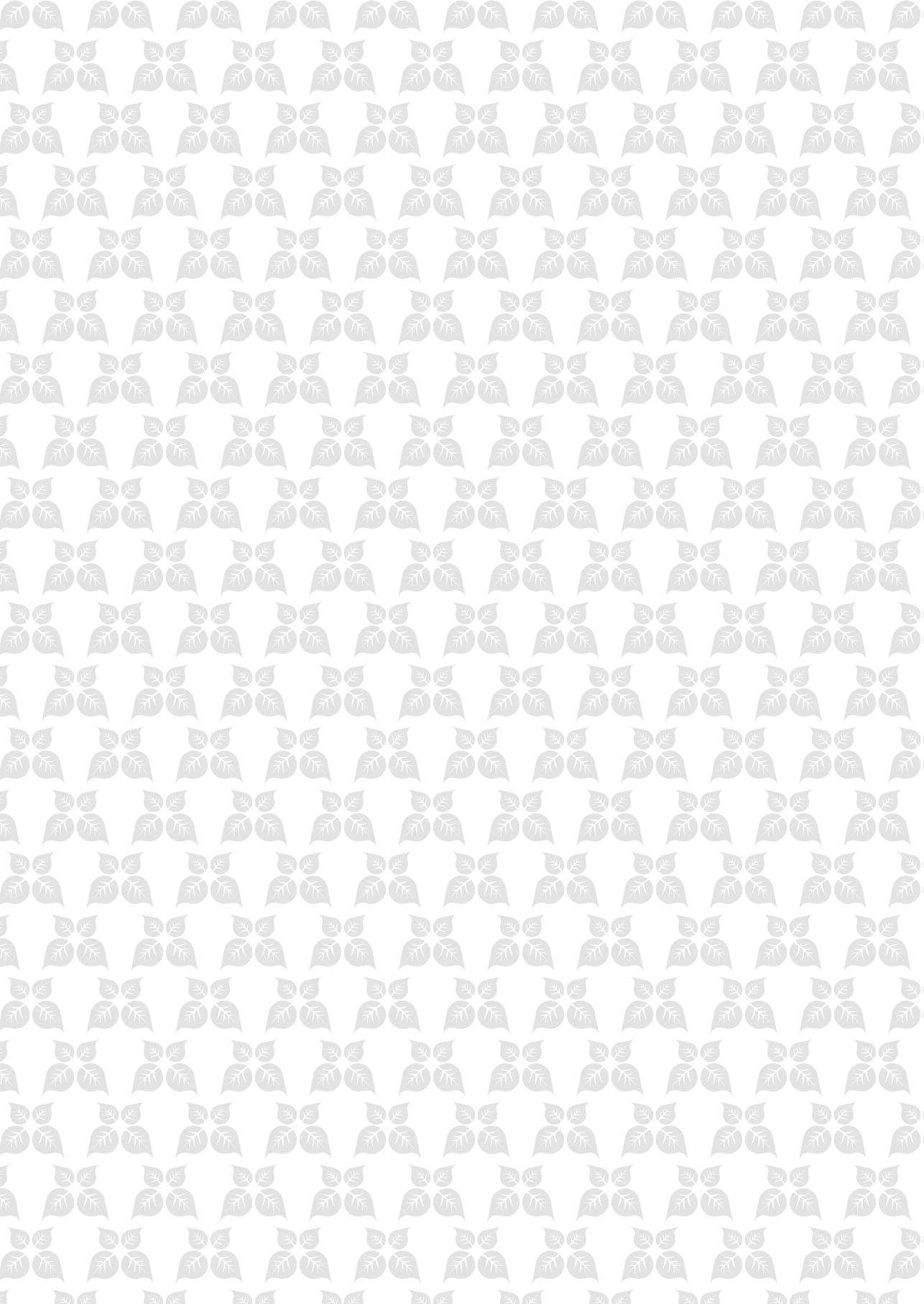


Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado

Alexander Rebolledo Roa
Diana Yaritza Dorado Guerra





Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado

Alexander Rebolledo Roa
Diana Yaritza Dorado Guerra

Mosquera, Colombia 2017

Rebolledo Roa, Alexander

Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado / Alexander Rebolledo Roa y Diana Yaritza Dorado Guerra. -- Mosquera (Colombia) : Corpoica, 2017.

116 páginas : ilustraciones

Incluye referencias bibliográficas

ISBN obra impresa: 978-958-740-237-7

ISBN (e): 978-958-740-238-4

1. *Persea americana* 2. Taxonomía 3. Nutrición de las plantas 4. Aplicación de abonos 5. Fenología 6. Antioquia (Colombia) 7. Cauca (Colombia) I. Dorado Guerra, Diana Yaritza

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
Corpoica
Centro de Investigación Palmira. Diagonal a la intersección de la
carrera 36A con calle 23, Palmira, Valle del Cauca. Código postal:
763533

Esta publicación hace parte de los resultados del proyecto
Corpoica N.º 710650227844 "Manejo integrado del cultivo
de aguacate (*Persea americana*) var. Hass para incrementar la
calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia",
cofinanciado con recursos de Colciencias y respaldado con
recursos de contrapartida por las alianzas de productores: Hass
Colombia SAT de Antioquia y la Asociación de productores de
Frutas de Herveo (Asfruher), en el Tolima.

Primera edición: 1.100 ejemplares
Impreso en Bogotá, Colombia
Printed in Bogota, Colombia

Preparación editorial
Editorial Corpoica
editorial.corpoica@corpoica.org.co
Editora: Liliana Gaona García
Corrección de estilo: Edwin Daniel Algarra Suárez
Impreso por: Digiprint Editores
Diseño: Oficina Asesora de Comunicaciones, Identidad y Relaciones
Corporativas, Corpoica
Diagramación: Studio Swamp S.A.S.
Impreso en Bogotá, D. C., Colombia, junio de 2017

Citación sugerida: Rebolledo-Roa A, Dorado-Guerra DY. 2016.
Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo
de aguacate Hass con un enfoque tecnificado. Mosquera,
Colombia: [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación
Agropecuaria.

Cláusula de responsabilidad: Corpoica no es responsable de las
opiniones e información recogidas en el presente texto. Los au-
tores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad
sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en
este último supuesto que cuentan con la debida autorización de
terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe
conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la in-
vestigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los auto-
res serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente
a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a
los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado
como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@corpoica.org.co
www.corpoica.org.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Contenido

Agradecimientos	13
Introducción	15
Capítulo I	
Clasificación taxonómica del aguacate	19
División Magnoliophyta: plantas con flores	19
Familia Lauraceae	20
Género <i>Persea</i>	21
Especie <i>Persea americana</i> Miller	25
Capítulo II	
Modelo fenológico	29
Escala fenológica con subfases del proceso dicogámico de la flor propuesta por Cabezas et al. (2003)	30
Escala fenológica del desarrollo floral propuesta por Salazar-García et al. (1998)	33
Estados fenológicos tipo en Rionegro (Antioquia)	38
Estados fenológicos tipo en Morales (Cauca)	39
Escala fenológica del desarrollo reproductivo propuesta por Alcaraz et al. (2013)	41

Capítulo III

Función de los nutrientes en los procesos de crecimiento y desarrollo del fruto	49
Nitrógeno	51
Fósforo	54
Potasio	56
Calcio	58
Magnesio	60
Azufre	61
Micronutrientes	63

Capítulo IV

Definición de planes de fertilización	67
Toma de muestras de suelo	67
Aspectos generales	68
Proceso de muestreo	69
Toma de muestras de tejido	70
Índice de balance de nutrientes	71
Cálculos de fertilizantes	78
Nitrógeno	82
Fósforo	84
Potasio	85

Calcio	87
Magnesio	88
Azufre	90
Micronutrientes	90
Conclusiones	97
Los autores	99
Referencias	101





Lista de figuras

Figura 1	Características de la flor de la división Magnoliophyta	20
Figura 2	Características de plantas de la familia Lauraceae, especie <i>Persea americana</i>	20
Figura 3	Características de frutos de <i>Persea shiedeana</i>	22
Figura 4	Características de hojas, flores y frutos de <i>Persea indica</i>	23
Figura 5	Frutos de aguacate de la variedad Hass. <i>Persea americana</i>	25
Figura 6	Fase femenina y masculina de la flor de aguacate con definición de subfases	32
Figura 7	Características macroscópicas del desarrollo de la inflorescencia	37
Figura 8	Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Rionegro (Antioquia)	39
Figura 9	Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Morales (Cauca)	41
Figura 10	Descripción de estados fenológicos para aguacate Hass, basada en la codificación BBCH	46
Figura 11	Esquema de distribución de materia seca en tejidos del fruto de aguacate y composición mineral de elementos primarios	50
Figura 12	Zona de muestreo en árboles frutales, forestales, ornamentales, etc	68
Figura 13	Representación de separación de áreas homogéneas de terreno.	69
Figura 14	IBN para un cultivo de seis años de edad de aguacate Hass, ubicado en Herveo (Tolima)	75



Lista de tablas

Tabla 1	Productos comerciales utilizados como fuente de P para planes de fertilización	55
Tabla 2	Productos comerciales utilizados como fuente de K para planes de fertilización	57
Tabla 3	Intervalos de concentración nutrimental óptimos para aguacate cv. Hass	58
Tabla 4	Valores estándar (S) y coeficientes de variación (CV), utilizados para calcular los IBN	72
Tabla 5	Rangos en términos de porcentaje del estado nutrimental de hojas de aguacate, de acuerdo con el enfoque del índice de balance de nutrientes propuesto por Kenworthy (1973)	73
Tabla 6	Resultados de análisis de tejido de aguacate Hass para la localidad de Herveo (Tolima) y valores estándar tomados de Salazar-García y Lazcano-Ferrat (1999)	73
Tabla 7	Posibles combinaciones de relaciones entre la disponibilidad de elementos en el suelo y el contenido en la planta, para determinar la cantidad de fertilizante a aplicar	77
Tabla 8	Valores propuestos en la quinta aproximación del manual de asistencia técnica (ICA 1992)	79
Tabla 9	Contenido nutricional del suelo en la localidad de Morales (Cauca) y diagnóstico del rango en la quinta aproximación del manual de asistencia técnica	80
Tabla 10	Valores de extracción de nutrientes en un cultivo de aguacate Hass (rendimiento 10 t/ha) y eficiencia de cada elemento	82



Agradecimientos

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) agradece a Colciencias por el apoyo financiero para el desarrollo del programa “Manejo integrado del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) var. Hass para incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia”, del cual se obtuvo la información para realizar este documento.

También se agradece a las asociaciones de productores Asfruher y Hass Colombia, por su apoyo y aporte en la realización del programa en Herveo (Tolima), Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca).

De igual manera, se brinda un reconocimiento al equipo técnico y administrativo de Corpoica que participó en el desarrollo de esta investigación y realizó aportes en las distintas etapas de elaboración de este libro. Se agradece especialmente a los investigadores PhD Clara Inés Medina y Eduardo Barragán; a la investigadora MSc Diana Lucía Correa; a los ingenieros agrónomos Ángela Carolina Melo, Edinson Javier Ríos, Luis Carlos Grajales, Hugo Mario Reyes y Anderson Gómez; a los auxiliares Daniel Ángel García, Gonzaga de Jesús Valenzuela; y a la Oficina Asesora de Planeación y al Departamento de Transferencia de Tecnología.



Introducción

Algunos árboles frutales, como cítricos, aguacate y mango, llegan a producir un alto número de flores, pero la cantidad de frutos que finalmente permanecen en el árbol hasta su cosecha dependen del balance nutricional y hormonal endógeno que se establece en la planta entre ciclos de producción, y de los factores de suelo y clima predominantes. Un árbol de aguacate puede producir más de un millón de flores, con un porcentaje de cuajado de frutos de 0,001 % para la variedad Bacon (Inoue y Takahashi 1990), 0,07 % para la variedad Fuerte (Cameron et al. 1952) y entre 0,01 y 0,1 para la variedad Hass (Dixon y Sher 2002; Can-Alonzo et al. 2005; Cossio-Vargas et al. 2007; Garner y Lovatt 2008).

Existen varios factores que determinan el porcentaje de cuajado de frutos: la competencia por los nutrientes disponibles en la planta que se presenta entre el crecimiento de hojas, flores y frutos recién cuajados (Scholefield et al. 1985; Sedgley 1987; Zilkah et al. 1987); la alta demanda de carbohidratos y nutrientes para la formación y producción de frutos (Wolstenholme 1986); la participación del boro y el nitrógeno en los procesos del desarrollo floral (Jaganath y Lovatt 1995), y el contenido endógeno hormonal, como las gibberelinas, cuya importancia se ha demostrado tras la aplicación exógena en un estado fenológico específico del desarrollo floral (Paz-Vega 1997; Rossouw y Robbertse 2001; Salazar-García y Lovatt 2002).

La mayoría de productores de aguacate en Colombia desconoce y otro tanto no aplica criterios básicos para el manejo de la fertilización de sus cultivos que, sumado a otras prácticas de manejo deficientes (aplicación de riego, manejo de plagas y enfermedades, labores de cosecha oportunas, etc.), convierten al aguacate en un cultivo con bajo nivel de tecnificación. Para 2015 se obtuvo a nivel nacional un rendimiento promedio de 9,5 t/ha (Agronet 2016), que se considera una baja producción en relación con el rendimiento potencial, reportado en 32,5 t/ha.



México, ubicado en el primer lugar de producción de aguacate a nivel mundial con un rendimiento promedio en 2014 de 9,8 t/ha (FAOSTAT c2017), es ligeramente superior al rendimiento promedio reportado para Colombia, a pesar del bajo nivel de tecnificación en el territorio colombiano. Posiblemente, este es un indicador de las ventajas comparativas y competitivas que predominan en las zonas productoras de aguacate en el país, por condiciones de suelo y de clima.

Los criterios técnicos de manejo del cultivo de aguacate en México cuentan con soportes de investigación, logrando alcanzar en algunos estados como Nayarit, rendimientos de hasta 32,5 t/ha, con el manejo de la fertilización basado en el enfoque del índice de balance de nutrientes (IBN), desarrollado por Kenworthy (1973) y aplicado en investigación por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2003) en aguacate Hass. Este enfoque considera, por un lado, un valor estándar (óptimo) del contenido de cada nutriente obtenido de árboles seleccionados por sus altos rendimientos y, por otro lado, la variación fisiológica o desviación estándar del contenido de cada elemento existente en dicha población de árboles seleccionados. Los resultados obtenidos, a partir de la interpretación del análisis de tejidos, complementan la definición de planes de fertilización a partir de los análisis de suelo, los contenidos de nutrientes extraídos por la cosecha y la eficiencia de la aplicación de cada nutriente.

El objetivo de este libro es brindar información, como punto de partida, para la aplicación de criterios en la toma de decisiones relacionados con la definición de planes de fertilización, en función del contenido presente en el suelo, de lo que se extrae en la cosecha y del contenido presente en la planta. La información que aquí se presenta recopila documentación bibliográfica de los avances de investigación reportados en diferentes zonas productoras a nivel mundial y aporta resultados obtenidos en el programa de investigación “Manejo integrado del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) var. Hass para incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia”, financiado con recursos de Colciencias.





Clasificación taxonómica del aguacate

A continuación, se presenta la descripción del aguacate, de acuerdo con la clasificación taxonómica (división, familia, género y especie), y sus principales características morfológicas, anatómicas y hábitos de crecimiento. La descripción por especie aporta información sobre el centro de origen y las condiciones generales de clima predominantes en dichas regiones.

División Magnoliophyta: plantas con flores

De acuerdo con Takhtajan (2009), los rasgos característicos de la división Magnoliophyta (figura 1) son los siguientes:

1. Los óvulos se encuentran dentro de una cavidad más o menos cerrada, formada por uno o varios carpelos unidos o separados.
2. Los granos de polen no son depositados directamente sobre el micrófilo del óvulo, sino sobre la superficie del estigma, que no solo es capaz de recibir el polen, sino también de asistir en el desarrollo del tubo polínico.
3. Los gametofitos masculinos y femeninos están desprovistos de gametangios (anteridios y arquegonios) y son extremadamente simplificados y especializados
4. Fusión triple: uno de los dos gametos masculinos se fusiona con la célula huevo (singamia) y el otro, con dos núcleos polares libres o ya fusionadas de la célula central del gametofito femenino; como resultado de la triple fusión, se forman un cigoto diploide y un núcleo primario triploide del endospermo. La triple fusión es un rasgo característico de magnoliófitas, que se distingue fuertemente de otras plantas.

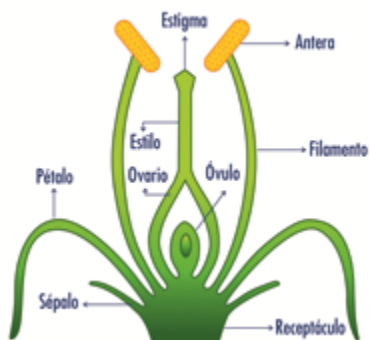


Foto: Alexander Rebolledo Roa

Figura 1. Características de la flor de la división Magnoliophyta.

Fuente: Proyecto Biosfera (s. f.)

Familia Lauraceae

El aguacate pertenece a la familia de plantas Lauraceae (figura 2). Esta familia presenta árboles o arbustos en su mayoría de hoja perenne (de hoja caduca en las regiones templadas), a veces dioicas. La corteza y follaje generalmente son aromáticos. Las hojas suelen ser alternas: opuestas o verticiladas, subopuestas o simples, y por lo general rara vez lobuladas.



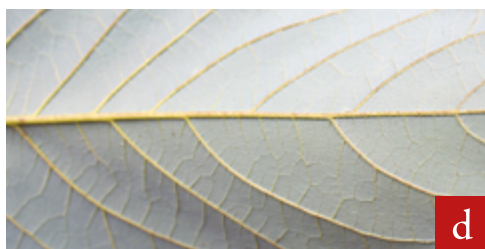
a



b



c



d

Foto: Alexander Rebolledo Roa

Figura 2. Características de plantas de la familia Lauraceae, especie *Persea americana*. a. Detalle de rama con inflorescencia indeterminada; b. Detalle de la flor en estado femenino, en donde el pistilo se observa totalmente erguido; c. Detalle del fruto, nótese el cáliz persistente en el fruto; d. Detalle del lado abaxial de la hoja, nótese los nervios secundarios decurrentes sobre el nervio principal.

Las flores, en general, son axilares y, con poca frecuencia, subterminales, dispuestas en inflorescencias cimosas o racimosas; además, son generalmente bisexuales, a veces unisexuales, actinomorfas. El perianto está formado por seis tépalos unidos, dispuestos en verticilos de tres. Los estambres (libres, definidos, dispuestos en verticilos de tres, con anteras erguidas, de dos a cuatro tecas y dehiscentes por valvas) pueden ser fértiles o parcialmente transformados en estaminodios. El gineceo es súpero, unilocular, uniovulado, de estilo simple, recto o curvado, y con estigma entero o lobulado.

