es cuando se estabiliza (normalmente, esto ocurre entre 60-90 minutos). Esto se puede hacer a varias profundidades, lo cual coincide con la conductividad hidráulica saturada de cada horizonte en que se mida.

Esta medida es de mucha utilidad, ya que el agua de saturación se mueve a través de los macroporos; así, de esa manera, se está midiendo la funcionalidad del suelo. Si la velocidad de infiltración es lenta, habrá pocos macroporos o el horizonte está compactado.

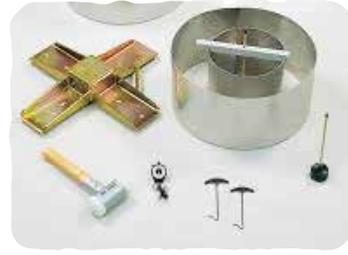


Figura 13. Implementos usados tradicionalmente para medir la infiltración con doble anillo.



Figura 14. a. Medición de la infiltración de agua en el suelo a cuatro diferentes profundidades en una plantación de aguacate en Guarne.



Figura 14. b. Urrao, solamente en la superficie de la zona de raíces. En estos casos se usó un cilindro simple. Fotos: W. Osorio (octubre, 2024)

FORMA DE RELIEVE

Note que en la Figura 15, la forma del relieve favorece la acumulación del agua, y por eso no se debe establecer aguacate en esos sitios bajos. Es posible que, un sistema de drenaje técnicamente establecido, se puedan usar terrenos como el de la imagen, pero sin esto, lo mejor es no hacerlo.



a.

Figura 15. a. Imagen de un relieve de una finca ubicada en Mesopotamia, La Unión, Antioquia



b.



Figura 15. b. observe el color gris en una zona cóncava donde se acumula agua, los árboles sembrados murieron en menos de 4 meses (Carmen de Viboral, Antioquia).



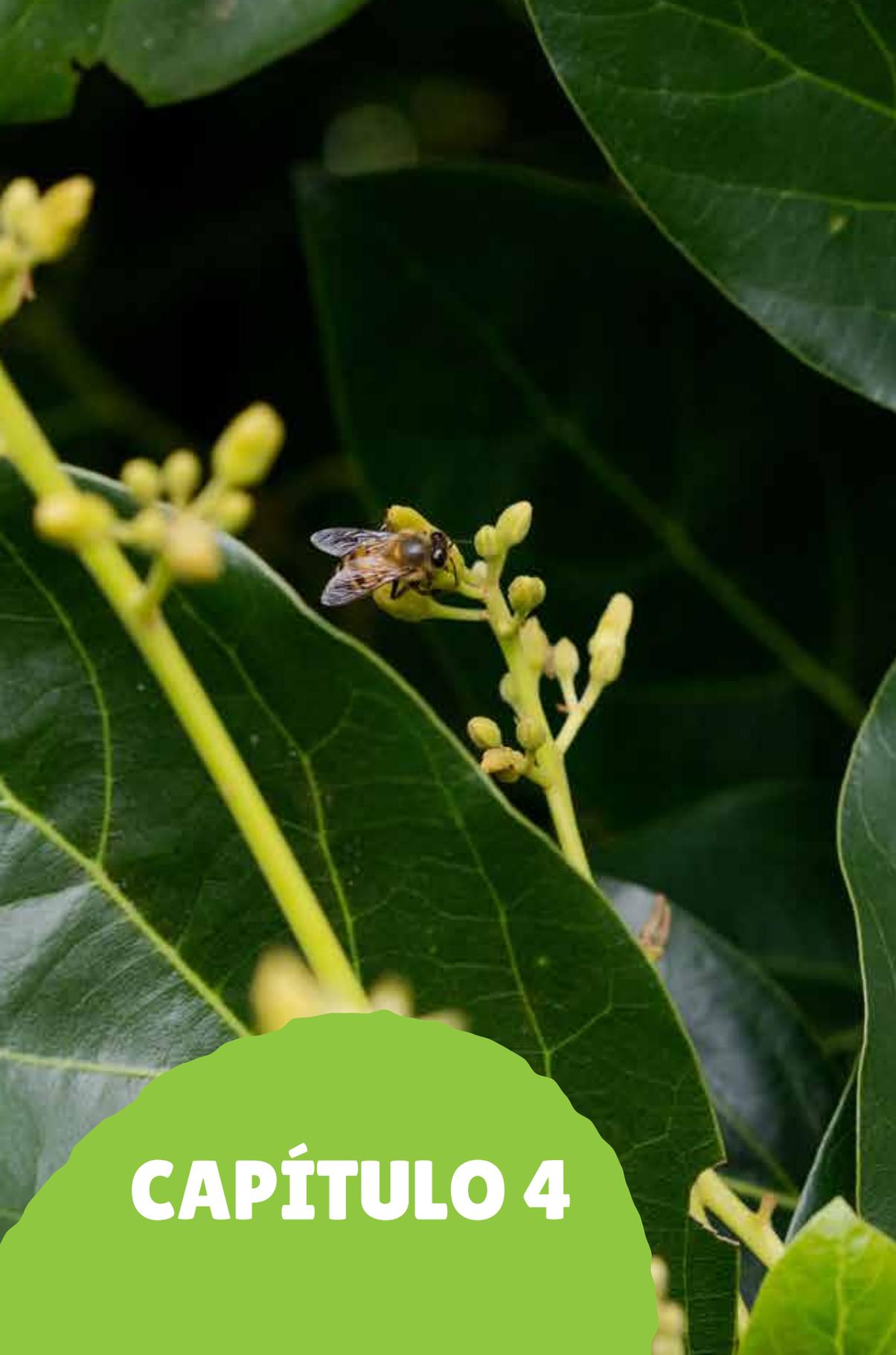
Figura 16. Imagen de plantas y árboles de aguacate cv. Hass con cobertura tipo mulch (Urrao, Antioquia).