El fruto es una baya o drupa, con una única semilla, muy variable en su tamaño (de 0,05 a 2,0 kg), forma (redondo, ovalado o periforme), cáscara (grosor, textura y color) y pulpa (tamaño, firmeza, etc.) (Scora et al. 2002). El crecimiento del fruto presenta una curva sigmoidea simple (Valmayor 1964; Robertson 1971) y está dividido en tres fases: la primera incluye el desarrollo del ovario y cuajado inicial del fruto; en la segunda aún se presenta división celular, la formación de la semilla y el desarrollo temprano del embrión, y en la tercera se presenta la expansión celular y la maduración del embrión (Gillaspy et al. 1993).

En general, en aguacate se presenta una característica de crecimiento inusual, ya que la división celular continúa mientras el fruto se mantenga unido al árbol (Schroeder 1953). En las primeras seis semanas, el crecimiento y desarrollo se caracteriza por presentar división celular muy rápida; posteriormente, se presenta elongación celular, que puede detenerse cuando el fruto ha alcanzado el 50 % de su tamaño final en madurez; después, el tamaño del fruto continúa su aumento, principalmente por división celular (Cummings y Schroeder 1942; Barmore 1977; Dixon et al. 2006).

Género *Persea*

Hay alrededor de 50 especies descritas de *Persea*. La mayoría de las especies de *Persea* se originaron en el Nuevo Mundo, pero *P. indica* al parecer se originó en las islas Canarias-Madeira-Azores. Algunas especies se originaron en el sudeste asiático. *Persea*, además, ha sido dividida aún en subgéneros que incluye *P. americana* —el aguacate comercial— y el subgénero *Eriodaphne*, un grupo de especies de las cuales la mayoría son inmunes a la pudrición de la raíz ocasionada por *Phytophthora cinnamomi*, pero desafortunadamente no son compatibles para injertar con aguacate (Shepherd y Bender 2013).

En el subgénero *Persea*, tres especies han sido de interés para los productores de aguacate:

1. *Persea shiedeana*. El chinene (*Persea schiedeana* Nees.) es un árbol frutal nativo de México y Centroamérica que se distribuye hasta Colombia (Kopp 1966). El contenido de ácidos grasos totales de los chinenes oscila entre el 24,7 % a 36 %, valores que superan la concentración en aguacate de la raza antillana, que usualmente va de 4 % a 7 %, pero es comparable con la de frutos de aguacate de las razas mexicana y guatemalteca o de híbridos entre ambas razas (Joaquín-Martínez et al. 2007). El fruto de *Persea schiedeana* difiere de los de *Persea americana* en el color de la pulpa, el cual presenta una tonalidad *beige* o color crema (figura 3). También se le conoce como aguacatea, chinini, chinin, aguacate de manteca o paga. El color de la cáscara de sus frutos puede ser verde, negro, café o morado. La pulpa es fibrosa o de textura similar a la del aguacate (Cruz-Castillo et al. 2007; Joaquín-Martínez et al. 2007). La morfología de frutos de chinene en varias regiones de Veracruz es diversa, en cuanto a longitud de la semilla, peso y diámetro distal. El patrón de crecimiento de los frutos de chinene corresponde al tipo simple sigmoidal (Cruz-Castillo et al. 2007). Esta especie es de interés, ya que es uno de los padres de los portainjertos G755, un material con una mejor tolerancia a la enfermedad de la pudrición de la raíz.



Foto: Alejandro F. Barricotos-Priego

Figura 3. Características de frutos de *Persea shiedeana*.

2. *Persea indica* (figura 4). Conocida como *viñátigo*, es una especie endémica de la Macaronesia, presente en Canarias, isla de Madeira y Azores, por lo que el término “indica” no hace referencia a su lugar de procedencia. En Canarias está presente en las islas centrales y occidentales (Arechavaleta et al. 2010). La corteza lisa del tronco y de color gris bastante oscuro contrasta con el verde oscuro brillante del follaje. El árbol crece con un tronco recto que alcanza 20 m de altura media y puede alcanzar hasta 30 m, y se utiliza como fuente de madera en su hábitat nativo. Las hojas son oblongas, glabras y de 6 a 13 cm de largo. Los frutos son apenas carnosos, crecen en sección longitudinal, hasta 2 cm, y se presentan en racimos. Los frutos inmaduros son verdes y se vuelven negros al madurar (figura 4). El follaje perennifolio y la fruta pequeña hacen de *P. indica* un árbol ornamental atractivo y útil que mejora el microclima durante todo el año (Schuch et al. 1992).



Foto: Juan Bibiloni

Figura 4. Características de hojas, flores y frutos de *Persea indica*.

3. *Persea americana* (figura 5) es el aguacate comercial, que comprende tres razas: mexicana, guatemalteca y antillana. En regiones de América Central donde se encuentran las tres razas en la misma latitud, la raza antillana se adapta bien desde el nivel del mar hasta 1.000 metros (tropical), la raza guatemalteca de 1.000 a 2.000 metros (subtropical), y la mexicana desde 1.500 a 3.000 metros (semi-tropical) (Lee 1980). A continuación, se describen algunas de sus características (Bost 2009; Bender 2012):



- Raza mexicana [*Persea americana* Mill. var. *Drymifolia* Blake, (*Persea drymifolia* Schlecht. & Cham.)], originaria de las tierras altas de México. Los frutos de la raza mexicana tienen pieles finas y delicadas que se desgarran fácilmente cuando se transportan o se manipulan. El color de la piel de la fruta varía de verde oscuro a morado oscuro. Las hojas tienen un olor característico a anís. Desde la floración hasta la madurez fisiológica dura aproximadamente seis meses. Dentro de las variedades o cultivares de la raza mexicana están: Topa Topa, Mexicola, Duke, Mentone. Las semillas de la raza mexicana de aguacate han sido utilizadas en California como portainjertos desde comienzo de la industria del aguacate. Los viveristas tienen preferencia por sus características de semillas grandes y crecimiento rápido para la producción de plántulas, y los productores han encontrado que dichos portainjertos suelen tener una mayor producción y más consistente que las que provienen de portainjertos guatemaltecos y antillanos. De las tres razas, la mexicana es la de mayor tolerancia al frío y a suelos calcáreos, condición que puede inducir clorosis en hojas por deficiencias de hierro. Por otro lado, la raza mexicana es la de menor tolerancia a una condición de salinidad en el suelo.

Por sus características agroecológicas, en Colombia no se encuentran variedades de esta raza cultivadas para producción de fruto con fines comerciales. Ha sido utilizada para la obtención de híbridos como los cultivares Hass (85 % guatemalteco y 15 % mexicano) y Fuerte. Dos de las principales características que le ha conferido la raza mexicana a la guatemalteca en estos híbridos son una mayor resistencia al frío y el adelanto en al menos medio año, en la temporada de cosecha.

- Raza guatemalteca [*Persea nubigena* var. *Guatemalensis* (L.) Wms.], originaria de las tierras altas de Guatemala. Sin olor a anís en las hojas, follaje joven comúnmente rojizo y frutos pequeños a grandes, presenta un nivel intermedio de adaptación y tolerancia al suelo y clima en comparación con la raza mexicana y americana. La piel del fruto es generalmente gruesa y coriácea a leñosa, con un grosor de 6 mm. La semilla casi nunca se suelta en su cavidad. Desde la floración a la cosecha o a la madurez fisiológica pueden alcanzar 15 meses. A esta raza pertenecen las variedades o cultivares Hass, Lamb-Hass, Hass Carmen, Reed, Edranol, Itzama, Nabal, Linda, Pinkerton y Mayapan.

- Raza antillana [*Persea americana* Mill. var. Americana (*Persea gratissima* Gaertn.)], originaria de tierras bajas centroamericanas de donde fue llevada a las Antillas después de la conquista: Sin olor a anís en las hojas, es de fruto pequeño a grande, de piel coriácea, rara vez con más de 1,5 mm de grosor, y de semilla relativamente grande, a veces suelta en la cavidad locular. La Pulpa es de textura acuosa con menor contenido de aceite. Desde la floración hasta la madurez fisiológica del fruto, tarda aproximadamente seis meses. Es la raza menos resistente a bajas temperaturas y humedad, pero la más tolerante a la salinidad del suelo. La forma del pedicelo presenta una configuración única en forma de cabeza de clavo. A esta raza pertenecen las variedades Butler, Fuchs, Fucsia, Hulumanu, Lorena, Peterson, Pinelli, Pollock, Ruehle, Russell, Simmonds, Trapp, Villacampa y Waldin.



Foto: Alexander Rebolledo Roa

Figura 5. Frutos de aguacate de la variedad Hass. *Persea americana*.

Especie *Persea americana* Miller

El aguacate (*Persea americana* Mill) es un árbol de hoja perenne, nativo de las regiones tropicales y subtropicales de México, Guatemala y la costa del Pacífico de América central.



El árbol alcanza una altura de entre 10 y 15 m, para la raza mexicana, y hasta los 30 m, para la raza guatemalteca y antillana (Scora et al. 2002). Sus hojas son alternas, de color verde oscuro y brillante, en la superficie superior, y blanquecinas, por el envés, con formas lanceoladas, elípticas, ovaladas, oval u obovada (Morton 1987). El fruto tiene forma de pera y presenta un crecimiento continuo en el árbol, madurándose por completo después de que ha sido cosechado (RADA 2013). La parte comestible de la fruta está conformada por una capa gruesa de pulpa de color amarillo verdoso, que contiene proporciones adecuadas tanto de aceite como de proteínas (Knight 2002). El cultivo de aguacate se ha extendido rápidamente a muchas partes del mundo, debido a su valor nutritivo y por la preferencia de la fruta en la alimentación y usos cosméticos y medicinales (Campbell y Malo 1976; Morton 1987; Verheij y Coronel 1991).







Modelo fenológico

La fenología se define como el estudio de los eventos biológicos de las plantas que se presentan de manera periódica (por ejemplo: inducción floral, flujos de crecimiento vegetativo, floración, crecimiento del fruto, cuajado, abscisión, etc.), relacionados con el clima y, especialmente, con los cambios estacionales a los que se encuentran sometidas las plantas. En el subtrópico, por ejemplo, los cambios ambientales propios de cada estación (primavera, verano, otoño e invierno) determinan la transición en los ciclos de crecimiento vegetativo (formación de hojas) a reproductivo (formación de flores). En el trópico, se sugiere que los periodos de floración están asociados con épocas secas, seguidas por periodos de lluvia (Southwick y Davenport 1986; Wolstenholme y Whiley 1990; Wilkie et al. 2008).

La descripción fenológica se puede convertir en una herramienta importante para desarrollar e implementar, de una manera más ordenada, prácticas de manejo agronómico, así como caracterizar el comportamiento de una especie bajo diferentes condiciones ambientales o diferentes condiciones experimentales. Para el aguacate, se han propuesto diferentes escalas fenológicas que, si bien coinciden en la descripción de algunos estados tipo, presentan diferencias en la descripción detallada de estados intermedios, y en la cobertura de las distintas fases fenológicas asociadas al crecimiento vegetativo y reproductivo, desde yema en latencia, hasta la fase de maduración del fruto (Aubert y Lossois 1972; Ish-Am y Eisikowitch 1991; Salazar-García et al. 1998; Cabezas et al. 2003; Alcaraz et al. 2013).



Escala fenológica con subfases del proceso dicogámico de la flor, propuesta por Cabezas et al. (2003)

La aplicación de una u otra escala dentro de esquemas de investigación dependerá del nivel de precisión que le aporte cada una, en función del objetivo con el que cada autor definió su alcance. Si lo que se busca es enfocar estudios de biología floral tendientes a caracterizar aspectos tales como momento de antesis, longevidad floral, disposición espacial de estambres y estigma, posiblemente se encuentre un mayor soporte en la escala de Cabezas et al. (2003), ya que esta considera con mayor precisión las fases femenina y masculina de la flor, desde su apertura individual hasta que vuelve a cerrar (figura 6).

Subestado	Característica visual
Subestado F1f Flor abriendo en fase femenina	
Subestado F2f Flor abierta en fase femenina	

(Continúa figura 6)

(Continuación figura 6)

Subestado F3f Flor cerrando en fase femenina	
Subestado F1c Flor cerrada	
Subestado F1m Flor abriendo en fase masculina	
Subestado F2m Flor abierta en fase masculina. Anteras no dehiscidas	

(Continúa figura 6)

(Continuación figura 6)

Subestado F3m Flor abierta en fase masculina. Primera dehiscencia	
Subestado F4m Flor abierta en fase masculina. Dehiscencia completa	
Subestado F5m Flor cerrando en fase masculina	
Subestado F2c Flor cerrada de forma definitiva	

Figura 6. Fase femenina y masculina de la flor de aguacate con definición de subfases.

Fuente: Adaptado de Cabezas et al. (2003)

Además de los diez subestados morfológicos de la floración, que resumen el proceso dicógamo de la flor, esta escala describe la secuencia progresiva desde la yema latente hasta la definición del fruto tierno, resumido en diez estados-tipo.

**Escala fenológica del desarrollo floral,
propuesta por Salazar-García et al. (1998)**

La escala propuesta por Salazar-García et al. (1998) (figura 7) plantea la descripción macroscópica y microscópica de 11 estados, desde yema en latencia, hasta la apertura floral (antesis). Esta escala relaciona el aspecto externo de las yemas con el grado de desarrollo del meristemo floral. Estos autores aportan la descripción de los cambios anatómicos que marcan la transición de la yema en latencia a crecimiento reproductivo, caracterizando al estado 4 como el de determinación irreversible a la floración. Bajo condiciones tropicales, en donde existen pocos antecedentes sobre los factores ambientales asociados con los procesos de inducción floral, esta escala representa una herramienta importante para profundizar en el conocimiento del desarrollo fenológico del aguacate en las distintas zonas productoras del territorio colombiano.

Descripción macroscópica	Característica visual de cada estado
Estado 1 Yema cubierta por las hojas no expandidas del brote	

(Continúa figura 7)



(Continuación figura 6)

Estado 2

Yema cubierta por dos hojas
expandidas y maduras



Estado 3

Senescencia parcial de las
escamas de la yema



Estado 4

Brácteas de la inflorescencia
expandidas hacia todos los
extremos del brote



(Continúa figura 7)

Estado 5 Incremento en las dimensiones del brote. Escamas separadas	
Estado 6 Brácteas encierran la inflorescencia	
Estado 7 Apertura de las brácteas de la inflorescencia. Inflorescencia comienza a emerger	

(Continúa figura 7)

Estado 8

Elongación de ejes secundarios (estado de coliflor). Ejes terciarios aún cubiertos por brácteas. Se presentan pequeñas flores cerradas

**Estado 9**

Elongación del eje terciario. Brote vegetativo visible en el ápice de la inflorescencia

**Estado 10**

Flores completamente diferenciadas pero cerradas



Estado 11

Flores en antesis. Brotación de yemas vegetativas en el ápice de inflorescencias indeterminadas. Inicio del flujo vegetativo de primavera



Figura 7. Características macroscópicas del desarrollo de la inflorescencia.

Fuente: Adaptado de Salazar-García et al. (1998)

Basados en esta escala, se caracterizaron los estados fenológicos tipo de aguacate Hass, en dos zonas productoras de Colombia: Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca). Además, se relacionan los estados principales que determinan la transición de yema vegetativa a brote reproductivo, con el fin de establecer una posible asociación entre los periodos secos y los de máxima precipitación. Del mismo modo, se relaciona el estado 8 o estado de coliflor referenciado por diversos autores (Salazar-García et al. 1998; Lovatt 2010) como el de mayor sensibilidad a la aplicación exógena de reguladores de crecimiento o fertilización foliar, ya que los ejes secundarios y terciarios aún se encuentran en proceso de crecimiento, y estos últimos con presencia de pequeñas flores cerradas, una en posición terminal y dos laterales.

De acuerdo con Salazar-García et al. (1998), la transición de la fase vegetativa a la reproductiva en muchas especies está asociada con los procesos de división celular presentes en la región aplanada del meristemo apical, que puede dar origen a la formación de hojas o flores. Si prevalecen condiciones ambientales que promueven el crecimiento vegetativo, el meristemo del eje primario conduce a la formación del nuevo primordio foliar. Sin embargo, bajo condiciones óptimas para la floración (estrés hídrico o bajas temperaturas), a partir de los meristemos laterales se estimula la actividad de división celular para originar las estructuras características de la inflorescencia. De acuerdo con estos autores,



cualquier estrategia enfocada a manipular la iniciación de la inflorescencia debe realizarse antes del estado 4, en que se presenta la transición de crecimiento vegetativo a reproductivo.

Estados fenológicos tipo en Rionegro (Antioquia)

Bajo las condiciones de Rionegro, se caracterizaron los estados fenológicos del desarrollo floral en 144 yemas distribuidas en 36 árboles de aguacate Hass, además de monitorear los registros climáticos (temperatura, precipitación, humedad relativa, brillo solar) con una estación climática portátil WatchDog, instalada en la localidad del estudio, a una altura de 2.172 msnm. Además, con base en los registros de la serie climática de la estación principal del Ideam del Centro de Investigación Corpoica - La Selva, ubicada a 6° 08' N latitud y 75° 25' W longitud, se realizó la caracterización climática de la zona de estudio. En ella, se presenta una precipitación media multianual de 1.990 mm/año; la precipitación más baja se obtuvo en el mes de enero, con un valor promedio multianual de 60 mm. Los registros indican que la precipitación presenta un comportamiento bimodal, con dos temporadas de lluvia y de sequía distribuidas de la siguiente forma:

- Período de lluvias moderadas: junio, julio y agosto.
- Período de lluvias intensas: abril, mayo, septiembre, octubre, noviembre.
- Períodos moderadamente secos: marzo, diciembre.
- Períodos secos: enero y febrero.

En relación con la temperatura, esta permanece casi constante, con una media de 17,1 °C, una máxima de 22,0 °C y una mínima de 12,0 °C. La humedad relativa tiene un comportamiento similar a la precipitación, siendo mayor en los meses de lluvia y disminuyendo en los meses secos, con un promedio anual de 76,9 %. El brillo solar presenta un comportamiento inverso a la precipitación y humedad relativa, pues disminuye en los meses de mayor precipitación y aumenta en los meses de sequía, con un promedio anual de 5,0 horas/día.

Aunque la zona se caracteriza por presentar un balance hídrico anual positivo, con una precipitación promedio anual de 1.990 mm y evaporación anual de 1.210 mm, el patrón de distribución de lluvias presenta meses con déficit hídrico: diciembre, enero y febrero.

Bajo estas condiciones, se registraron dos flujos de crecimiento enfocados a la formación de brotes reproductivos. El estado dos, en que la yema aún se encuentra en latencia, presentó una mayor frecuencia entre las semanas 5 y 7, y, la segunda, en las semanas 22 y 23 (figura 8). El primer periodo de mayor frecuencia de la yema en latencia coincide con un periodo de baja precipitación y un balance hídrico negativo, requerido como factor de estrés para estimular la transición de la yema en latencia a yema reproductiva. Pero este comportamiento no es consistente con lo observado en el segundo periodo de mayor frecuencia o estado predominante (yema en latencia), en donde se presenta un balance hídrico positivo, contrario al factor de estrés requerido como inductor de la floración.

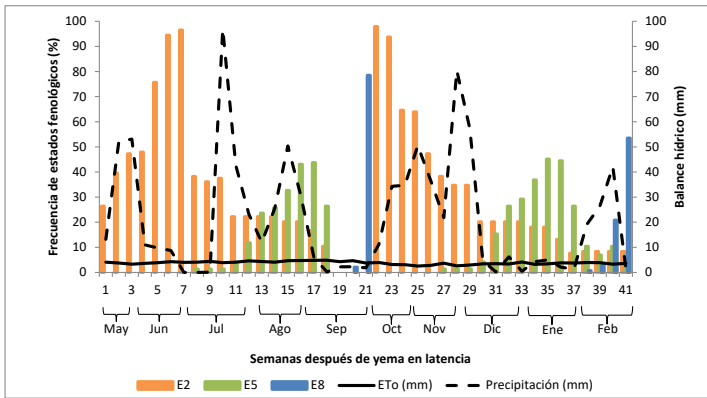


Figura 8. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Rionegro (Antioquia).

Fuente: Basada en la escala fenológica propuesta por Salazar-García et al. (1998)

El estado cinco, que representa la formación de brotes reproductivos, se presentó entre las semanas 15-17 y 35-37, después de yema en reposo (figura 8). El primer período de mayor frecuencia de este estado coincide con un período de precipitación que alcanza los 50 mm. Para el segundo período, se registra baja precipitación con un balance hídrico negativo, que no exhibe relación con los cambios asociados a esta fase fenológica. Las máximas frecuencias para el estado ocho se presentan en la semana 21 y 41 (figura 8).

Estados fenológicos tipo en Morales (Cauca)

Además de Rionegro, también se caracterizaron estados fenológicos y se tomaron registros climáticos en la localidad de Morales, a una altura de 1.600 msnm, ubicada en un piso térmico altitudinal de altiplanicie templado



muy húmedo, de acuerdo con el IGAC (2008). Los registros para el análisis climático de la zona fueron tomados de la serie climática de la estación principal La Trinidad, perteneciente a Cenicafé y ubicada en el municipio de Piendamó a 1.671 msnm, geográficamente localizada a 2° 45' N latitud y 76° 35' W longitud (Cenicafé 2015).

La precipitación media multianual es de 1.800 mm/año; el mes con la precipitación más baja es septiembre, con un valor promedio multianual de 74,5 mm. El patrón de distribución de las lluvias denota un régimen bimodal, presentando dos temporadas de lluvia y de sequía, que se describen a continuación:

- Período de lluvias moderadas: febrero, marzo y segunda mitad de septiembre.
- Período de lluvias intensas: abril, mayo, octubre y noviembre.
- Períodos moderadamente secos: junio, diciembre y enero.
- Períodos secos: julio, agosto y primera mitad de septiembre.

La temperatura presenta un comportamiento constante casi lineal, con una media de 19,0 °C, máxima de 24,3 °C y mínima de 15,0 °C. La humedad relativa oscila entre 74 % y 84 %, con una tendencia similar a la precipitación, siendo mayor en los meses de lluvia (abril, mayo, octubre y noviembre) y disminuyendo en los meses secos (julio, agosto y primera mitad de septiembre). El brillo solar se encuentra entre 3,1 y 5,1 h, con un promedio anual de 4,1 horas/día, y presenta un comportamiento inverso a la precipitación y humedad relativa, disminuyendo en los meses de mayor precipitación y aumentando en los meses de sequía. En esta localidad también se presenta un balance hídrico anual positivo, siendo la precipitación promedio anual de 1.800 mm y la evaporación anual de 1.150 mm. Las lluvias no se distribuyen uniformemente a lo largo del año, con meses en los que es necesario aplicar riego, por presentar un balance hídrico negativo (junio, julio, agosto y septiembre).

En esta localidad, también se registraron dos flujos de crecimiento reproductivo, en donde el estado 2 presenta una posible asociación con periodos de baja precipitación y un balance hídrico negativo. Los periodos de déficit hídrico se presentaron entre las semanas 1-3 y 14-24, y coinciden con los mayores porcentajes de frecuencia del estado 2 o de yema en latencia (figura 9). Cuando se presenta un aumento en las precipitaciones con aproximadamente 20 mm, las yemas ya se encuentran diferenciadas al estado 5, caracterizado por un

incremento en las dimensiones del brote y con una mayor frecuencia entre las semanas 10-14 y 32-33. El estado 8 se presenta en las semanas 15-16 y 35-38 (figura 9).

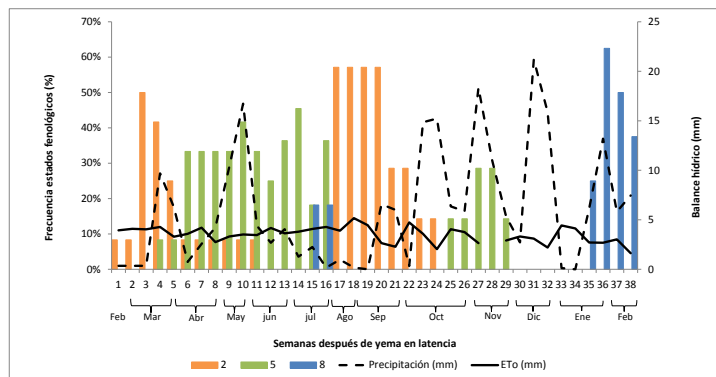


Figura 9. Estados fenológicos tipo del desarrollo floral de aguacate en la localidad de Morales (Cauca).

Fuente: Basada en la escala fenológica propuesta por Salazar-García et al. (1998)

Escala fenológica del desarrollo reproductivo propuesta por Alcaraz et al. (2013)

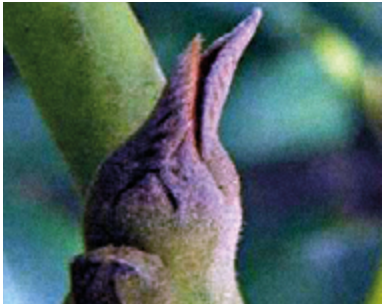
Alcaraz et al. (2013) proponen, para la variedad Hass, una escala fenológica basada en la codificación Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (BBCH), que considera siete de los diez estados de crecimiento principales, iniciando con la yema vegetativa en latencia (estado 0) y finalizando cuando el fruto alcanza su tamaño final y está listo para la cosecha comercial (estado 719). El fruto de aguacate no madura hasta después de ser cosechado, razón por la cual el estado 8 de maduración del fruto no se incluye en esta escala. La escala propuesta por estos investigadores considera la descripción del crecimiento vegetativo y del crecimiento reproductivo, en donde se incluye, además de los estados fenológicos del desarrollo floral, la descripción de los estados de desarrollo del fruto desde postantesis hasta cosecha (figura 10).

Bajo condiciones del sur de España (Málaga), en que fue descrita esta escala, se presentan dos flujos de crecimiento vegetativo: el primero, en la estación primaveral, y el segundo, en verano. Las yemas florales se desarrollan en otoño y la floración tiene lugar en primavera. La duración del período de floración depende del cultivar y también de las condiciones ambientales, principalmente la

Código BBCH y descripción	Característica visual
Estado 010. Yema vegetativa latente Las yemas vegetativas están cerradas y cubiertas por escamas de color verde-marrón.	
Estado 019. Finaliza el rompimiento de la yema Ápices de la hoja aproximadamente 3 mm por encima de las escamas del brote.	
Estado 110. Primeras hojas que se separan Hojas desplegadas con los ápices foliares 10 mm por encima de las escamas.	
Estado 115. Hojas expandidas Primera hoja del flujo vegetativo alcanza el 50 % de su tamaño final. Peciolos de las hojas extendidos.	

(Continúa figura 10)

(Continuación figura 10)

Estado 119/315. 50 % de la longitud final del brote Todas las hojas expandidas.	
Estado 510. Yemas reproductivas latentes Yemas cubiertas con escamas de color verde-pardo sin signos de crecimiento.	
Estado 511. Brote reproductivo comienza a hincharse Las escamas de color marrón comienzan a separarse y la yema se ve visiblemente hinchada.	
Estado 512. Finalización del hinchamiento del brote Las escamas del brote se encuentran completamente separadas. Sección interna del brote de color verde claro visible entre las escamas.	

(Continúa figura 10)

(Continuación figura 10)

Estado 513. Rompimiento del brote reproductivo La inflorescencia se hace visible entre el eje de las escamas del brote.	
Estado 514. Inflorescencia compuesta y separada La inflorescencia individual se encuentra separada y comienza la elongación de los ejes.	
Estado 515. 50 % de la longitud final de la inflorescencia Ejes secundarios elongados y ejes terciarios aún cubiertos por brácteas, flores pequeñas y cerradas.	
Estado 517/110. 70% de la longitud final de la inflorescencia Ejes terciarios elongados, flores individuales separadas, hojas visibles en periodo de expansión sobre inflorescencias indeterminadas.	

(Continúa figura 10)

(Continuación figura 10)

Estado 518/113. Inflorescencia 80 % de la longitud final de la inflorescencia.	
Estado 610. Primeras flores abiertas Estado femenino.	
Estado 610. Primeras flores abiertas Estado masculino.	
Estado 617. Flores abiertas 70 % de las flores abiertas.	

(Continúa figura 10)

(Continuación figura 10)

Estado 711. Crecimiento inicial del ovario Crecimiento posterior a la fertilización y cuajado de fruto.	
Estado 712. Primer periodo de máxima abscisión de frutos: Ovarios verdes y rodeados por sépalos secos y frutos con diámetro entre 5-10 mm.	
Estado 715. 50 % del tamaño final del fruto Segundo período de máxima abscisión de frutos.	
Estado 719. 90 % o más del tamaño final del fruto Frutos listos para cosecha comercial.	

Figura 10. Descripción de estados fenológicos para aguacate Hass, basada en la codificación BBCH.

Fuente: Adaptado de Alcaraz et al. (2013)

temperatura (Sedgley y Annells 1981). La transición de la yema en latencia a crecimiento reproductivo se presenta durante el otoño y el invierno (octubre/febrero), y la brotación y emergencia de la inflorescencia ocurre en primavera (marzo/abril). Las yemas que se diferencian en crecimiento reproductivo se observan esféricas durante su desarrollo, mientras que las yemas vegetativas se mantienen elongadas. En las inflorescencias indeterminadas, el desarrollo del brote terminal vegetativo se presenta durante las últimas etapas del desarrollo de la inflorescencia (517-519) (Alcaraz et al. 2013).





B Mn Zn Cu Fe C₆H₁₂O₆ Mg Ca K P N

Función de los nutrientes en los procesos de crecimiento y desarrollo del fruto

La composición química típica de la materia seca de una hoja puede ser: 60 % carbohidratos, 25 % proteínas, 5 % lípidos y 10 % minerales. En general, se acepta que las plantas requieren 16 nutrientes esenciales que constituyen la base para la síntesis de estos componentes: hidrógeno, oxígeno y carbono (derivado del dióxido de carbono del aire y del agua), más 13 nutrientes minerales, la mayoría de los cuales son tomados del suelo. Los tres primeros constituyen los insumos básicos para la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y son elementos constitutivos de biomoléculas orgánicas tales como lípidos. Los 13 elementos minerales se dividen en nutrientes primarios, secundarios y micronutrientes: los nutrientes primarios son nitrógeno, fósforo y potasio; los secundarios, calcio, magnesio y azufre. y los micronutrientes, zinc, hierro, manganeso, cobre, boro, molibdeno y cloro. El nitrógeno es la base para la síntesis de aminoácidos, que a su vez son las unidades estructurales de las proteínas. Si solo uno de estos elementos es deficiente, con el tiempo tal deficiencia afecta el crecimiento y rendimiento del cultivo de una manera negativa.

Con respecto a los tejidos que componen el fruto, cada uno representa un aporte al contenido total de materia seca. En un estudio llevado a cabo por Salazar-García et al. (2011), se determinó el peso seco de cada tejido por separado en frutos de aguacate Hass, obteniendo la siguiente distribución:

- Peso total del fruto: 57,55 g
- Semilla: 12,33 g
- Testa: 0,33 g
- Pulpa: 38,44 g
- Epidermis: 6,46 g



Con base en estos valores, la pulpa representa el mayor porcentaje del peso seco total del fruto (66,8 %), pero, en términos de materia seca, la semilla representa un aporte de 42,87 %, mientras que la pulpa tan solo representa 26,84 %. Considerando estos reportes, en la figura 11 se esquematizó la distribución porcentual de materia seca en los distintos tejidos del fruto y la composición mineral de los elementos primarios.

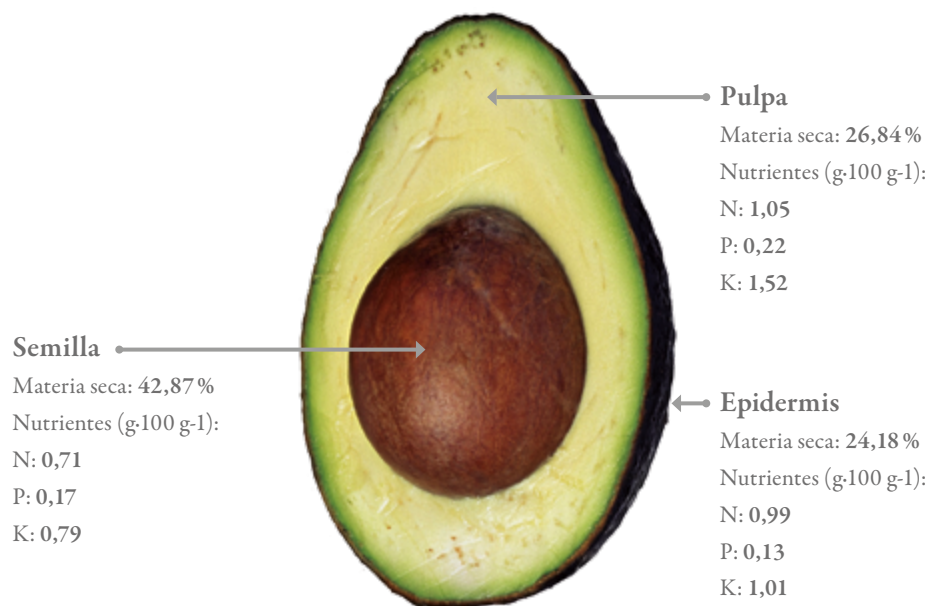


Figura 11. Esquema de distribución de materia seca en tejidos del fruto de aguacate y composición mineral de elementos primarios.

Fuente: Modelo de esquema tomado de Rosecrance et al. (2012)

En la fenología de todas las plantas, hay etapas clave que tienen una mayor demanda de algunos nutrientes que otras. En cultivos perennes como el aguacate, la floración, el cuajado de frutos (que incluye la caída masiva de flores y frutos recién cuajados) y la caída de junio (que se produce cuando se presenta en simultáneo el crecimiento exponencial del fruto, el crecimiento vegetativo en inflorescencias indeterminadas y el crecimiento de la raíz [Hamid et al. 1988]), son etapas fenológicas de alta demanda de nutrientes. Estas etapas son claves para dirigir estrategias que permitan retener en la planta el mayor número de frutos posible, puesto que se va a reflejar en un mayor rendimiento. A continuación, se describe la participación de cada elemento, de acuerdo con los reportes bibliográficos.

Nitrógeno

El nitrógeno es absorbido por las raíces de la mayoría de plantas en forma de nitrato (NO_3^-), y muy poco en forma de amonio (NH_4^+). El nitrato es de movilidad alta en el suelo y se mueve fácilmente con el agua hacia las raíces, donde se produce la captación; además, puede ser absorbido rápidamente por las plantas, pero también puede ser lixiviado con facilidad en la zona radicular si se presenta una condición de exceso de humedad en el suelo. La forma amoniacal se une a las superficies de las partículas del suelo y no lo hace mover fácilmente a las raíces de las plantas, hasta que es convertido en nitrato por bacterias del suelo en un proceso llamado nitrificación. Este proceso es dependiente de la temperatura: por ejemplo, a 24 °C, la nitrificación se puede completar en una a dos semanas, mientras que, a 10 °C, puede tardar 12 semanas o más (Bender y Faber 1999).

El nitrato actúa como un fertilizante de liberación rápida para su uso inmediato por la planta, y los fertilizantes amoniacales son utilizados como fertilizantes de liberación lenta, disponible para proveer la planta durante un período más largo de tiempo. Muchos productores utilizan una combinación de estas dos formas de nitrógeno para obtener las ventajas de ambos. Es bien conocido que la nitrificación del N en fertilizantes nitrogenados que contienen amonio (NH_4^+) puede generar acidez en el suelo, debido a la liberación de iones de hidrógeno (H^+). Por ejemplo, Adams (1984) menciona que cada mol de N proveniente del sulfato de amonio (SA) produce 4 moles de H^+ , mientras que cada mol de N proveniente de la urea o del nitrato de amonio (NA) produce solamente 2 moles de H^+ . Esto sugiere que el SA es dos veces más acidificante que el NA o la urea (Chien et al. 2008).

En las localidades de Rionegro (Antioquia), Herveo (Tolima) y Morales (Cauca), en donde se enfocó el plan de fertilización basado en el Índice de Balance de Nutrientes en cultivos de aguacate Hass, se encuentra como característica común la presencia de suelos con pH fuertemente ácidos (5,1-5,5) y con contenidos altos de materia orgánica (18,71 %). Para que se dé la conversión del ion amonio (NH_4^+) en nitrato (NO_3^-), de manera general deben existir las siguientes condiciones (Sahrawat 2008):

1. Presencia de bacterias nitrificantes.
2. Temperatura de suelo >20 °C.
3. pH de suelo entre 5,5 y 7,5.
4. Suficiente disponibilidad de humedad y oxígeno en el suelo.



En las zonas de estudio evaluadas (Rionegro, Herveo y Morales), la condición ácida del suelo puede reducir la presencia y actividad de bacterias nitrificantes, pero al mismo tiempo la presencia de altos contenidos de materia orgánica (MO) asegura una alta disponibilidad de N, aunque con una posible liberación más lenta. Los niveles de N en hojas, verificados con el análisis de tejidos, confirmaron contenidos normales del elemento en la planta (2,25 %), de acuerdo con los valores propuestos por Embleton y Jones (1972) y verificados por Lovatt (2001) para aguacate Hass. Por otra parte, se verificaron contenidos de N en el fruto con valores de extracción por hectárea de 62 kg de N para la localidad de Rionegro, 96 kg para Morales y 74 kg para Herveo. Todos los valores registrados superan los rangos de extracción de N que reporta la literatura (Lovatt 2001), que oscilan entre 11 y 61 kg de N/ha, para un rendimiento del cultivo de 10 t/ha.