COBERTURA DEL SUELO

Como se mencionó anteriormente, la presencia de cobertura muerta o viva sobre la superficie del suelo va a generar beneficios físicos y biológicos al suelo, las raíces y los microorganismos del suelo (Figura 16).

Las coberturas vegetales, al tener raíces en y cerca de la superficie, pueden ayudar a generar macroporos en el suelo, favoreciendo así la calidad física del suelo. El efecto de la cobertura puede ser aún mejor si las especies vegetales son leguminosas, ya que, con sus bacterias fijadoras de N₂, puede hacer aportes de este elemento. Para aguacate, se podrían usar trébol blanco, trébol rojo, alfalfa, Lotus, entre otros.



A close-up photograph of a bee on a yellow flower bud, surrounded by green leaves. The bee is positioned in the center of the frame, facing right, with its wings spread. The flower bud is yellow and has several other buds nearby. The background is filled with large, dark green leaves, some of which are in focus and others are blurred. The overall scene is brightly lit, suggesting a sunny day.

CAPÍTULO 4



ESTUDIOS DE CASO EN EL MONITOREO DE PROPIEDADES FÍSICA DEL SUELO CULTIVADO CON AGUACATE

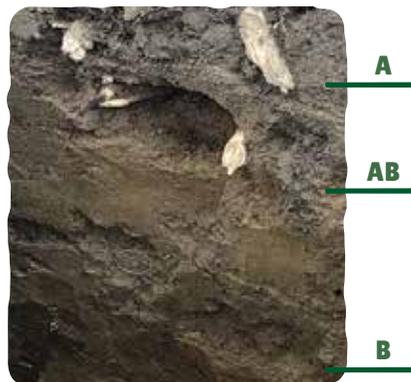


Figura 17. Perfil del suelo cultivado con aguacate cv. Hass en Pacora, Caldas.

En la parte de abajo las propiedades físicas. En general, el suelo presenta un buen comportamiento físico, los muestreos se hicieron en época de invierno y tenía alto contenido de humedad, cercano a la saturación.