Gardiazábal et al. (2007) llevaron a cabo un estudio comparativo en aguacate variedad Hass, para determinar si la fertilización completa que incluye los nutrientes N, P, K, Ca, Mg, B y Zn, aplicados como fertilizantes solubles, tiene mejores resultados sobre el crecimiento, producción, calibre de frutas o poscosecha que un programa de fertilización tradicional, que incluye N, B y Zn. Estos autores encontraron una sostenida y mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo con la fertilización completa, que no sigue la misma tendencia en el contenido de nutrientes verificados a nivel foliar. El N foliar, durante los cuatro años de evaluación (2002 a 2004), no permite correlacionar una posible participación en función de la cosecha, ya que para los años 2002 y 2003 se presentan niveles de N entre 1,7 % y 1,9 %, pero los valores de cosecha para 2002 fueron del orden de 60-70 kg de fruta por árbol, mientras que para 2003 fueron del orden de 14-30 kg de fruta por árbol.

El fruto de aguacate no solo es rico en grasa y aceite, sino que también contiene una alta concentración de proteína en relación con otras frutas. Por lo tanto, el fruto de aguacate es un fuerte sumidero de carbono y nitrógeno. Cuando el desarrollo del fruto y el crecimiento vegetativo ocurren al mismo tiempo, entrando en competencia, se debe considerar la distribución, transporte, y asignación de nitrógeno hacia ambos tipos de estructuras, al momento de orientar los planes de fertilización. La cantidad promedio de proteína en frutos de aguacate Hass en California es de 5,0 a 7,5 g por fruto de aguacate, lo que representa más de 1 g de nitrógeno por fruta fresca (Lovatt 1998). En

contraste con el fruto de aguacate, las hojas presentan en promedio solo 4 mg de proteína por gramo de peso fresco, 7,5 veces menor que la encontrada en hojas de cítricos.

Lovatt (2001) evaluó, bajo las condiciones de California, el efecto de duplicar la dosis de N (56 kg/ha) sobre el rendimiento, en función de la fenología del árbol de aguacate de la variedad Hass. Los momentos de aplicación incluidos corresponden con las siguientes etapas fenológicas:

1. Fin del crecimiento del brote vegetativo. Brote apical con cuatro o más meristemos de ejes secundarios de la inflorescencia (noviembre).
2. Hinchamiento temprano de la yema: se forma el número total de ejes secundarios de las inflorescencias (10); los ejes que se desarrollaron primero comienzan a elongarse y a iniciar la formación de los órganos de la flor (enero).
3. Hinchamiento de la yema: los ejes secundarios jóvenes de la inflorescencia están elongados; los ejes secundarios, que se desarrollaron primero, presentan flores completamente formadas con el gineceo en estado temprano de desarrollo (febrero).
4. Antesis a cuajado inicial del fruto e iniciación del flujo vegetativo de primavera en el ápice de inflorescencias indeterminadas (abril).
5. Final del estado 1 del desarrollo del fruto (fase inicial de división celular) e inicio del periodo de caída de junio (junio).
6. Inicio del estado 2 de desarrollo del fruto (incremento rápido en tamaño) y final del periodo de caída de junio.

El rendimiento acumulado por árbol durante los cuatro años del experimento indica que el N adicional aplicado en abril o noviembre produjeron un mayor rendimiento de aguacate Hass, de 31 % y 39 %, respectivamente, en comparación con los árboles control que no recibieron el suplemento de N. Los rendimientos obtenidos con los tratamientos en que se aplicó en noviembre fueron significativamente mejores (estadísticamente, $p=0,05$) que los obtenidos en aquellos árboles que recibieron la dosis extra de N en enero, febrero o junio.

Los tratamientos que recibieron el nitrógeno extra en abril o noviembre también dieron lugar a una mayor producción de frutos de gran tamaño de importancia comercial (tamaños de 60, 48 y 40 mm). De acuerdo con este estudio, Lovatt



(2001) sugiere que el calendario de aplicación de fertilizantes es un criterio fundamental a la hora de orientar planes de fertilización. En la sección 5, se describen los planes de fertilización aplicados en la localidad de Morales, como ejemplo para realizar su cálculo, así como los incrementos obtenidos en la producción.

En muchas áreas donde se cultiva aguacate, los productores tienden a aplicar grandes cantidades de N. En Israel, Lahav (1995) encontró que altos niveles de N (aplicado como NH_4NO_3) redujo el pH del suelo, incrementó la clorosis por Fe y no tuvo efecto sobre la producción en árboles de aguacate de los cultivares Ardith y Ettinger. Sin embargo, se presentó un notable efecto negativo sobre la producción en árboles del cultivar Hass. Por otra parte, Meyer et al. (1992), en un experimento llevado a cabo en California, evaluando también dosis altas de N en combinación con láminas de riego en árboles del cultivar Hass, no obtuvieron efecto sobre la producción.

Fósforo

El fósforo es absorbido de la solución del suelo por las raíces de las plantas como ion ortofosfato, principalmente H_2PO_4^- , y en un grado menor como ion fosfato secundario HPO_4^{2-} . Los factores más importantes que controlan su disponibilidad son la concentración en la solución del suelo y la capacidad tampón del P del suelo. La capacidad tampón del suelo corresponde a la resistencia de un suelo particular a elevar sus contenidos de P-disponible, al incrementar la aplicación de fertilizantes fosfatados; en otras palabras, es la cantidad de P como fertilizante que es necesario agregar para elevar el P disponible en 1 mg/kg (ppm) de fosfato por kg de fósforo aplicado. Esta es una característica química del suelo, que se refiere a la relación entre el P-disponible, que es susceptible de mantener en equilibrio en la solución del suelo por cada kg de fósforo agregado como fuente fertilizante soluble al agua, como, por ejemplo, el superfosfato triple (Syers et al. 2008).

La cantidad total de fósforo presente en la capa arable de los suelos oscila normalmente entre 200 y 5.000 mg/kg. Tomando valores medios de 500 mg/kg para los horizontes subsuperficiales, esto equivaldría a valores del orden de 200-4.000 kg de P/ha. Esta cantidad sería, en principio, más que suficiente para abastecer de fósforo cualquier cultivo, pero desafortunadamente solo menos del 1 % está disponible para la planta. La máxima disponibilidad se presenta a pH entre 6,5 y 7,5. A través de varias reacciones químicas, el P se incorpora

a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía, como la adenosina trifosfato (ATF) (Afif 2005).

Como fuentes de fósforo disponibles, se tienen los siguientes productos con los aportes de cada elemento (tabla 1).

Tabla 1. Productos comerciales utilizados como fuente de P para planes de fertilización

Productos comerciales	Porcentaje	
	N	P ₂ O ₅
Fosfato diamónico (DAP)	18	46
Fosfato monoamónico (MAP)	10	48
Ácido fosfórico		50
Roca fosfórica		25-40

Fuente: Elaboración propia





Para las localidades en estudio (Rionegro, Herveo y Morales), se registró un contenido de P disponible en el suelo de 4,3, 20,9 y 4,8 ppm, respectivamente, y un contenido en hojas de 0,11 % para Rionegro y 0,13 % para Herveo y Morales. Con estos contenidos, tanto a nivel de suelo como de planta, se obtuvieron valores de extracción por hectárea de 9,65 kg para Rionegro, 8,74 kg para Herveo y 18,05 kg para Morales, para un rendimiento de 10 t/ha.

Potasio

El potasio es absorbido por las plantas en grandes cantidades, más que cualquier otro elemento mineral, a excepción del nitrógeno. Para el óptimo crecimiento, los niveles de potasio en las plantas pueden encontrarse entre 2 % y 3 % en base seca. Cuando el potasio es limitado, los procesos esenciales de la vida de las plantas, desde la fotosíntesis hasta la regulación estomática, pueden verse afectados. A diferencia del N y P, el K no hace parte de ningún compuesto orgánico vital en las plantas; sin embargo, la presencia de este elemento es vital para su crecimiento, ya que es conocido como un activador enzimático que promueve el metabolismo (Uchida 2000).

Solamente una fracción del potasio del suelo se encuentra disponible para ser tomada por las plantas. Aunque muchos suelos pueden contener grandes cantidades de este elemento, responderían a la fertilización adicional con potasio debido al incremento de su disponibilidad. El potasio existe en el suelo en tres formas: 1) no disponible o forma mineral, con una concentración de 5.000-25.000 mg/kg; 2) lentamente disponible o no intercambiable, con una concentración de 50-750 mg/kg, y 3) fácilmente disponible, que representa la forma intercambiable 40-600 mg/kg y en solución de 1-10 mg/kg (Havlin et al. 1998).

La forma no disponible representa entre el 90 % y 98 % del potasio total de los suelos, y está contenida en minerales primarios (feldespatos, ortosa, microclina, muscovita, biotita). La forma lentamente disponible representa del 1 % al 10 % del potasio total, y puede ser gradualmente tomada por las plantas o fijada. La forma fácilmente disponible es una combinación entre el potasio intercambiable y el disponible en la solución del suelo. En algunos suelos se puede presentar una reversión a formas lentamente disponibles en el proceso de fijación en las arcillas. La forma fácilmente disponible representa

solo una pequeña fracción del potasio total del suelo y se encuentra entre el 0,1 % y 2 %, dependiendo del tipo de suelo.

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K^+ se encuentran: cantidad y tipo del mineral arcilloso, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de K^+ intercambiable, capacidad del suelo para fijar el K^+ , la humedad, la temperatura, la aireación y el pH del suelo (Havlin et al. 1998). Dentro de las funciones básicas del K, se conoce su papel regulador en la apertura y cierre estomático, en el mantenimiento del balance de cargas eléctricas en los sitios de producción de ATP, en promover la translocación de fotosintatos para el crecimiento de las plantas o su almacenamiento en frutos o raíces, en la síntesis de proteínas.

Como fuentes de potasio disponibles, se tienen los siguientes productos con los aportes de cada elemento (tabla 2).

Tabla 2. Productos comerciales utilizados como fuente de K para planes de fertilización

		kg de nutriente por cada 100 kg de producto			
Producto	Fórmula	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S
Cloruro de potasio	KCl			60-62	
Nitrato de potasio	KNO ₃	13-14		44-46	
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄			50-53	18
Carbonato de potasio	K ₂ CO ₃			27-52	

Fuente: Elaboración propia

Para las localidades en estudio (Rionegro, Herveo y Morales), se registraron contenidos de K en el suelo de 307,4 kg/ha, 219,6 kg/ha y 274,5 kg/ha, respectivamente, muy superiores a los valores de extracción de la cosecha, que fueron de 105 kg/ha para las tres localidades. El contenido nutricional en hojas es de 0,75 % para Rionegro, 1,37 % para Herveo y 0,57 % para Morales. Los valores registrados para estas localidades se encuentran dentro de los intervalos de concentración nutrimental óptimos para aguacate Hass, reportados por varios autores (tabla 3).

**Tabla 3.** Intervalos de concentración nutrimental óptimos para aguacate cv. Hass

Nutriente	Unidad	Intervalo estimado	Goodall et al. (1979)	Bertin et al. (1976)	Embleton y Jones (1972)
Nitrógeno	(%)	1,94-2,31	1,60-2,00	1,80-2,20	1,60-2,00
Fósforo	(%)	0,15-0,18	0,1-0,25	0,10-0,30	0,08-0,25
Potasio	(%)	0,81-1,09	0,75-2,00	0,50-2,40	0,75-2,00
Calcio	(%)	1,28-2,59	1,00-3,00	1,00-3,00	1,00-3,00
Magnesio	(%)	0,62-0,77	0,25-0,80	0,30-0,50	0,25-0,80
Hierro	(mg/kg ⁻¹)	85-114	50-200		50-200
Manganeso	(mg/kg ⁻¹)	87-182	30-500		30-500
Zinc	(mg/kg ⁻¹)	20-51	30-150		30-150
Cobre	(mg/kg ⁻¹)	7-32	5-15		5-15
Boro	(mg/kg ⁻¹)	126-352	50-100		50-100

Fuente: Maldonado et al. (2007)

Calcio

El Ca es un elemento requerido para el crecimiento de aguacate y es un componente importante de la pared celular y la superficie exterior de las membranas celulares. En la pared celular vegetal, el Ca estabiliza su estructura, controla el crecimiento, las propiedades de intercambio de iones y la actividad enzimática. En aguacate, los niveles de Ca afectan el rendimiento, el tamaño y la calidad poscosecha. La maduración del fruto se hace más lenta por los altos niveles internos de Ca. En suelos de baja disponibilidad de este elemento, adiciones al suelo han mejorado el crecimiento de las plantas y el rendimiento de frutos cuando se utiliza en balance con otros nutrientes, tales como fósforo y nitrógeno (Messenger et al. 1997).

Este elemento suele ser el catión más abundante en el complejo de cambio del suelo, pero la proporción utilizable depende del grado de saturación. En numerosos suelos, el calcio fijado en el complejo coloidal y el unido a los compuestos húmicos son las formas naturales más abundantes. Incluso en suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes para la adecuada nutrición de las plantas cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes (Monge et al. 1994). El contenido de iones totales en la solución del suelo varía según el tipo de suelo, en la mayoría de los casos entre el 60 % y el 80 % del total de estos iones se encuentra como Ca^{++} y, aunque las raíces aprovechan menos del 3 % del calcio disponible, esta cantidad es suficiente para satisfacer las demandas que, por ejemplo, tienen los frutales (Barber et al. 1963).

El Ca es absorbido por las raíces y distribuido al resto de la planta, principalmente a través del xilema, por efecto de la transpiración. Las hojas, totalmente expandidas con tasas de transpiración más altas, tienden a acumular más Ca que otras hojas jóvenes y frutos. Los factores que afectan la acumulación de Ca en el fruto son la concentración en el suelo, la concentración de otros cationes (ya que compiten con el Ca en zonas de absorción de las raíces), el vigor del crecimiento vegetativo, el manejo del agua y, posiblemente, el portainjerto. Para reducir la incidencia de desórdenes fisiológicos en poscosecha, la relación $\text{Ca}^+\text{Mg}/\text{K}$ en el porcentaje de saturación de bases del suelo debe de mantenerse entre 4 y 5 (Salazar-García y Lazcano-Ferrat 2001).

Varias formas de calcio se utilizan comúnmente como enmiendas del suelo, con efectos variados sobre los nutrientes y el pH del suelo. En general, el Ca soluble eleva el pH del suelo a una condición neutra, ya sea por aumento del pH en un suelo ácido o reducción en un suelo sódico. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se utiliza a menudo para aumentar la permeabilidad del suelo, reducir la formación de costras y aflojar suelos duros. Su aplicación también puede disminuir el pH de un suelo alcalino por precipitación del bicarbonato, además de suministrar Ca y S, como nutrientes esenciales de las plantas.

El nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) estabiliza el pH del suelo a aproximadamente 7 (neutro) y es una fuente importante de nitrógeno en su forma fácilmente asimilable. El carbonato de calcio (calcita, caliza calcítica) es aplicado con frecuencia para elevar el pH de suelos ácidos, que se ven afectados por el uso de sales de amonio, urea o amoniaco anhidro con tendencia a acidificar el suelo.



Magnesio

En el suelo, el magnesio está presente en tres formas:

1. Magnesio de la solución del suelo: está en equilibrio con el magnesio intercambiable y está fácilmente disponible para las plantas.
2. Magnesio intercambiable: es la fracción más importante para determinar el magnesio disponible. El magnesio es adsorbido electrostáticamente a las partículas de arcilla y MO, dependiendo de su liberación del efecto que tiene la absorción de un Mg^{2+} en la solución del suelo, en el equilibrio con la fracción intercambiable. Normalmente, se encuentra en equilibrio con el Mg de la solución del suelo.
3. Magnesio no intercambiable: es el Mg como componente de los minerales primarios en el suelo. El Mg está en la red de cristal que es la base estructural directa de los silicatos del suelo. Como el proceso de descomposición de los minerales en el suelo es muy lento, esta fracción de Mg no está disponible para las plantas.

Las plantas absorben el magnesio en su forma iónica Mg^{+2} , que es la forma de Mg disuelto en la solución del suelo. Esta absorción está dominada por dos procesos principales: 1) absorción pasiva, impulsada por la corriente de transpiración o flujo de masa, estimada en un 85 %; 2) difusión, que es el movimiento de iones de Mg desde zonas de alta concentración hacia zonas de menor concentración.

El magnesio tiene un número de funciones claves en las plantas. Los procesos metabólicos y reacciones que son influenciadas por Mg incluyen:

1. Formación de adenosín trifosfato (ATP) en los cloroplastos.
2. Fijación de dióxido de carbono (CO_2) para procesos fotosintéticos.
3. Síntesis de proteínas.
4. Formación de la clorofila.
5. Descarga del floema.
6. Partición y utilización de carbohidratos.
7. Generación de especies reactivas de oxígeno.
8. Fotooxidación en tejidos de las hojas.

La clorosis intervenal sobre hojas viejas es uno de los síntomas típicos de deficiencia de Mg. Se ha reportado que hasta el 35 % del Mg total en plantas está ligado a los cloroplastos. Sin embargo, esta condición de clorosis es altamente dependiente de la intensidad de luz; es decir, plantas que crecen bajo condiciones de alta intensidad lumínica parecen tener un mayor requerimiento que aquellas que crecen en condiciones de baja luminosidad (Zekri y Obreza 2013).

Se ha demostrado que el Mg en el aguacate promueve un mayor número de brotes nuevos, así como la floración temprana y el mayor amarre de frutos al disminuir el número de abortos (Chirinos 1999). La deficiencia de Mg es nociva, sobre todo cuando el Ca también es deficiente. Este elemento contribuye al estatus hídrico de los tejidos (Cerdas et al. 2006).

Azufre

La absorción y asimilación de azufre y nitrógeno por las plantas se encuentran estrechamente interrelacionadas, al punto de depender el uno del otro, debido a su presencia en aminoácidos y proteínas. El azufre es un constituyente esencial de numerosas proteínas, vitaminas y algunas hormonas vegetales. Como resultado de la deficiencia de azufre, se presenta una reducción en la síntesis de proteínas y en la producción de clorofila y aminoácidos (Zekri y Obreza 2013).

Muchos productores frecuentemente olvidan suministrar azufre a sus cultivos, sin considerarlo como elemento necesario y nutriente crítico para las plantas. En general, el análisis de tejidos es una herramienta importante para diagnosticar deficiencias nutricionales, pero lamentablemente su uso en cultivos de aguacate en Colombia ha sido bajo.

A continuación, se describen algunas características del azufre:

- El 90 % del azufre que se presenta naturalmente en los suelos está asociado con la MO. El humus del suelo contiene alrededor del 5 % de este elemento. Similar a lo que ocurre con el N, la liberación de S depende tanto de la cantidad como de la tasa de descomposición de la MO. El azufre orgánico liberado combinado con el que proviene de otras fuentes, como la lluvia y agua de riego, pueden proveer este elemento en cantidades suficientes para las plantas.



- La forma disponible de azufre para las plantas es el ión negativo sulfato, que puede ser absorbido por el suelo, pero usualmente se presenta en zonas muy profundas que superan la zona de raíces de la mayoría de las plantas.
- El sulfato de calcio es un compuesto soluble utilizado como fuente de liberación lenta de Ca, pero además suministra S.