HORIZONTE	A	BW	C
PROF. (CM)	0-30	30-60	60-90
COMPACTACIÓN (PSI)	<100	<100	<100
DAP (g/cm³)	0,56	0,58	0,61
DRP (g/cm³)	1,81	1,81	1,98
PT (%)	69,2	67,9	69,2
θ_g (%)	115	81	97
θ_v (%)	64	47	59
SATURACIÓN H₂O (%)	92,6	69,1	85,5
ARCILLA (%)	8	6	6
LIMO (%)	36	20	34
ARENA (%)	56	74	60
TEXTURA	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa



MATERIA
ORGÁNICA

CONTENIDO
DE ARCILLAS

GLEIZACIÓN

Figura 18. Perfil del suelo cultivado con aguacate cv. Hass en un sitio muy erosionado (erosión por remoción masal) en Pacora, Caldas.

Poco contenido de materia orgánica y evidencia de gleyización. Erosión severa. El suelo presenta una fuerte compactación que empieza a 30 cm de profundidad. No se debe cultivar o no se debe seguir cultivando.

HORIZONTE	A	C
PROF. (CM)	0-30	30-60
COMPACTACIÓN (PSI)	120	200-250
DAP (g/cm ³)	0,58	1,11
DRP (g/cm ³)	1,87	2,40
PT (%)	68,8	53,9
θ_g (%)	113	40
θ_v (%)	66	44
SATURACIÓN H2O (%)	95,6	82,1
ARCILLA (%)	6	10
LIMO (%)	34	34
ARENA (%)	60	56
TEXTURA	Franco Arenosa	Franco Arenosa



Figura 19. Aspecto calicata cerca de un árbol sano y productivo, sin problemas de compactación. Exceso de agua por el monitoreo hecho en época de lluvia. Salamina, Caldas. Exceso de agua por la época de monitoreo.

HORIZONTE	A	BW1	BW2
PROF. (CM)	0-30	30-60	60-90
COMPACTACIÓN (PSI)	110	90	100
DAP (g/cm³)	0,45	0,52	0,68
DRP (g/cm³)	1,66	1,91	2,08
PT (%)	72,8	72,9	67,4
θ_g (%)	252	110	91
θ_v (%)	114	57	62
SATURACIÓN H₂O (%)	156,5	78,0	91,4
ARCILLA (%)	14	28	6
LIMO (%)	28	32	44
ARENA (%)	58	40	50
TEXTURA	Franco Arenosa	Franco Arenosa	Franco Arenosa



Figura 20. Aspecto general de la calicata observada en Pacora, Caldas con buen contenido de materia orgánica. Suelo rico en materia orgánica, se observa un buen desarrollo radicular hasta 1.5 m. Hasta 2 m no hay compactación. (Suelo franco-arenoso). Requiere drenaje profundo, para abatir el nivel freático.

HORIZONTE	A1	AB	BW1	BW2	C
PROF. (CM)	0-25	25-50	50-82	82-130	130-150
COMPACTACIÓN (PSI)	100	80	100	50	100
DAP (g/cm³)	0,46	0,47	0,57	0,55	0,65
DRP (g/cm³)	1,73	1,74	1,86	1,90	2,16
PT (%)	73,1	72,8	69,4	70,9	69,7
θ_g (%)	95	44	94	110	94
θ_v (%)	107	51	54	61	61
SATURACIÓN H2O (%)	60,3	69,7	77,1	85,8	87,7
ARCILLA (%)	6	7	6	8	8
LIMO (%)	20	21	36	22	38
ARENA (%)	74	72	58	70	54
TEXTURA	Franco Arenosa				



Figura 20. Aspecto general de la calicata observada en Villamaría, Caldas con buen contenido de materia orgánica. Suelo rico en materia orgánica, se observa un pobre desarrollo radicular. Gleyzación a partir de 31 cm de profundidad, note los moteados a partir de los 31 cm y los colores grises 66 cm. Se deben establecer drenajes para poder continuar con el cultivo, de otra forma es un cultivo inviable.