Considerando que el S está asociado con la formación de clorofila y proteínas, los síntomas de deficiencia son similares a la deficiencia de N, con la diferencia de que los primeros síntomas aparecen sobre el nuevo crecimiento. La clorosis es mucho más severa sobre el nuevo crecimiento, debido a que el S no se mueve desde hojas viejas a jóvenes. Las hojas se tornan de color verde pálido a amarillo. Los síntomas visuales no son fáciles de identificar y, por lo tanto, se sugiere usar como herramienta de diagnóstico el análisis de tejidos.

Una condición que puede generar deficiencia de S se presenta cuando se utilizan altas tasas de fertilizantes nitrogenados. Si el suministro de N no es suplementado con adecuado S, el N disponible para ser usado por los cultivos puede ser excesivo en relación con el S. Bajo condiciones altas de N y bajas de S, los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas pueden verse interrumpidos y las plantas pueden presentar síntomas de deficiencia de S. Las deficiencias de S fueron más comunes en décadas pasadas, con el incremento en el uso de fertilizantes pobres en S, tales como nitrato de amonio, nitrato de potasio, urea, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP) (Zekri y Obreza 2013).

Las fuentes de fertilizantes más comunes para aplicación en suelos son:

- Sulfato de amonio.
- Sulfato de potasio.
- Sulfato de potasio-magnesio.
- Superfosfato.
- Sulfato de calcio.
- Azufre elemental.

Micronutrientes

Los micronutrientes son aquellos elementos que son esenciales para el crecimiento y reproducción de las plantas, pero solo se requieren en concentraciones muy bajas. La mayoría de los micronutrientes actúan como componentes de enzimas y otras estructuras orgánicas. Dos de estos elementos que representan un papel fundamental en las plantas son el zinc y el hierro. El zinc es un componente importante de un número clave de enzimas que participan en el metabolismo de las plantas, así como en la síntesis de proteínas, en el metabolismo de las auxinas y en la integridad de la membrana. El hierro juega un papel clave en el proceso de respiración y en la molécula de clorofila para la fotosíntesis.

La mayoría de micronutrientes están normalmente disponibles en el suelo en cantidades suficientes. Cuando se presentan deficiencias, por lo general, es resultado de las condiciones químicas en el suelo que hacen que dichos elementos se presenten en formas insolubles y que no estén disponibles para la planta. Esto pasa especialmente con el zinc y el hierro, que tienen una solubilidad muy limitada a pH 6 o superior. La deficiencia de elementos menores también puede presentarse por ciertas reacciones químicas que se producen en suelos que contienen cal o que son regados con agua que contiene altas cantidades de bicarbonato. Suelos pobres en drenaje y presencia de enfermedad de la raíz también pueden considerarse como factores limitantes que contribuyen a un pobre desarrollo de raíces absorbentes responsable de la captación de dichos nutrientes (Crowley et al. 2001).

Muy a menudo, las deficiencias de elementos menores se evidencian por la aparición de amarillamiento de las hojas o, en el caso del zinc, por malformaciones en el desarrollo del fruto. En el caso de deficiencia de Fe y Zn, las hojas presentan clorosis ocasionada por problemas con la síntesis de la clorofila. Para el zinc, los niveles normales de las hojas deben oscilar entre los 20 y los 40 ppm. Los síntomas de deficiencia ocurren cuando las concentraciones caen por debajo de 15 o 20 ppm. Las deficiencias de hierro se presentan en concentraciones foliares por debajo de 35-50 ppm (Crowley et al. 2001).



La deficiencia de Mn solo ha sido reportada en árboles de aguacate bajo condiciones de crecimiento de cultivo en arena. Los síntomas incluyen clorosis intervenal y, en casos extremos, las hojas se tornan de un color amarillento opaco (Barnard et al. 1991). Un incremento en la acidez del suelo causada por el uso de fertilizantes puede resultar en un incremento considerable en el contenido de Mn en hojas de aguacate. Bajo estas condiciones, los niveles de Mn en las hojas aumentan entre 2.000 y 2.500 mg/kg. Las concentraciones tóxicas de Mn en las hojas pueden corregirse con una disponibilidad decreciente del elemento en el suelo, a través del incremento en el pH y mejorando el drenaje (Lahav y Whiley 2002).

Las deficiencias de Fe normalmente no son un problema para los árboles de aguacate, a menos que crezcan en suelos calcáreos con pH mayores a 7 o en suelos ácidos con altos contenidos de Mn, ya que una excesiva concentración de este elemento puede suprimir el consumo de Fe. La deficiencia de Fe se caracteriza por un amarillamiento intervenal con estrechas líneas verdes oscuras que se presentan a lo largo de las venas. Una clorosis severa provoca que las hojas se tornen de color amarillo pálido a blanco y síntomas de quemaduras en los márgenes y ápices, y en casos extremos las hojas llegan a caer (Lahav y Whiley 2002). En suelos calcáreos se puede remediar las deficiencias de Fe con la aplicación de quelato de Fe o a través del incremento del pH y la mejora del drenaje en suelos con alta disponibilidad de Mn.

Las deficiencias de Zn se encuentran comúnmente en suelos calcáreos con pH elevados, pero también puede presentarse en zonas con altas precipitaciones que lixivian sales y que conducen a la acidificación del suelo. Los síntomas se presentan en hojas nuevas con moteados intervenales, reducido tamaño de las hojas y crecimiento del brote en forma de roseta (Wallihan et al. 1958; Crowley 1992). Las estrategias que se deben utilizar para la corrección de la deficiencia de Zn dependen, en gran medida, del pH del suelo y, tal vez, de la cantidad de MO disponible para formar complejos metálicos (Srivastava y Sethi 1981).

Cuando se presenta una deficiencia de Cu, las hojas se tornan de un color verde intenso, el crecimiento terminal es afectado, los entrenudos se hacen más cortos y se presenta una muerte progresiva del crecimiento terminal (Lahav y Whiley 2002).

La captación de boro del suelo es en gran parte pasiva y su transporte en la planta se hace a través de los tejidos del xilema (Mengel y Kirkby 1978). El boro en el suelo está disponible para las plantas en forma de ácido bórico $[B(OH)_3]$, que es la forma en la que es absorbida por las raíces y transportada vía xilema (Clarkson y Hanson

1980; Raven 1980). Algunas características del suelo, como pH alto, altos contenidos de calcio y bajos contenidos de humedad, limitan la disponibilidad de boro e inducen deficiencias en cultivos que crecen bajo estas condiciones (Gupta 1979; Gupta y MacLeod 1981). El boro también es fácilmente lixiviado del suelo (Gupta et al. 1985) y, por lo tanto, debe ser sustituido periódicamente en un programa de acuerdo con las condiciones climáticas, el contenido en el suelo y los requerimientos del cultivo (Harkness 1960).

La deficiencia de B es uno de los desórdenes de nutrientes más comunes en cultivos de aguacate alrededor del mundo. Los síntomas se presentan cuando la concentración foliar está por debajo de 25 mg/kg (Whiley et al. 1996) y se caracterizan por presentar hinchazón de los nudos, las lesiones corchosas y el crecimiento horizontal en lugar de crecimiento vertical, debido a la pérdida de la dominancia apical del brote. Algunos frutos de árboles deficientes pueden presentar considerable distorsión del crecimiento con formas desiguales. Los árboles injertados sobre patrones de raza mexicana, como por ejemplo topa-topa y duke 7, son más susceptibles a la deficiencia de B que aquellos injertados sobre patrones guatemaltecos.

Existen reportes previos sobre la aplicación foliar de B para mejorar funciones reproductivas del aguacate, realizados en Suráfrica (Robbertse et al. 1990), California (Jaganath y Lovatt 1995) y Nueva Zelanda (Dixon et al. 2004). Estos trabajos indican que la viabilidad del polen, la fertilización del óvulo y el cuajado del fruto son procesos proclives a mejorar con la aplicación foliar de B en el estado fenológico de coliflor como predominante.





Definición de planes de fertilización

Con el fin de generar criterios para enfocar planes de fertilización que mejoren la productividad en el cultivo de aguacate, se requiere de la aplicación de fuentes externas de nutrimentos, con base en las necesidades de la planta, las características físico-químicas del suelo, las condiciones de cultivo y el comportamiento fenológico del árbol. Además, existen ciertos estados de desarrollo claves en las plantas para orientar los planes de fertilización, que representan fases fenológicas de mayor demanda y que requieren de un suministro adecuado de nutrientes: el estado posterior a la cosecha o de yema en latencia —en donde las plantas han pasado por un periodo de extracción fuerte de nutrientes por el fruto— el momento de apertura floral que está acompañado de mayores tasas transpiratorias, la primera fase de crecimiento del fruto —en donde se presenta una alta actividad de división para construcción de tejidos— y la segunda fase de crecimiento, caracterizada por una mayor actividad de elongación celular y acumulación de grasas y minerales.

Toma de muestras de suelo

Corpoica ha generado una guía para la toma de muestras de suelo y actualmente estableció un convenio con puntos de Efecty-Servientrega, en 750 municipios del país, para la recepción y envío de muestras de análisis de suelos. Esta iniciativa busca mejorar el acceso a herramientas en la toma de decisiones, por parte de los productores, que les permitan mejorar los criterios para enfocar planes de fertilización.

Aspectos generales

A continuación, se relacionan los puntos a tener en cuenta para la toma de muestras de suelos para análisis químico:

1. En general, las muestras se deben transportar de manera que se minimicen los cambios en el contenido del agua del suelo; además, se deben evitar las condiciones ambientales extremas. El suelo se debe mantener lo más fresco posible y evitar tanto la exposición a la luz durante periodos prolongados como la compactación física.
2. Las muestras no deben empacarse en bolsas o materiales que hayan contenido fertilizantes o sustancias químicas.
3. Debe evitarse la manipulación de las muestras cuando se esté fumando y se debe usar guantes para tomar la muestra, con el fin de evitar contaminación por efecto de la sudoración de la persona.
4. Se recomienda tomar una muestra compuesta por 15 a 20 submuestras por hectárea. Dependiendo de la heterogeneidad del terreno (color, textura, relieve, manejo agronómico), puede aumentar o disminuir la intensidad del muestreo.
5. Para el caso de plantaciones de árboles, lo usual es seleccionar al azar entre 15 y 20 árboles cada 10 ha y tomar las submuestras en la gotera del árbol (figura 12).



Figura 12. Zona de muestreo en árboles frutales, forestales, ornamentales, etc.

Fuente: Corpoica (2013)

Proceso de muestreo

Con el fin de garantizar que los resultados de los análisis de suelos reflejen su estado nutricional como herramienta en la toma de decisiones para definir los planes de fertilización, a continuación se presentan algunos criterios que se deben tener en consideración al momento de tomar las muestras que se requieren para el análisis químico.

1. Definición o selección de áreas homogéneas de terreno en la finca (figura 13). Un área homogénea de terreno se puede definir en campo por las siguientes características (Corpoica 2013):

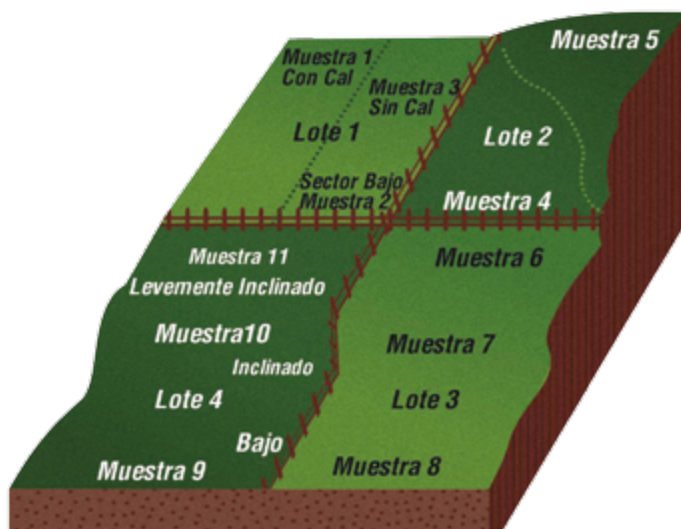


Figura 13. Representación de separación de áreas homogéneas de terreno.

Fuente: Corpoica (2013)

- Relieve: se deben separar áreas con relieve distinto como las áreas planas de otras pendientes.
- Color: se deben separar áreas de terreno con colores distintos; por ejemplo, suelos oscuros aparte de aquellos claros, rojos o amarillos.
- Textura: se deben separar áreas de terreno con texturas arcillosas de las arenosas.
- Drenaje: se deben separar los suelos bien drenados de los mal drenados (suelos bien drenados presentan condición de oxidación, mientras que los mal drenados presentan condiciones de reducción).



- Manejo agronómico: se deben separar suelos con cultivos diferentes o manejos diferentes (figura 13). Es conveniente evitar aquellas áreas muy pequeñas que difieren mucho del resto del campo y que, por su tamaño, no tienen significación en la producción de cultivos.
- 2. Definición de la profundidad del muestreo. Para cultivos perennes como árboles frutales, se puede muestrear de 40 a 60 cm de profundidad. También se debe tener en cuenta que la profundidad para todos los muestreos en el área homogénea de terreno debe ser la misma.
- 3. Establecer el recorrido de terreno. Normalmente existen tres formas de recorrer el terreno: zigzag, zeta o equis (muestreo recorriendo las diagonales del terreno). Se puede realizar cualquier recorrido, siempre y cuando se recorra muy bien el lote, para que las muestras que se tomen sean representativas. Así mismo, se debe evitar tomar muestras en cercanías de las cercas, vallados, saladeros, casas, carreteras, albercas y cualquier anomalía que pueda afectar las características a evaluar del terreno.

Toma de muestras de tejido

Después de una cosecha, y dependiendo del nivel de carga del árbol, se requiere reponer al suelo, al menos la cantidad de nutrientes extraídos por los frutos. En este sentido, las hojas de brotes vegetativos que darán inicio al crecimiento reproductivo del siguiente ciclo de producción pueden ser un indicador del estado nutricional en que queda la planta, después de mantener una alta carga de cosecha. Si se realiza un muestreo posterior, es conveniente tomar hojas del flujo de crecimiento vegetativo que se desarrolla a partir de inflorescencias indeterminadas que hacen parte de la floración principal, puesto que estas están asociadas con el aporte de nutrientes para los frutos en crecimiento.

El tamaño de una unidad de muestreo no debe superar las 2 ha. La parcela debe ser lo más uniforme posible, en relación con la edad, el suelo, el cultivo y el desarrollo de los árboles. Las hojas muestreadas incluyen lámina y pecíolo y se deben tomar a una altura entre 1,5 y 2,0 m. Se toman de seis a ocho hojas de cada uno de los diez árboles muestreados y se guardan en bolsas de papel para su posterior envío para análisis.

Índice de balance de nutrientes

La técnica de índices de balance de nutrientes (IBN) se considera apropiada para definir planes de fertilización en árboles frutales, ya que incluye, para su cálculo, dos criterios: por un lado, un valor estándar (óptimo) del contenido de cada nutriente, obtenido de árboles seleccionados por sus altos rendimientos; por otro lado, la variación fisiológica o desviación estándar del contenido de cada elemento existente en dicha población de árboles seleccionados. Los IBN desarrollados por Kenworthy (1973) han sido utilizados exitosamente en México para diagnosticar el estado nutrimental del aguacate 'Hass' y 'Fuerte' en Michoacán, Nayarit y Puebla (Palacios 1986; Núñez-Moreno et al. 1991; Salazar-García y Lazcano-Ferrat 1999), así como en mangos de las variedades 'Haden' y 'Tommy Atkins' en Nayarit (Salazar-García et al. 1993) y limón mexicano en Michoacán (Maldonado et al. 2001).

Una vez se cuenta con los resultados de los análisis de tejidos, los cálculos se hacen con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1. Si el valor reportado en el laboratorio (X) es menor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s} \right) * 100 \qquad I = (100 - P) * \left(\frac{CV}{100} \right) \qquad B = P + I$$

Ecuación 2. Si el valor reportado en el laboratorio (X) es mayor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s} \right) * 100 \qquad I = (P - 100) * \left(\frac{CV}{100} \right) \qquad B = P - I$$

Donde: S = valor estándar
 I = influencia de la variación
 P = porcentaje del estándar
 CV = coeficiente de variación
 B = índice de balance

Como valores estándar, se tomaron los propuestos por Palacios (1986) y, cuando se careció de valor estándar o CV para aguacate 'Hass' en Michoacán, Salazar-García y Lazcano-Ferrat (1999) calcularon estos valores a partir de los intervalos propuestos por Embleton y Jones (1966) y de los resultados obtenidos en su investigación en árboles con una producción por planta de 85 kg (tabla 4).

Tabla 4. Valores estándar (S) y coeficientes de variación (CV), utilizados para calcular los IBN

Nutrimiento	S	Referencia	CV (%)	Referencia
N (%)	2,35	Palacios (1986)	10,9	Palacios (1986)
P (%)	0,14	Palacios (1986)	11,1	Palacios (1986)
K (%)	1,37	Embleton y Jones (1966z)	15,9	Palacios (1986)
Ca (%)	1,86	Palacios (1986)	17,6	Palacios (1986)
Mg (%)	0,58	Palacios (1986)	15,7	Palacios (1986)
S (%)	0,4	Embleton y Jones (1966)	11	Presente trabajo ^v
Fe (ppm)	91	Palacios (1986)	38,9	Palacios (1986)
Cu (ppm)	10	Embleton y Jones (1966)	70,4	Presente trabajo
Mn (ppm)	240	Palacios (1986)	38,9	Palacios (1986)
Zn (ppm)	27	Palacios (1986)	32,8	Palacios (1986)
B (ppm)	75	Embleton y Jones (1966)	49,3	Presente trabajo
Na (ppm)	296	Palacios (1986)	13,1	Palacios (1986)
Cl (%)	0,25	Embleton y Jones (1966)	96,3	Presente trabajo

^z Niveles adaptados de estudios realizados por Goodall et al. (1965) en hojas completas (lámina + peciolo), sanas, de cinco a siete meses de edad, de la parte media de brotes terminales de primavera, sin fructificar, de árboles de aguacate 'Fuerte'.