HORIZONTE	O	A	CI	C2G	C3G	CG
PROF. (CM)	0-6	6-20	20-31	31-66	66-84	84-110
COMPACTACIÓN (PSI)	≤100	150	180	140	≤100	200
DAP (g/cm ³)	0,51	0,93	1,13	1,14	0,97	1,02
DRP (g/cm ³)	1,42	1,61	2,31	2,47	2,30	2,46
PT (%)	64,52	41,99	51,36	53,87	58,06	58,46
θ _g (%)	142	58	37	45	59	55
θ _v (%)	72	54	41	52	57	56
SATURACIÓN H2O (%)	111,0	128,7	80	96	98,3	96,4
ARCILLA (%)		8	6	8	10	12
LIMO (%)		24	18	24	26	22
ARENA (%)		68	76	68	64	66
TEXTURA	No dispersó	Franco Arenosa				

Figura 21. Aspecto general de la calicata observada en Villamaría, Caldas con buen contenido de materia orgánica. Suelo rico en materia orgánica, se observa un pobre desarrollo radicular. Compactación pedogenética a partir de 26 cm de profundidad. Se debe romper los horizontes compactados para establecer o continuar con el cultivo. De otra forma el cultivo no es viable.



HORIZONTE	A	AB	BW1	BW2	C1	C2
PROF. (CM)	0-16	16-26	26-46	46-62	62-83	83-100
COMPACTACIÓN (PSI)	100	150	250	300	300	200
DAP (g/cm³)	0,65	0,79	1,02	1,05	1,05	1,01
DR (g/cm³)	2,02	2,32	2,40	2,42	2,47	2,32
PT (%)	67,94	66,14	57,50	56,58	57,38	56,62
Θ_g (%)	83	63	43	39	39	42
Θ_v (%)	54	50	44	41	41	43
SATURACIÓN H₂O (%)	78,8	75,3	76,5	72,6	71,8	75,2
ARCILLA (%)	10	10	6	10	9	10
LIMO (%)	22	30	28	28	27	20
ARENA (%)	68	60	66	62	64	70
TEXTURA	Franco Arenosa					

Figura 22. Suelo endurecido muy difícil de tratar, alto de arcillas. Debido a la dificultad para la toma de muestra con cilindro, se tomó únicamente del Horizonte A con cilindro y los demás horizontes fueron con la técnica de terrón parafinado. Este suelo presenta condiciones desfavorables (compactación, porosidad y contenido de arcilla) para el cultivo de aguacate Hass. No debe volver a sembrarse. Note el pobre desarrollo de las raíces después de 6 meses. Lo árboles irremediablemente se mueren. Descartado para este cultivo. Norte del Valle del Cauca.



HORIZONTE	A	AB	BW1	BW2	CMG1	CMG2	CMG3
PROF. (CM)	0-13	13-25	25-45	45-62	62-95	95-130	131-168
COMPACTACIÓN (PSI)	260	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300	≥300
DAP (g/cm³)	1,34	1,20	1,50	1,30	1,10	1,00	1,24
DR (g/cm³)	2,10	2,19	2,00	2,20	2,20	2,10	2,37
PT (%)	35,95	45,21	25,00	40,91	50,00	52,38	47,6
ϕ_g (%)	20	23	19	29	32	35	33
ϕ_v (%)	27	27	29	38	35	35	41
SATURACIÓN H₂O (%)	73,8	60,0	115,8	93,4	69,3	67,6	86,9
ARCILLA (%)	30	34	39	45	46	35	29
LIMO (%)	36	35	37	32	35	33	26
ARENA (%)	34	31	24	23	19	32	45
TEXTURA	Franco Arcillosa	Franco Arcillosa	Franco Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Franco Arcillosa	Franco Arcillo Arenosa



Figura 23. Suelo de Guarne cultivado con aguacate Hass. Nótese la disposición de los cilindros para medir la infiltración de agua a diferentes profundidades.

HORIZONTE	AP	BW	BC	2C
MO (%)	9,8	5,4	4,0	3,1
COMPACTACIÓN (kg/cm ²)*	0,50	1,25	1,50	3,25
DAP (g/cm ³)	0,46	0,39	0,52	0,61
DRP (g/cm ³)	1,89	2,20	2,27	2,68
PT (%)	75,65	82,36	77,20	77,34
C.C%	36,8	47,7	67,7	70,0
A%	50	60	70	52
L%	22	32	22	18
AR%	28	8	8	30
TEXTURA	FArA	FA	FA	FArA
EAW	95,38	94,12	93,53	91,97

* Penetrómetro de bolsillo.

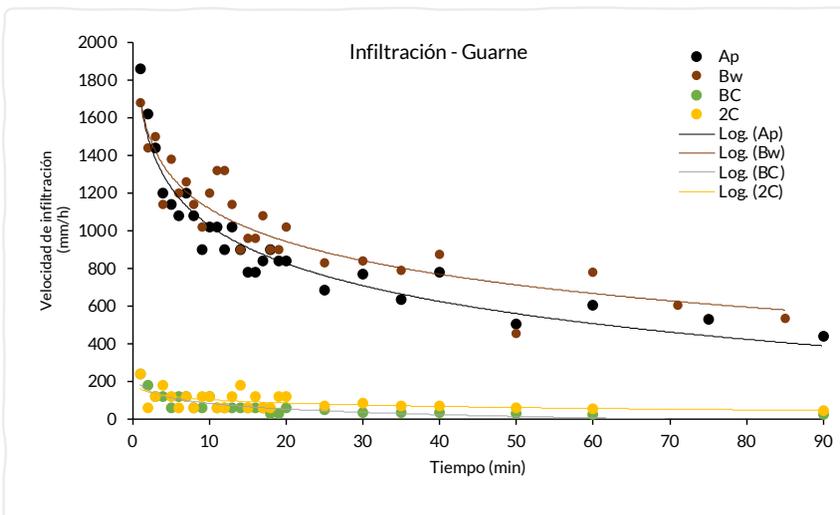
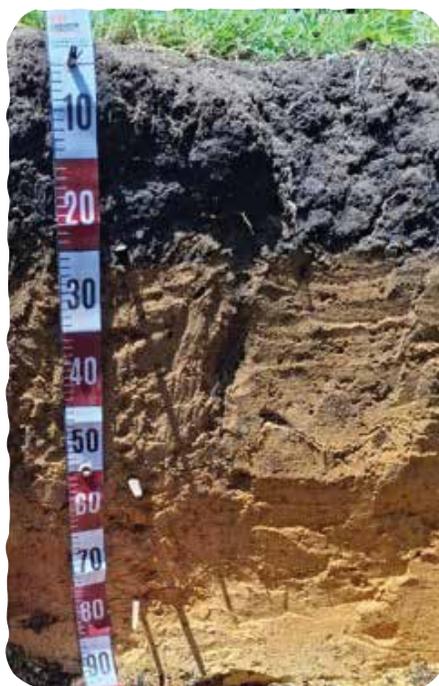


Figura 24. Velocidad de infiltración medida en diferentes horizontes de suelo de Guarne cultivado con aguacate cv. Hass.



Municipio de Urrao-1

Zona de vida: Bosque muy húmedo-Premontano (Bmh-P), 1876 m de altitud, 16 de octubre de 2024.

Horizonte Ap: 0-20 cm. Estructura migajosa, fina; color negro.

Horizonte Bw1: 20-50 cm. Estructura en bloques fuertes, finos; color pardo oliva .

Horizonte Bw2: 50 -74 cm. presencia de óxidos de hierro, estructura en bloques mediana; color pardo rojizo.

Horizonte 2C: 74-95+ cm. Estructura en bloques, finos, con fragmentos de roca meteorizada, color amarillo pálido.

HORIZONTE	AP (0-20 CM)	BW1 (20-50 CM)	BW2 (50-74 CM)	2C (74-95 CM)
MO (%)	8,9	5,1	3,7	1,0
COMPACTACIÓN (kg/cm ³)*	0,95	1,15	2,55	2,8
DAP (g/cm ³)	0,47	0,51	0,53	0,77
DRP (g/cm ³)	1,97	2,11	2,21	2,58
PT (%)	75,92	75,91	76,19	70,22
C.C%	39,7	19,7	15,4	14,9
A%	34	66	76	80
L%	52	30	22	18
AR%	14	4	2	2
TEXTURA	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arcillo Arenoso
EAW	94,9	97,8	92,7	93,2

Figura 25. Suelo de Urrao, y sus propiedades físicas, cultivado con aguacate cv. Hass sobre patrones clonales.