^v Calculados a partir de datos obtenidos en Salazar-García y Lazcano-Ferrat (1999)

De acuerdo con los resultados obtenidos después de aplicar las ecuaciones 1 y 2, según fuera el caso, los valores se comparan con los siguientes rangos propuestos por Kenworthy (1973) (tabla 5):

Tabla 5. Rangos en términos de porcentaje del estado nutrimental de hojas de aguacate, de acuerdo con el enfoque del índice de balance de nutrientes propuesto por Kenworthy (1973)

Escasez	Debajo de lo normal	Normal	Arriba de lo normal	Exceso
15-49 %	>49-83 %	>83-117 %	>117-151 %	>151-185 %

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de facilitar la comprensión en el uso de las ecuaciones, para realizar los cálculos a partir de los análisis de tejidos, y de tener una interpretación clara del estado nutricional de la planta; a continuación, se tomarán como referencia los resultados de la localidad de Herveo (Tolima):

El análisis de tejido que se generó es el siguiente (tabla 6):

Tabla 6. Resultados de análisis de tejido de aguacate Hass para la localidad de Herveo (Tolima) y valores estándar

Nutriente	Resultado foliar	Valor estándar	Unidad
Nitrógeno	2,23	2,35	%
Fósforo	0,13	0,14	%
Potasio	0,47	1,37	%
Azufre	0,22	0,4	%
Calcio	2,09	1,86	%
Magnesio	0,38	0,58	%
Hierro	68	91	ppm
Cobre	11	10	ppm
Manganeso	147	240	ppm
Zinc	14	27	ppm
Boro	17,64	75	ppm
Sodio	0,01	296	%

Fuente: Elaboración propia, datos adaptados de Salazar-García y Lazcano-Ferrat (1999)



De acuerdo con las ecuaciones para el cálculo del IBN, y teniendo en cuenta los valores de la tabla 6, solo el calcio y el cobre se encuentran por encima del valor estándar. Para estos dos elementos se aplicaría la ecuación 2; para los demás elementos que se encuentran por debajo del valor estándar, correspondería la ecuación 1.

Ecuación 1. Si el valor reportado en el laboratorio (X) es menor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{x}{s} \right) * 100 \qquad I = (100 - P) * \left(\frac{CV}{100} \right) \qquad B = P + I$$

Nitrógeno:

$$P = \left(\frac{2,223}{2,235} \right) * 100 = 94,89$$

$$I = (100 - 94,89) * \left(\frac{10,9}{100} \right) = 5,11 * 0,109 = 0,556$$

$$B = 94,89 + 0,556 = 94,33$$

Fósforo:

$$P = \left(\frac{0,13}{0,14} \right) * 100 = 92,86$$

$$I = (100 - 92,86) * \left(\frac{11,1}{100} \right) = 7,14 * 0,111 = 0,79$$

$$B = 92,86 + 0,79 = 93,65$$

Potasio:

$$P = \left(\frac{0,47}{1,37} \right) * 100 = 34,31$$

$$I = (100 - 34,31) * \left(\frac{15,9}{100} \right) = 65,69 * 0,159 = 10,44$$

$$B = 34,31 + 10,44 = 44,75$$

Con base en estos cálculos, para los elementos primarios y de acuerdo con la figura 14, en donde se relacionan los rangos en términos de porcentaje del estado nutricional de hojas de aguacate, el N y P se encuentran dentro del rango normal y el K en una condición de escasez.

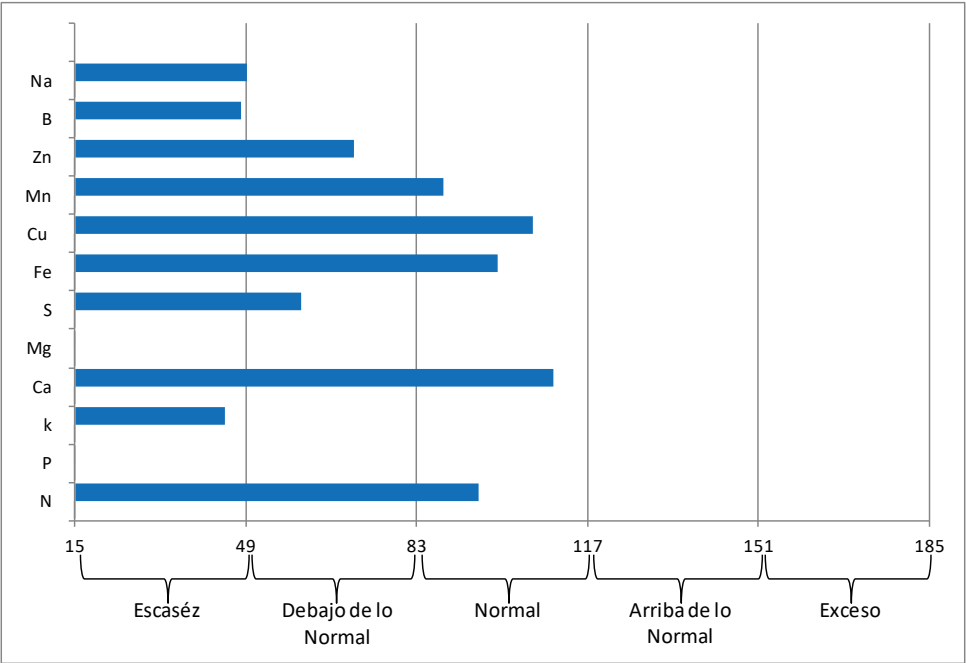


Figura 14. IBN para un cultivo de seis años de edad de aguacate Hass, ubicado en Herveo (Tolima).

Fuente: Elaboración propia

Para el calcio, cuyo valor obtenido en el análisis de tejidos se encuentra por encima del valor estándar, se aplicaría la ecuación 2:

Ecuación 2. Si el valor reportado en el laboratorio (X) es mayor que el valor estándar:

$$P = \left(\frac{X}{s} \right) * 100 \qquad I = (P - 100) * \left(\frac{CV}{100} \right) \qquad B = P - I$$



Calcio:

$$P = \left(\frac{2,09}{1,86} \right) * 100 = 112,36$$

$$I = (112,36 - 100) * \left(\frac{17,6}{100} \right) = 12,36 * 0,176 = 2,175$$

$$B = 112,36 - 2,176 = 110,18$$

De acuerdo con la figura 14, el calcio se encuentra dentro del rango normal.

A continuación, se relaciona el resultado del estado nutrimental para cada elemento (figura 14), con base en el análisis de tejido que se obtuvo en la tabla 6.

De acuerdo con los resultados, se observa que los elementos N, P, Ca, Fe, Cu y Mn se encuentran dentro del rango normal; los elementos Mg, S y Zn se encuentran debajo de lo normal, y los elementos K, B y Na se encuentran en condición de escasez. Con base en esta información, se debe tomar la decisión sobre la cantidad de fertilizante que se debe aplicar, haciendo el respectivo análisis para cada elemento.

La ecuación general, para el cálculo de las necesidades de fertilización, considera la cantidad del elemento requerida por el cultivo; en otras palabras, la cantidad de cada elemento extraída por cosecha, el contenido de cada elemento disponible en el suelo y la eficiencia de la aplicación. El análisis de tejidos y el enfoque del IBN para su interpretación son un complemento importante de esta ecuación, ya que permite conocer la condición en que se encuentra cada elemento en la planta, con el fin de balancear los nutrientes presentes en el suelo, sin incurrir en excesos o deficiencias, y procurando un máximo rendimiento del cultivo.

Ecuación 3. Cálculo de las necesidades de fertilización para cada elemento.

$$NF = \left(\frac{CRPC - CPS}{EA} \right) * 100$$

Donde: NF = Necesidad de fertilización
 CRPC = Cantidad requerida por el cultivo
 CPS = Cantidad presente en el suelo
 EA = Eficiencia de la aplicación

Para ello, se proponen algunas combinaciones de las posibles situaciones que se pueden llegar a encontrar en un cultivo, en relación con los niveles de extracción de cada elemento por el fruto, la disponibilidad del elemento en el suelo y el contenido en hojas (tabla 7).

Tabla 7. Posibles combinaciones de relaciones entre la disponibilidad de elementos en el suelo y el contenido en la planta, para determinar la cantidad de fertilizante a aplicar

Posibles combinaciones en nutrición mineral				Interpretación en análisis foliar	Cantidad de fertilizante a aplicar (%)	Observaciones
1	Extracción de nutrientes por el fruto (t/ha)	<	Disponibilidad de nutrientes en el suelo	Normal	30-60	Se sugiere aplicar al menos la cantidad extraída por la cosecha en términos del porcentaje que represente este valor, frente a la sumatoria del mismo con el contenido del elemento en el suelo, para evitar su agotamiento.
2		>		Normal	100 %	Se aplica la cantidad requerida del elemento en su totalidad.
3		>		Abajo de lo normal	100 %	Se sugiere revisar pH del suelo, fuentes de fertilización, frecuencias y plan de fertilización que se venía aplicando.

(Continúa)



(Continuación tabla 7)

Posibles combinaciones en nutrición mineral			Interpretación en análisis foliar	Cantidad de fertilizante a aplicar (%)	Observaciones
4	Extracción de nutrientes por el fruto (t/ha)	<	Abajo de lo normal	100 %	Revisar relaciones entre nutrientes, fuentes de fertilizantes y pH del suelo, que puede estar afectando su disponibilidad
5		<	Exceso	0 %	No aplicar en el inicio del ciclo; realizar un análisis foliar y solo si es necesario incluir el elemento en el plan de fertilización en una dosis baja, puede ser 30 %, para evitar el agotamiento de los contenidos en el suelo.
6		>	Exceso	0 %	Revisar dosis de fertilización, requerimientos de nutrientes y realizar análisis foliar posterior

Fuente:Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 7, por ejemplo, en la combinación 1, si la extracción del elemento es menor que la cantidad del elemento disponible en el suelo y, en el análisis de tejido, el contenido es normal de acuerdo con el IBN, se reduciría la aplicación a un 60 %, con el fin de reponer al menos lo que extrae la cosecha y no agotar el contenido en el suelo.

Cálculos de fertilizantes

Con el fin de facilitar la comprensión en la aplicación de las ecuaciones para llegar al cálculo del plan de fertilización, tomaremos como ejemplo el resultado del análisis de suelo para la localidad de Morales. Los valores para cada

elemento que se obtengan del análisis serán interpretados con base en las tablas propuestas en la quinta aproximación del manual de asistencia técnica (ICA 1992) (tabla 8).

Tabla 8. Valores propuestos en la quinta aproximación del manual de asistencia técnica

Nutriente	Interpretación		
	Bajo	Normal	Alto
MO Clima frío (%)	<5	5-10	>10
MO Clima templado (%)	<3	3-5	>5
MO Clima cálido (%)	<2	2-3	>3
P Método Olsen (mg/kg)	<20	20-40	>40
P Método Bray (mg/kg)	<8	8-13	>13
Azufre (mg/kg)	<10	10-20	>20
Calcio (cmol/kg)	<3	3-10	>10
Magnesio (cmol/kg)	<1,5	1,5-3,0	>3
Potasio (cmol/kg)	<0,2	0,2-0,4	>0,4
CICE	<10	10-20	>20
CE (dS/m)	<2	2-4	>4
Hierro (mg/kg)	<50	50-100	>100
Cobre (mg/kg)	<1,5	1,5-3	>3
Manganeso (mg/kg)	<5	5-10	>10
Zinc (mg/kg)	<1,5	1,5-3	>3
Boro (mg/kg)	<0,2	0,2-0,4	>0,4

Fuente: ICA (1992)



La interpretación inicial arroja como resultado la tabla 9, en la cual se especifica el rango en el que se encuentra cada elemento. A partir de esta información, se define la cantidad de fertilizante a aplicar por cada nutriente, utilizando la ecuación 3.

Tabla 9. Contenido nutricional del suelo en la localidad de Morales (Cauca) y diagnóstico del rango en la quinta aproximación del manual de asistencia técnica

Elemento	0-15 cm	Interpretación	15-30 cm	Interpretación	30-45 cm	Interpretación
pH	5,33	Fuertemente ácido	5,45	Fuertemente ácido	5,67	Moderadamente ácido
MO (%)	17,14	Alto	13,13	Alto	6,8	Alto
Fósforo (mg/kg)	4,8	Bajo	1,1	Bajo	0,8	Bajo
Azufre (mg/kg)	7,3	Bajo	21,4	Alto	25,5	Alto
Aluminio (cmol/kg)	0,3		-		-	
Sat. Al (%)	6,5		-		-	
Calcio (cmol/kg)	2,3	Bajo	0,81	Bajo	0,63	Bajo
Magnesio (cmol/kg)	1,05	Bajo	0,39	Bajo	0,26	Bajo
Potasio (cmol/kg)	0,32	Normal	0,21	Normal	0,21	Normal
Sodio (cmol/kg)	0,04	Normal	0,04	Normal	0,03	Normal
CICE	4,08	Baja	1,45	Baja	1,13	Baja
CE (dS/m)	0,33	Normal	0,15	Normal	0,09	Normal
Hierro (mg/kg)	86	Normal	114	Alto	114	Alto

(Continúa)

(Continuación tabla 9)

Cobre (mg/kg)	3,4	Alto	3,6	Alto	2,2	Normal
Manganeso (mg/kg)	2,1	Bajo	1,5	Bajo	1	Bajo
Zinc (mg/kg)	3,2	Alto	1,4	Bajo	0,9	Bajo
Boro (mg/kg)	0,2	Bajo	0,22	Normal	0,2	Bajo
Textura	F	Franca	AF	Arenoso franco	FA	Franco arenoso

Fuente: Elaboración propia, apartir de ICA (1992)

Según la información que se requiere para la ecuación 3, se necesita conocer la cantidad de nutrientes presente en el suelo (CPS), expresado en kg/ha; para su cálculo, primero se debe conocer cuál es el peso de una hectárea de suelo, aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Cálculo para determinar el peso de una hectárea de suelo.

$$\text{Peso de suelo (kg/ha)} = \text{área (m}^2\text{)} * \text{prof (m)} * \text{Da (g/cm}^3\text{)} * 1.000$$

$$\text{PS} = 10.000 \text{ m}^2 * 0,45 \text{ m} * 0,52 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 1.000 = 2.340.000 \text{ kg suelo/ha}$$

Esta información será retomada en el ejercicio para calcular el requerimiento de cada elemento.

Además de la cantidad de nutrientes presentes en el suelo, se requiere conocer la cantidad que requiere el cultivo. Este valor representa la cantidad de nutrientes que extrae la cosecha. A partir de los valores obtenidos en el análisis del contenido de elementos minerales del fruto, se hicieron los cálculos para obtener los valores de extracción en kg/ha, para un rendimiento de 10 t/ha, que se relacionan en la tabla 10. Además, se incluyen los porcentajes de eficiencia de cada elemento.



Tabla 10. Valores de extracción de nutrientes en un cultivo de aguacate Hass (rendimiento 10 t/ha) y eficiencia de cada elemento

Elemento	Extracción (kg/ha)	Eficiencia (%)
Nitrógeno	94,56	50
Fósforo	22,08	10
Potasio	105,9	70
Azufre	16,41	80
Calcio	14,22	60
Magnesio	5,49	60
Hierro	0,222	80
Cobre	0,09	80
Manganeso	0,06	80
Zinc	0,135	80
Boro	0,111	80

Fuente: Elaboración propia

Con la información aportada hasta aquí, a continuación, se realizará el cálculo para cada nutriente.

Nitrógeno

Retomemos la fórmula general para el cálculo de la necesidad de fertilización:

$$NF = \left(\frac{CRPC - CPS}{EA} \right) * 100$$

Donde: NF = Necesidad de fertilización
CRPC = Cantidad requerida por el cultivo
CPS = Cantidad presente en el suelo
EA = Eficiencia de la aplicación

Para el cálculo de la CPS, se parte del aporte de nitrógeno que hace el suelo y, para ello, se considera el contenido de MO que reporta el análisis de suelo. En la tabla 9, se encuentran los valores de MO para tres profundidades (0-15, 15-30, 30-45 cm). Para este ejercicio, se utilizará el promedio de las tres profundidades, que abarque la profundidad efectiva de la raíz (0-45 cm).

Dado lo anterior, el contenido de MO para una profundidad de 0-45 cm es 12,36 %, lo que significa que en 100 kg de suelo hay 12,36 kg de MO. Después, se hace el cálculo para una hectárea de suelo, con base en el resultado de la ecuación 4, es decir, se considera el peso de una hectárea de suelo:

Si 100 kg suelo – 12,36 kg MO

2.340.000 kg suelo – X

$X = 289.224 \text{ kg MO/ha}$

La MO contiene 5 % de N total (orgánico e inorgánico):

$N \text{ Total} = 289.224 \text{ kg MO} \times 5 \% = 14.461,2 \text{ kg N Total/ha}$

El coeficiente de mineralización de la MO es de 1,5 %:

$N \text{ inorg.disponible} = 14.461,2 \times 1,5 \% = 216,92 \text{ kg N inorg.disponible/año}$

$N \text{ disponible/planta} = \frac{216,92 \text{ kg N/ha}}{285 \text{ plantas/ha}} = 761,12 \text{ N / planta}$



Con el valor obtenido de la cantidad de N presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 94,56 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 216,96 kg N/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 50 % (tomado de la tabla 10)

En este caso, la cantidad presente en el suelo excede el valor extraído por la cosecha, lo que significa que se debe aplicar al menos un porcentaje de la cantidad de nitrógeno extraída por la cosecha. La decisión de la cantidad a aplicar se toma con el resultado de la interpretación del IBN obtenido a partir del análisis foliar. Para este caso, solo se aplicaría el 30 %, teniendo en cuenta que el análisis foliar de acuerdo con la interpretación del IBN dio como resultado un contenido normal del elemento (figura 14).

Cantidad requerida por el cultivo (CRPC) = 94,56 kg/ha x 30 % = 28,37 kg/ha.

Fósforo

Para el cálculo de las necesidades de P, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 2,23 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 2,23 \text{ kg P}$$

$$2.340.000 \text{ kg suelo/ha} - X$$

$$X = 5,22 \text{ kg de P/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de P presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 22,08 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 5,22 kg de P/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 10 %

$$NF = \left(\frac{22,08 - 5,22}{10} \right) * 100 = 168,6 \text{ kg P/ha}$$

Con los contenidos de P presentes en el suelo y en la planta, y teniendo en cuenta la cantidad extraída por una cosecha, solo se necesita aportar 168,6 kg de P. Este valor corresponde a la forma elemental del elemento, pero debe expresarse en su forma oxidada y, para ello, se multiplica por un factor, que para este caso es 2,29:

$$168,6 \text{ kg} * 2,29 = 386,1 \text{ kg P}_2\text{O}_4 / \text{ha}$$

De acuerdo con la figura 14, que expresa la cantidad de nutrientes presentes en la planta basados en el IBN, el P presenta una condición de normalidad. Teniendo en cuenta que la cantidad requerida por el cultivo (22,08 kg/ha) supera la cantidad presente en el suelo (5,22 kg/ha), se aplica el 100 % del fertilizante calculado (386,1 kg P₂O₄/ha).