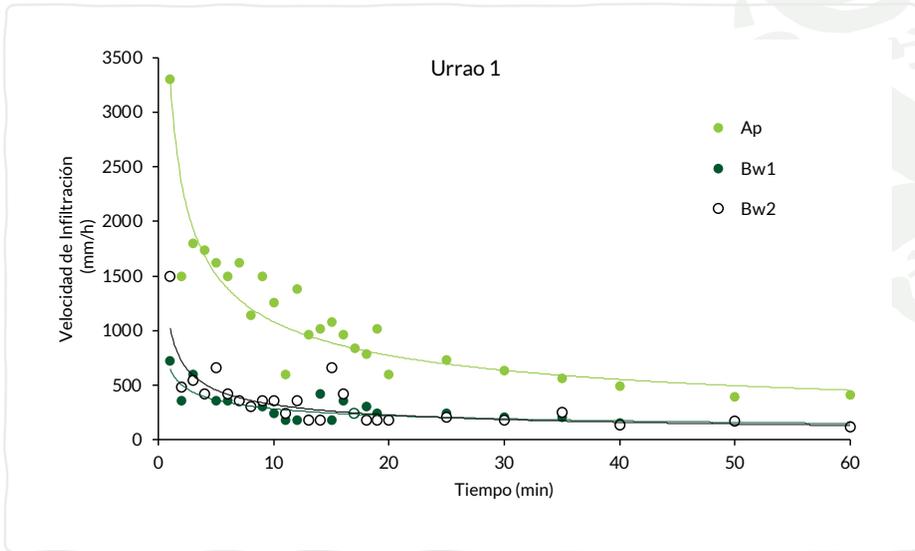


Figura 26. Velocidad de infiltración medida en diferentes horizontes de un suelo de Urrao cultivado con aguacate cv. Hass sobre clones.

Municipio de Urrao-2

6° 10' 3'', N, 76° 04' 12'' W.

Zona de vida: Bosque muy húmedo-Montano Bajo (bmh-MB), 1963 m de altitud, 16 de octubre de 2024.

Ap: 0-30cm. Estructura migajosa, muy fina, fuerte, abundantes raíces y de color negro.

AB: 30-40cm. Estructura en bloques finos a muy finos, fuerte y de color pardo oscuro.

Bw1: 40-55cm. Estructura en bloques finos y medios de color amarillo pálido.

Bw2: 55-65 cm. Estructura en bloques finos y de color naranjado.

65-66 cm. Placa de hierro marcada de aproximadamente 0.5 cm de espesor y de color rojo

2C: 66-85 cm Estructura en bloques finos a medios, pegajoso, plástico, arcilloso y de color naranjado.



HORIZONTE	AP	BW1	BW2	2C
MO (%)	10,4	9,2	1,3	3,5
COMPACTACIÓN (kg/cm ²)*	0,80	0,95	2,05	1,50
DAP (g/cm³)	0,49	0,84	0,90	0,66
DRP (g/cm³)	1,85	2,26	2,53	2,51
PT (%)	73,59	62,93	64,38	73,70
C.C%	42,5	19,2	10,8	29,2
A%	44	72	54	58
L%	40	24	42	36
AR%	16	4	4	6
TEXTURA	Franco	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso
EAW	94,9	97,8	92,7	93,2

* penetrómetro de bolsillo. ** Desde la superficie se hicieron mediciones con el penetrómetro de punta hasta 60 cm de profundidad: < 150 PSI.

Figura 27. Suelo de Urrao, y sus propiedades físicas, cultivado con aguacate cv. Hass sobre patrones clonales.

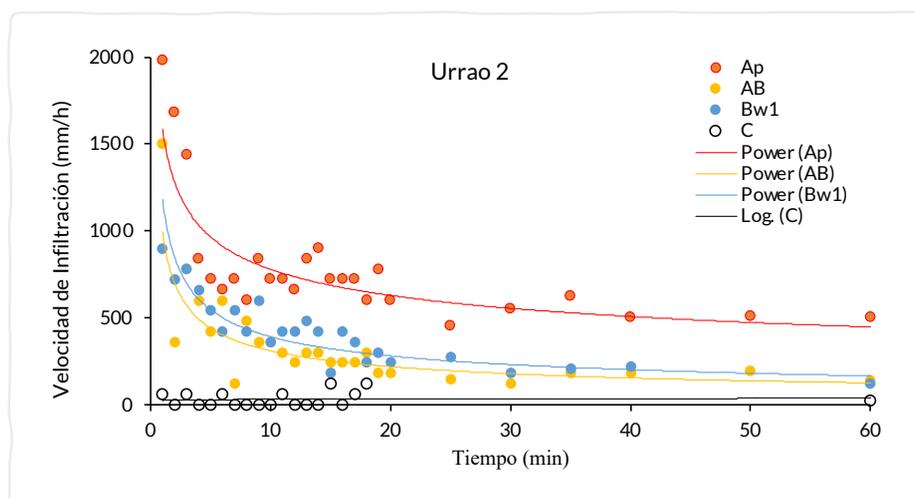


Figura 28. Velocidad de infiltración medida en diferentes horizontes de un suelo de Urrao cultivado con aguacate cv. Hass sobre clonales.

REFERENCIAS

- Arias G J S et al. (2024). Root growth, infiltration and sand proportion in hass avocado of the colombian andean tropics. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 46, e-195 DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0100-29452024195>
- Azcón-Bieto J. Talón M (2000) *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill. Madrid.
- Barber SA (1995) *Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach*. John Wiley and Sons. New York.
- Barshad I (1966) The effect of a variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks. In: *International Clay Conference*, Jerusalem, Israel, 167-173 p.
- Benton J. Wolf B. Mills H (1991) *Plant analysis handbook*. Micro-Macro Publishing. Athens. GA.
- Beyá-Marshall, V., Moraga, F., Galaz, B. et al. Avocado drought stress alleviation through different soil amendments. *J Appl Phycol* (2025). <https://doi.org/10.1007/s10811-025-03466-4>
- Bohn H, Mc Neal B, O'Connor GA (1979) *Soil chemistry*. John Wiley and sons, New York.
- Bonomelli, C., Gil, P. M., & Schaffer, B. (2019). Effect of Soil Type on Calcium Absorption and Partitioning in Young Avocado (*Persea americana* Mill.) Trees. *Agronomy*, 9(12), 837. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120837>
- Brady NC. Weil RR (2016) *The nature and properties of soils*. Prentice Hall. Upper Saddle River. NJ.
- Brown PH. Welch RM. Cary EE (1987) Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology* 85:801-803.

Burbano-Figueroa, O., Moreno-Morán, M., & Romero-Ferrer, J. (2024). Soil properties associated with West-Indian avocado decline in the agroforestry systems of Montes de María, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 18(3), e18008. <https://doi.org/10.17584/rcch.2024v18i3.18008>

Campos, M., & Fischer, G. (2013). "Efecto de las propiedades físicas del suelo en la producción del aguacate Hass en Colombia". *Revista de Ciencias Agrícolas*, 30(2), 45-56.

El-Swaify S (1971) Charges associated with mineral soil components and their implications for the behavior of soils of the tropics. In: Green R, Ikawa H (eds) Report of a workshop on teaching introductory soil science. Including some special considerations of soils of the tropics. CTAHR, Honolulu, 63-70 pp. (Miscellaneous publication 169)

Epstein E (1972) *Mineral Nutrition of Plants: principles and perspectives*. John Wiley. New York.

FAO (2015). *Manejo del suelo y agua en cultivos perennes: Aguacate*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Glass ADM (1989) *Plant Nutrition. An introduction to current concepts*. Jones and Bartlett Publishers. Boston.

Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). "Bulk Density and Linear Extensibility". In *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (Dane, J. H., & Topp, G. C., Eds.), pp. 201-225. Soil Science Society of America.