Potasio

Para el cálculo de las necesidades de K, el contenido en los primeros 45 cm de profundidad del suelo es de 0,25 cmol/kg, que equivalen a miliequivalentes de K por cada 100 kg de suelo.

$$1 \text{ meq K} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia} * 1.000} = \frac{39}{1 * 1.000} = 0,039 \text{ meq } \frac{\text{K}}{100} \text{ kg suelo}$$

A partir de este valor, se calcula la cantidad de K para una hectárea de suelo:

$$\text{Si } 0,039 \text{ meq K} - 100 \text{ kg suelo}$$

$$X - 2.340.000 \text{ kg suelo/ha}$$

$$X = 912,6 \text{ meq K/ha}$$



Recordemos que este resultado de 912,6 meq K/ha se obtuvo a partir de convertir 1 cmol/kg en miliequivalentes por cada 100 kg de suelo. A continuación, se hace el cálculo para el contenido de K reportado en el análisis de 0,25 cmol/kg o 0,25 meq/100 kg:

$$\text{Si } 912,6 \text{ kg K/ha} - 1 \text{ meq K}$$

$$X - 0,25 \text{ meq K}$$

$$X = 228,15 \text{ kg K/ha}$$

El valor obtenido corresponde a la forma elemental del elemento; para expresarlo en su forma oxidada se multiplica por un factor que, en este caso, es 1,2046:

$$228,15 \text{ kg K/(ha} \cdot \text{)} \cdot 1,2046 = 274,83 \text{ kg K/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de K presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 105,9 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 274,83 kg K/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 70 %

Teniendo en cuenta que, en este caso, el contenido presente en el suelo (274,83 kg de K/ha) es superior a la cantidad extraída (105,9 kg de K/ha), el plan de fertilización al menos contempla devolver parte de los nutrientes extraídos por la cosecha. El contenido de K en la planta de acuerdo con el IBN (figura 14) se encuentra en condición de escasez, indicando que posiblemente, a pesar de existir un alto contenido del elemento en el suelo, se debe revisar las fuentes de fertilizante utilizadas, que están generando algún inconveniente en la absorción del elemento por la planta. Después de revisada la fuente del fertilizante, se sugiere aplica al menos el 30 %, para evitar el agotamiento de las reservas del elemento en el suelo.

$$105,9 \text{ kg K/(ha} \cdot \text{)} \cdot 0,3 = 31,5 \text{ kg K/ha}$$

Calcio

Para el cálculo de las necesidades de Ca, el contenido en los primeros 45 cm de profundidad del suelo es de 1,25 cmol/kg, que equivale a miliequivalentes de Ca por cada 100 kg de suelo:

$$1\text{meqCa} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia} * 1.000} = \frac{40}{2 * 1.000} = 0,02 \text{ meq} \frac{\text{Ca}}{100} \text{ kg suelo}$$

A partir de este valor se calcula la cantidad de Ca para una hectárea de suelo:

$$\text{Si } 0,02 \text{ meq Ca} - 100 \text{ kg suelo}$$

$$\text{X} - 2.340.000 \text{ kg suelo/ha}$$

$$\text{X} = 468 \text{ meq Ca/ha}$$

Recordemos que este resultado de 468 meq Ca /ha se obtuvo a partir de convertir 1 cmol/kg en miliequivalentes por cada 100 kg de suelo. A continuación, se hace el cálculo para el contenido de Ca reportado en el análisis de 1,25 cmol/kg o 1,25 meq/100 kg.

$$\text{Si } 468 \text{ kg Ca/(ha} - 1 \text{ meq Ca)}$$

$$\text{X} - 1,25 \text{ meq Ca}$$

$$\text{X} = 585 \text{ kg Ca/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Ca presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 14,22 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 585 kg de Ca/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 60 %



De acuerdo con el análisis de suelo, la cantidad de Ca presente en el suelo es evidentemente superior a lo extraído por la cosecha. Para este elemento se presenta una condición de normalidad (figura 14) del contenido en la planta. Para este caso, no se incluye al Ca dentro del plan de fertilización, aunque se recomienda monitorear su contenido en la planta a través del análisis de tejido, para verificar los niveles disponibles en el siguiente ciclo productivo. Recordemos que Monge et al. (1994) indican que, en numerosos suelos, el calcio fijado en el complejo coloidal y el unido a los compuestos húmicos son las formas naturales más abundantes; incluso, en suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes para la adecuada nutrición de las plantas cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes.

Magnesio

Para el cálculo de las necesidades de Mg, el contenido en los primeros 45 cm de profundidad del suelo es de 0,57 cmol/kg, que equivale a miliequivalentes de Mg por cada 100 kg de suelo:

$$1\text{meqMg} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia} \times 1.000} = \frac{24}{2 \times 1.000} = 0,012 \text{ meq} \frac{\text{Mg}}{100} \text{ kg suelo}$$

A partir de este valor se calcula la cantidad de Mg para una hectárea de suelo:

Si 0,012 Mg – 100 kg suelo

X – 2.340.000 kg suelo/ha

X = 280,8 meq Mg/ha



Recordemos que este resultado de 468 meq Mg/ha se obtuvo a partir de convertir 1 cmol/kg en miliequivalentes por cada 100 kg de suelo. A continuación, se hace el cálculo para el contenido de Mg reportado en el análisis de 0,57 cmol/kg o 0,57 meq/100 kg:

$$\text{Si } 280,8 \text{ kg Mg/ha} - 1 \text{ meq Mg}$$

$$X - 0,57 \text{ meq Mg}$$

$$X = 160,1 \text{ kg de Mg/ha}$$

El valor obtenido corresponde a la forma elemental del elemento; para expresarlo en su forma oxidada, se multiplica por un factor que, en este caso, es 1,6581:

$$160,1 \text{ kg Mg/ha} * 1,6581 = 265,46 \text{ kg Mg/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Mg presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 5,49 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 265,46 kg de Mg/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 60 %

De acuerdo con el análisis de suelo, el Mg presenta una situación similar al Ca: el contenido presente en el suelo es evidentemente superior a lo extraído por la cosecha. El contenido de Mg en la planta de acuerdo con el IBN presenta una condición debajo de lo normal (figura 14). Para este caso, no se incluye al Mg dentro del plan de fertilización por los altos contenidos disponibles en el suelo. No obstante, se recomienda monitorear su contenido en la planta a través del análisis de tejido y en el suelo, posterior a la cosecha, para verificar los niveles disponibles para el siguiente ciclo productivo y monitorear su posible agotamiento.



Azufre

Para el cálculo de las necesidades de S, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 18,07 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 18,07 \text{ kg de S}$$

$$2.340.000 \text{ suelo/ha} - X$$

$$X = 42,28 \text{ kg de S/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de S presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 16,41 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 42,28 kg de S/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 80 %

En este caso, la cantidad presente en el suelo es mayor a lo extraído por la cosecha y el contenido en la planta se encuentra por debajo de lo normal. Para evitar el agotamiento de las reservas de S en el suelo, se puede conseguir su aporte con el uso de fertilizantes que tengan el elemento en su composición, como por ejemplo el Sulfato de amonio, que tiene una composición de 21,5 % de nitrógeno total y 24 % de azufre total.

Micronutrientes

De manera general, los elementos menores se encuentran con altos contenidos en el suelo; a pesar de ello, elementos como B, Fe y Zn se encuentran en una condición por debajo de lo normal, de acuerdo con el análisis de tejidos y su interpretación basada en el enfoque del IBN. Para suplir las necesidades de elementos menores, se recomienda realizar su aplicación por vía foliar, con el fin de buscar una mayor eficiencia en su absorción y evitar posibles incrementos en el suelo, lo que sucedería si se aplicaran por vía edáfica.

Hierro

Para el cálculo de las necesidades de Fe, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 104,67 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 104,67 \text{ kg Fe}$$

$$2.340.000 \text{ kg suelo}/(\text{ha} - X)$$

$$X = 244,93 \text{ kg de Fe/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Fe presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 0,222 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 244,93 kg de Fe/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 80 %

De acuerdo con el análisis de suelo, el Fe presenta un contenido evidentemente superior a lo extraído por la cosecha. Para Fe se presenta una condición de normalidad (figura 14) en el contenido del elemento en la planta, de acuerdo con el IBN. Para este caso, no se incluye al Fe dentro del plan de fertilización edáfica, pero sí se recomienda realizar la aplicación de elemento por vía foliar de acuerdo con las recomendaciones del producto comercial que se utilice, siempre y cuando se presenten síntomas de deficiencia.

Cobre

Para el cálculo de las necesidades de Cu, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 3,07 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 3,07 \text{ kg Cu}$$

$$2.340.000 \text{ kg suelo}/(\text{ha} - X)$$

$$X = 7,18 \text{ kg de Cu/ha}$$



Con el valor obtenido de la cantidad de Cu presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 0,09 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 7,18 kg de Cu/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 80 %

De acuerdo con el análisis de suelo, el Cu presenta un contenido superior a lo extraído por la cosecha. Para Cu se presenta una condición de normalidad (figura 14) en el contenido del elemento en la planta, de acuerdo con el IBN. Por lo tanto, para este caso no se incluye al Cu dentro del plan de fertilización edáfica por el alto contenido en el suelo, aunque se recomienda realizar la aplicación de elemento por vía foliar, de acuerdo con las recomendaciones del producto comercial que se utilice, siempre y cuando se presenten síntomas de deficiencia.

Manganeso

Para el cálculo de las necesidades de Mn, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 1,53 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 1,53 \text{ kg Mn}$$

$$2.340.000 \text{ kg suelo}/(\text{ha} - X)$$

$$X = 3,58 \text{ kg de Mn/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Mn presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 0,06 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 3,58 kg de Mn/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 80 %

De acuerdo con el análisis de suelo, el Mn presenta un contenido superior a lo extraído por la cosecha. Para Mn se presenta una condición normal (figura 14) del contenido del elemento en la planta, de acuerdo con el IBN. Por tal razón, para este caso no se incluye al Mn dentro del plan de fertilización edáfica, pero se recomienda realizar la aplicación de elemento por vía foliar, de acuerdo con las recomendaciones del producto comercial que se utilice, siempre y cuando se presenten síntomas de deficiencia.

Zinc

Para el cálculo de las necesidades de Zn, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 1,83 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 1,83 \text{ kg Zn}$$

$$2.340.000 \text{ kg suelo}/(\text{ha} - X)$$

$$X = 4,28 \text{ kg de Zn/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de Zn presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 0,135 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 4,28 kg de Zn/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 80 %

De acuerdo con el análisis de suelo, el Zn presenta un contenido superior a lo extraído por la cosecha. Para Zn se presenta una condición por debajo de lo normal (figura 14) del contenido del elemento en la planta, de acuerdo con el IBN. No obstante, para este caso no se incluye al Zn dentro del plan de fertilización edáfica, pero sí se recomienda realizar la aplicación de elemento por vía foliar de acuerdo con las recomendaciones del producto comercial que se utilice, siempre y cuando se presenten síntomas de deficiencia.



Boro

Para el cálculo de las necesidades de B, de acuerdo con el análisis de suelos, el contenido es de 0,21 mg/kg, para una profundidad de 0-45 cm. A partir de este valor, se hace el cálculo del contenido para una hectárea:

$$\text{Si } 1.000.000 \text{ kg suelo} - 0,21 \text{ kg B}$$

$$2.340.000 \text{ kg suelo}/(\text{ha} - X)$$

$$X = 0,49 \text{ kg de B/ha}$$

Con el valor obtenido de la cantidad de B presente en el suelo, se tienen los valores requeridos para despejar la ecuación 3.

NF: Necesidad de fertilización

CRPC: Cantidad requerida por el cultivo = 0,111 kg/ha (tomado de la tabla 10)

CPS: Cantidad presente en el suelo = 0,49 kg de B/ha

EA: Eficiencia de la aplicación = 80 %

De acuerdo con el análisis de suelo, el B presenta un contenido superior a lo extraído por la cosecha. Para B, a pesar de los altos contenidos del elemento en el suelo, se presenta una condición por escasez (figura 14) del contenido del elemento en la planta, de acuerdo con el IBN. Sin embargo, para este caso no se incluye al B dentro del plan de fertilización edáfica, aunque se recomienda realizar la aplicación del elemento por vía foliar, de acuerdo con las recomendaciones del producto comercial que se utilice.





Conclusiones

Bajo condiciones subtropicales, se han desarrollado estrategias de manejo del cultivo de aguacate, sustentadas en el conocimiento básico generado a partir de la inversión en investigación. Tomando como referencia estos avances, bajo condiciones del trópico colombiano, se obtuvieron incrementos en el rendimiento del cultivo bajo condiciones de Antioquia, Cauca y Tolima, con el manejo de la fertilización basado en el IBN. El esquema propuesto en este libro para el manejo de la fertilización en aguacate Hass se presenta como una herramienta en la toma de decisiones que le permitan al productor adquirir criterios técnicos, buscando progresivamente un mayor nivel de tecnificación de su cultivo, que se refleje en el incremento de la producción.



Los autores

Alexander Rebolledo Roa

arebolledor@corpoica.org.co

Ingeniero agrónomo, PhD en Biología vegetal con énfasis en fisiología vegetal de la Universidad Politécnica de Valencia (España), y con enfoque de investigación en el estudio de los factores externos (factores edafoclimáticos) e internos (relación fuente sumidero, contenido mineral y hormonal endógeno, relaciones hídricas, etc.), que determinan el comportamiento productivo de especies frutales (cítricos, aguacate, pitaya) en diferentes zonas productoras del país. Ha sido profesor del área de fisiología vegetal de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Actualmente, se desempeña como investigador principal delegado del macroproyecto de aguacate a nivel nacional en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Diana Yaritza Dorado

ddorado@corpoica.org.co

Ingeniera agrícola de la Universidad del Valle, magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira; con experiencia en investigación en la relación suelo, agua, planta, atmósfera, manejo del recurso hídrico, valoración química y física de suelos y fertilización en frutales y cultivos transitorios (maracuyá, cítricos, melón, aguacate, praderas y papa) en la región Pacífica y Andina de Colombia. En la actualidad, se desempeña como investigadora en el área de manejo y conservación de suelos y aguas en los proyectos: “Estimación de la producción de pasturas y optimización del agua”, “Mejoramiento tecnológico y productivo del sistema de papa en el departamento de Nariño” y “Estrategias para la conformación y el fortalecimiento de los sistemas territoriales de innovación (STI)” en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).



Referencias

- Adams F. 1984. Soil Acidity and Liming. Madison, EE. UU.: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Chapter 5, Crop response to lime in the southern United States; pp. 211-265.
- Añel E. 2005. Dinámica del fósforo en suelos calcáreos de áreas mediterráneas: trabajo experimental. Gijón, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- Agronet. 2016. Estadísticas del sector agropecuario. Producto aguacate. [consultado 2017 mar 3]. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.
- Alcaraz ML, Thorp TG, Hormaza JI. 2013. Phenological growth stages of avocado (*Persea americana*) according to the BBCH scale. *Sci Hort.* 164:434-439.
- Arechavaleta M, Rodríguez S, Zurita N, García A, coordinadores. 2010. Lista de especies silvestres de Canarias. Hongos, plantas y animales terrestres 2009. Santa Cruz de Tenerife, España: Gobierno de Canarias.
- Aubert B, Lossois S. 1972. Considérations sur la phénologie des espèces arbustives. *Fruits.* 27(4):269-286.
- Barber SA, Walker JM, Vasey EH. 1963. Mechanisms for the movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root. *J Agric Food Chem.* 11(3):204-207.
- Barmore CR. 1977. Avocado fruit maturity. En: Sauls JW, Phillips RL, Jackson LK, editores. *Proceedings of the First International Tropical Fruit Short Course. The Avocado.* Gainesville, EE. UU.: Florida University Press. pp. 103-109.



- Barnard RO, Cillie GEB, Kotzé JM. 1991. Deficiency symptoms in avocados. S Afr Avocado Growers' Assoc Yrb. 14, 67-71.
- Bender GS, Faber B. 1999. Avocado fertilization. San Diego, EE. UU: University California Cooperative Extension.
- Bender GS. 2012. Avocado production in California a cultural handbook for growers. San Diego, EE. UU.: University of California Cooperative Extension, California Avocado Society. Capítulo 2. Avocado botany and commercial cultivars grown in California. pp. 2-15.
- Bertin Y, Blondeau JP, Dormoy M. 1976. Premiers résultats d'une étude d'analyse foliaire sur l'avocatier Lula à la Martinique. Fruits. 31(7-8):459-471.
- Bost J. 2009. Edible plants of the Chinantla, Oaxaca, Mexico with an emphasis on the participatory domestication prospects of *Persea schiedeana* [tesis de maestría]. [Gainesville, EE. UU.]: University of Florida.
- Cabezas C, Hueso JJ, Cuevas J. 2003. Identificación y descripción de los estados fenológicos-tipo del aguacate (*Persea americana* Mill.). En: Consejería de Agricultura y Pesca. Proceedings v World Avocado Congress. Málaga, España. pp. 237-242.
- Cameron SH, Mueller RT, Wallace A. 1952. Nutrient composition and seasonal losses of avocado trees. Calif Avocado Soc Yrbk. 37:201-209.
- Campbell CW, Malo SE. 1976. A survey of avocado cultivars. En: Sauls JW, Phillips RL, Jackson LK, editores. Proceedings of the First International Tropical Fruit Short Course. The avocado. Gainesville, EE. UU.: University Florida Cooperative Extension Service. pp. 20-24.

- Can-Alonzo C, Quezada-Euán JJ, Xiu-Ancona P, Moo-Valle H, Valdovinos-Núñez GR, Medina-Peralta S. 2005. Pollination of 'criollo' avocados (*Persea americana*) and the behaviour of associated bees in subtropical Mexico. *J Apic Res.* 44(1):3-8.
- [Cenicafé] Centro Nacional de Investigaciones de Café. 2015. Archivos de información climática 2005-2015. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Cerdas MM, Montero M, Díaz E. 2006. Manual de manejo pre y poscosecha de aguacate (*Persea americana*). San José, Costa Rica: [MAG] Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Chien SH, Gearhart MM, Collamer DJ. 2008. The effect of different ammonical nitrogen sources on soil acidification. *Soil Sci.* 173(8):544-551.
- Chirinos H. 1999. Fertilización del Aguacate. *Inf Agron.* 3(6):11-12.
- Clarkson DT, Hanson JB. 1980. Mineral nutrition of higher plants. *Ann Rev Plant Physiol.* 31:239-298.
- [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. 2013. Guía toma de muestras de suelos. Mosquera, Colombia: Corpoica.
- Cossio-Vargas LE, Salazar-García S, González-Duran IJL, Medina-Torres R. 2007. Algunos aspectos reproductivos del aguacate 'Hass' en clima semicálido. En: Comité de Paltas. *Proceedings VI World Avocado Congress.* Viña del Mar, Chile: Comité de Paltas. pp. 1-11.