Henao-Rojas JC, Lopez JH, Osorio NW, Ramirez-Gil JG. Fruit quality in Hass avocado and its relationships with different growing áreas under tropical zones. *Revista Ceres* 66(5): 341-350. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201966050003>.

Hoagland DR (1948) *Lectures on the inorganic nutrition of plants*. Chronica Botanica Company. Waltham. Mass.. USA.

Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of Soil Physics*. CRC Press.

- León JD (2007) Contribución al conocimiento del ciclo de nutrientes en bosques montanos naturales de *Quercus humboldtii* y reforestados (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) de la región de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia). Tesis doctoral, Universidad de Salamanca, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales, Salamanca, España.
- Malavolta E (1994) Diagnóstico foliar En: Silva F (ed.) Fertilidad de Suelos. Diagnóstico y Control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. 57-98 pp.
- Marschner H (1997) Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London.
- Martinez J (2013) Producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles de estratos múltiples y su efecto sobre propiedades bioorgánicas del suelo en el Valle Medio del río Sinú. Tesis Doctorado Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Michelakis, N., & Vougioukalou, E. (2000). "Soil physical properties and their effects on avocado tree growth". *Scientia Horticulturae*, 85(1-2), 17-27.
- Nye PH, Tinker PB (1982) Solute movements in the rhizosphere. Oxford University Press. New York.
- Osorio NW (2018) Manejo de Nutrientes en Suelos del Trópico. Ed Vieco, Medellín.
- Osorio NW (2020) Biología y fertilidad del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Pérez-Jiménez, A., & Rodríguez, P. (2019). "Water Retention Capacity and Aeration in Avocado Cultivation: A Case Study in Volcanic Soils". *Journal of Agricultural Science*, 11(4), 22-34.
- Salisbury F B, Ross CW (1994) Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamérica. México.
- Schaffer, B., & Whiley, A. W. (2002). *Avocado: Botany, Production, and Uses*. CABI Publishing.
- Seid1 H, Kessy J, Asfaw Z, Dahlin AS (2024) Soil Physicochemical Properties under Selected Avocado Cultivars in Ethiopian

Smallholder Agroforestry. Journal of Soil Science and Plant Nutrition (2024) 24:5552-5564

Sposito G (1984) The Surface Chemistry of Soils. Oxford University Press, New York.

Stevenson FJ (1986) Cycles of soil. New York, J.Wiley and sons, 380 p.

Toro LF (1994) Evaluación de los mecanismos que suplen nutrientes a la raíz del rosal bajo condiciones de invernadero. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Zapata R (1994) Uso de la termodinámica y la cinética para evaluar la fertilidad del suelo. In: Silva F (ed.) Fertilidad de Suelos. Diagnóstico y Control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. 99-112 pp.

Zapata R, Osorio NW (2010) La materia orgánica del suelo, 357-396 pp. In: Burbano H, Silva F (ed) Ciencia del Suelo: principios básicos, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, 594 p.



Todos los derechos reservados. Este documento está protegido por las leyes de derechos de autor y propiedad intelectual. Ninguna parte del contenido puede ser reproducida, distribuida, adaptada o utilizada en cualquier forma o medio, sin la autorización previa y por escrito de Corpohass y de los autores. El uso no autorizado de este material puede constituir una infracción legal sujeta a sanciones civiles y penales.

Corpohass no se hace responsable de las opiniones ni de la información contenida en este documento. La responsabilidad total y exclusiva sobre su contenido recae en los autores, quienes garantizan que, en caso de incluir información de terceros, cuentan con la debida autorización para su publicación. Asimismo, declaran que no existe conflicto de interés respecto a los resultados de investigaciones de terceros. En consecuencia, los autores asumirán cualquier responsabilidad civil, administrativa o penal derivada de reclamaciones o demandas de terceros, incluyendo, pero no limitado a, infracciones de derechos de autor, propiedad intelectual u otros derechos legales que se deriven de su contribución.



AVOCADOS
FROM
COLOMBIA

| **corpohass**