- Crowley DE. 1992. Soil fertility and the mineral nutrition of avocado. Physical, Chemical, and Biological Properties of Soil and Their Importance in the Culture of Avocado. San Juan Capistrano, EE. UU.: California Avocado Development Organization and California Avocado Society.
- Crowley DE, Smith W, Faber B, Arpaia ML. 2001. Trace metal nutrition of avocado. AvoResearch. 1(3):9-11.
- Cruz-Castillo JG, Del Ángel-Coronel OA, de la Cruz-Medina J, Joaquín-Martínez MC. 2007. Características morfológicas y bioquímicas de frutos de chinene (*Persea schiedeana* Nees.). Rev Chapingo Ser Hortic. 13(2):141-147.
- Cummings K, Schroeder CA. 1942. Anatomy of the avocado fruit. Calif Avocado Soc Yrbk. 27:56-64.
- Dixon J, Sher D. 2002. Pollination of avocados. NZ Avocado Gowers Assoc Ann Res Rep. 2:31-40.
- Dixon J, Smith DB, Elmsly TA, Fields FP. 2004. The impact of foliar applications of nitrogen and boron on 'Hass' avocado fruit set in 2004. NZ Avocado Gowers Assoc Ann Res Rep. 5:27-34.
- Dixon J, Lamond CB, Smith DB, Elmsly TA. 2006. Patterns of fruit growth and fruit drop of 'Hass' avocado trees in the Western Bay of Plenty, New Zealand. NZ Avocado Gowers Assoc Ann Res Rep. 6:47-54.
- Embleton TW, Jones WW. 1966. Avocado and mango nutrition. En: Childers NF, editor. Temperate to Tropical Fruit Nutrition. New Brunswick, EE. UU.: Horticultural Publications, Rutgers State University. pp. 51-76.

- Embleton TW, Jones WW. 1972. Development of nitrogen fertilizer programs for California avocados. Calif Avocado Soc Yrbk. 55:90-96.
- FAOSTAT. c2017. Crops. [consultado 2017 mar 17] <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Gardiazábal F, Mena F, Magdahl C. 2007. Efecto de la fertilización en base a N-P-K-Ca-Mg-B-Zn en palto (*Persea americana* Mill.) cv. Hass sobre su desarrollo, productividad y postcosecha de la fruta. En: Comité de Paltas. Proceedings VI World Avocado Congress. Viña Del Mar, Chile: Comité de Paltas.
- Garner LC, Lovatt CJ. 2008. The relationship between flower and fruit abscission and alternate bearing of 'Hass' avocado. J Am Soc Hortic Sci. 133(1):3-10.
- Gillaspy G, Ben-David H, Gruissem W. 1993. Fruits: A developmental perspective. Plant Cell. 5(10):1439-1451.
- Goodall GE, Embleton TW, Platt RG. 1965. Avocado fertilization. Calif Agric Ext Ser. 24(Leaflet).
- Goodall GE, Embleton TW, Platt RG. 1979. Avocado fertilization. Univ Calif Coop Ext Bull. (2024).
- Gupta UC. 1979. Boron nutrition of crops. Adv Agron. 31:273-307.
- Gupta UC, MacLeod JA. 1981. Plant and soil boron as influenced by soil pH and calcium sources on podzol soils. Soil Sci. 131(1):20-25.
- Gupta UC, Jame YW, Campbell CA, Leyshon AJ, Nicholaichuk W. 1985. Boron toxicity and deficiency: a review. Can J Soil Sci. 65(3):381-409.



- Hamid GA, Van Gundy SD, Lovatt CJ. 1988. Phenologies of the citrus nematode and citrus roots treated with oxamyl. En: Goren R, Mendel K, Goren N, editores. Proceedings of the Sixth International Citrus Congress. Vol 2. Tel Aviv, Israel: International Society of Citriculture. pp. 993-1004.
- Harkness RW. 1960. Boron deficiency and alternate bearing in avocados. Proc Fla State Hort Soc. 72:311-317.
- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL, Nelson WL. 1998. Soil Fertility and Fertilizers. 6th edition. Upper Saddle River, EE. UU.: Prentice Hall.
- [ICA] Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Bogotá, Colombia: ICA.
- [IGAC] Instituto Geografico Agustin Codazzi. 2008. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Cauca. Bogota, Colombia: IGAC.
- Inoue H, Takahashi B. 1990. Studies on the bearing behavior and yield composition of the avocado tree. J Jpn Soc Hort Sci. 59(3):487-501.
- Ish-Am G, Eisikowitch D. 1991. New insight into avocado flowering in relation to its pollination. Calif Avocado Soc Yrbk. 75:125-137.
- Jaganath I, Lovatt CJ. 1995. Efficacy studies on prebloom canopy applications of boron and/or urea to 'Hass' avocados in California. Ponencia presentada en: Proceedings of the World Avocado Congress III. Tel Aviv, Israel.
- Kenworthy AL. 1973. Leaf analysis as an aid in fertilizing orchards. En: Walsh LM, Beaton JD, editores. Soil testing and plant analysis. Madison, EE. UU.: Soil Science Society of America. pp. 381-392.

- Knight RJ Jr. 2002 History, distribution and uses. En: Whiley AW, Schaffer B, Wolstenholme BN, editores. The avocado: botany, production and uses. New York: CABI Publishing. pp. 1-14.
- Kopp LE. 1966. A taxonomic revision of the genus *Persea* in the western hemisphere (*Persea-Lauraceae*). Mem N Y Bot Gard. 14(1):1-120.
- Joaquín-Martínez MC, Cruz-Castillo JG, De la Cruz-Medina J, Ángel-Coronel O. 2007. Distribución ecogeográfica y características del fruto de *Persea schiedeana* Nees. en los Tuxtlas, Veracruz, México. Rev Fitotec Mex. 30(4):403-410.
- Lahav E. 1995. Avocado nutrition-a review. Ponencia presentada en: World Avocado Congress III. Tel Aviv, Israel.
- Lahav E, Whiley AW. 2002. Irrigation and mineral nutrition. En: Whiley AW, Schaffer B, Wolstenholme BN, editores. The avocado: Botany, production and uses. New York: CABI Publishing. pp. 259-297.
- Lee BW. 1980. Horticultural Races. Avomation. Ventura County: University of California Cooperative Extension County Publication.
- Lovatt CJ. 1998. Nitrogen nutrition of the 'Hass' avocado: Where does all the N go? Acta Hort. 1:152-159.
- Lovatt CJ. 2001. Properly timed soil-applied nitrogen fertilizer increases yield and fruit size of 'Hass' Avocado. J Am Soc Hort Sci. 126(5):555-559.
- Lovatt CJ. 2010. Alternate bearing of 'Hass' avocado: A summary of basic information to assist growers in managing their orchards. Calif Avocado Soc Yrbk. 93:125-140.



- Maldonado R, Etchevers JD, Alcántar G, Rodríguez J, Colinas MT. 2001. Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calcimórficos. *Terra Latinoam.* 19(2):163-174.
- Maldonado-Torres R, Álvarez-Sánchez ME, Almaguer-Vargas G, Barrientos-Priego AF, García-Mateos R. 2007. Estándares nutrimentales para aguacatero 'Hass'. *Rev Chapingo Ser Hortic.* 13(1):103-108.
- Mengel K, Kirkby EA. 1978. Principles of plant nutrition. Berna, Suiza: International Potash Institute.
- Messenger BJ, Menge JA, Amrhein C, Faber B. 1997. The effects of calcium on avocado growth and root health. *Calif Avocado Soc Yearb.* 81:69-78.
- Meyer JL, Arpaia ML, Yates MV, Stottlemeyer DE, Takele E, Bender G, Witney G. 1992. Irrigation and fertilization management of avocados. Ponencia presentada en: Second World Avocado Congress. Ventura, EE. UU.
- Monge E, Val J, Sanz M, Blanco A, Montañés L. 1994. El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. *An Estac Exp Aula Dei (Zaragoza).* 21(3):189-201.
- Morton JF. 1987. Fruits of warm climates. Miami, EE. UU.: Echo Point Books & Media.
- Núñez-Moreno JH, Cortés-Flores JI, Salazar-García S, Landois Palencia LL. 1991. Evaluación del método DRIS para diagnosticar el estado nutrimental del aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. Fuerte. *Agrocien Ser Agua Suelo Clima.* 2(3):39-57.

- Palacios JM. 1986. Dinámica y balance nutrimental en árboles de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. Hass, con alto y bajo rendimiento en la región de Uruapan, Michoacán [tesis de maestría]. Chapingo, Méx.: Colegio de Postgraduados.
- Paz-Vega S. 1997. Alternate bearing in the avocado (*Persea americana* Mill.). Calif Avocado Soc Yrbk. 81:117-148
- Proyecto Biosfera. s. f. Las funciones de los seres vivos. Intef; [consultado 2016 nov 15]. <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/2ESO/Funcseres/contenido4.htm>.
- [RADA] Rural Agricultural Development Authority. 2013. Postharvest management: Avocado. [consultado 2013 oct 19] <https://rada.gov.jm/publications/publications/post-harvest-marketing/item/490-post-harvest-management-avocado>.
- Raven JA. 1980. Short-and long-distance transport of boric acid in plants. New Phytol. 84(2):231-249.
- Robbertse PJ, Coetzer LA, Swart NGN, Bezuidenhout JJ, Vorster L. 1990. The influence of boron on fruit set in avocado. Acta Hort. 275:587-594.
- Robertson BL. 1971. Fruit growth of the 'Fuerte' avocado. Farming S Afr. 47:12-13.
- Rosecrance R, Faber B, Lovatt C. 2012. Patterns of nutrient accumulation in 'Hass' avocado fruit. Better Crops. 96(1):12-13.



- Rossouw T, Robbertse PJ. 2001. Effect of gibberellic acid treatments on flower development of avocado. Sth Afr Avocado Growers Ass Yrbk. 24(4):1-2.
- Sahrawat KL. 2008. Factors affecting nitrification in soils. Commun Soil Sci Plan. 39:1436-1446.
- Salazar-García S, Gutiérrez-Camacho G, Becerra-Bernal E, Gómez-Aguilar JR. 1993. Diagnóstico nutricional del mango en San Blas, Nayarit. Rev Fitotec Mex. 16:190-202.
- Salazar-García S, Lord EM, Lovatt CJ. 1998. Inflorescence and flower development of the 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) during 'on' and 'off' crop years. J Amer Soc Hort Sci. 123(4):537-544.
- Salazar-García S, Lazcano-Ferrat I. 1999. Diagnóstico nutrimental del aguacate bajo condiciones de temporal. Rev Chapingo Ser Hortic. 5(número especial):173-184.
- Salazar-García S, Lazcano-Ferrat I. 2001. Identifying fruit mineral removal differences in four avocado cultivars. Better Crops Internat. 15(1):28-31.
- Salazar-García S, Lovatt C. 2002. Flowering of avocado (*Persea americana* Mill.). II. Manipulation with GA3. Rev Chapingo Ser Hortic. 8(1):77-82.
- Salazar-García S, Lazcano-Ferrat I. 2003. Site-specific fertilization increased yield and fruit size in 'Hass' avocado. Better Crops Internat. 17(1):12-15.
- Salazar-García S, González-Durán IJL, Tapia-Vargas LM. 2011. Influencia del clima, humedad del suelo y época de floración sobre la biomasa y composición nutrimental de frutos de aguacate 'Hass' en Michoacán, México. Rev Chapingo Ser Hortic. 17(2):183-194.

- Scholefield PB, Sedgley M, Alexaner D. 1985. Carbohydrate cycling in relation to shoot growth, floral initiation and development and yield in the avocado. *Sci Hort.* 25(2):99-110.
- Schuch UK, Scora RW, Nothnagel EA, Campbell SD. 1992. Properties of *Persea indica*, an ornamental for southern California. En: Lovatt CJ, Holthe PA, Lu M, editores. *Proceedings II World Avocado Congress*. Riverside, EE. UU.: University of California. pp. 191-198.
- Schroeder CA. 1953. Growth and development of the 'Fuerte' avocado fruit. *P Am Soc Hortic Sci.* pp. 103-109.
- Scora RW, Wolstenholme BN, Lavi U. 2002. Taxonomy and Botany. En: Whiley AW, Schaffer B, Wolstenholme BN, editores. *The avocado, botany, production and uses*. Wallingford: CABI Publishing. pp. 25-38.
- Sedgley M. 1987. Flowering, pollination and fruit-set of avocado. *Sth Afr Avocado Growers Ass Yrbk.* 10:42-43.
- Sedgley M, Annells CM. 1981. Flowering and fruit-set response to temperature in the avocado cultivar 'Hass'. *Sci Hort.* 14(1):27-33.
- Shepherd JS, Bender GS. 2013. History of Avocado Industry in California. En: Bender G, editor. *Avocado production in California: A cultural handbook for growers (Book One - Background Information)*. San Diego, EE. UU.: University of California Cooperative Extension. pp. 1-17.
- Southwick SM, Davenport TL. 1986. Characterization of water stress and low temperature effects on flower induction in citrus. *Plant Physiol.* 81(1):26-29.

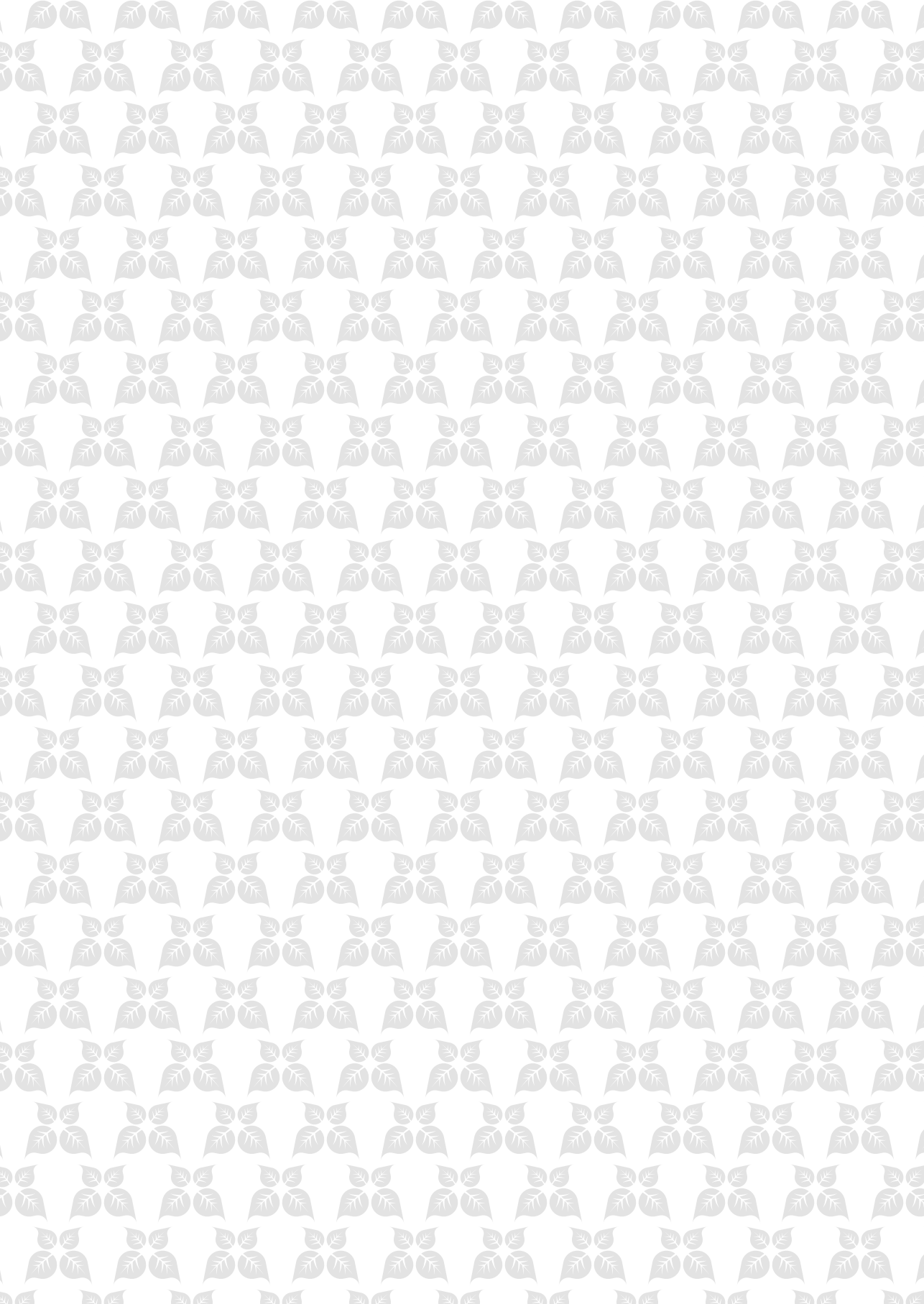


- Srivastava OP, Sethi BC. 1981. Contribution of farmyard manure on the buildup of available zinc in an aridisol. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 12:355-361.
- Syers JK, Johnston AE, Curtin D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agonomic information. Roma, Italia: [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Takhtajan A. 2009. Flowering plants. 2a edición. San Petersburgo, Russia: Springer.
- Uchida RS. 2000. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. En: Silva JA, Uchida RS, editores. Plant nutrient management in Hawaii's soils. Approach for tropical and subtropical agriculture. Honolulu, EE. UU.: University of Hawaii at Manoa. pp 31-55.
- Valmayor RV. 1964. Cellular development of the avocado from blossom to maturity. *Philippine Agr.* 50:907-976.
- Verheij EWM, Coronel RE. 1991. Edible fruits and nuts. Wageningen, Holanda: Pudoc.
- Wallihan EF, Embleton TW, Printy W. 1958. Zinc deficiency in avocado. *Calif Avocado Soc Yrbk.* 42:4-5.
- Whiley AW, Smith IE, Wolstenholme BN, Saranah JB. 1996. Boron nutrition of avocados. *Sth Afr Avocado Growers Ass Yrbk.* 19:1-7.
- Wilkie JD, Sedgley M, Olesen T. 2008. Regulation of floral initiation in horticultural trees. *J Exp Bot.* 59(12):3215-3228.

- Wolstenholme B. 1986. Energy costs of fruiting as a yield-limiting factor with special reference to avocado. *Acta Hort.* 175:121-126.
- Wolstenholme BN, Whiley AW. 1990. Prospects for vegetative-reproductive growth manipulation in avocado trees. *Sth Afr Avocado Growers Ass Yrbk.* 16:21-24.
- Zekri M, Obreza T. 2013. Calcium (Ca) and Sulfur (S) for Citrus Trees. University of Florida, IFAS Extension [consultado 2013 oct 19]. <http://edis.ifas.ufl.edu/ss584>.
- Zilkah S, Klein I, Feigenbaum S. 1987. Translocation of foliar-applied urea 15N to reproductive and vegetative sinks of avocado and its effect on initial fruit set. *J Amer Soc Hort Sci.* 112(6):1061-1065.

Impresión y encuadernación:
Digiprint Editores

Terminó de imprimirse
Junio de 2017, Bogotá, D. C., Colombia



Tras la ejecución del programa de investigación “Manejo integrado del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) var. Hass para incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia”, financiado por Colciencias, se logró evidenciar el bajo acceso que tiene la mayoría de productores de aguacate de los departamentos de Cauca, Tolima y Antioquia a la asesoría de asistentes técnicos que los acompañen en todo el proceso productivo de sus cultivos. Un componente clave, que de manera general no está siendo bien orientado, es el manejo de la nutrición en sus cultivos. Con la información consignada en esta publicación, se busca aportar las bases o criterios técnicos que los productores podrían incorporar en la definición de planes de fertilización.

En cultivos comerciales de aguacate Hass (*Persea americana*) injertados sobre patrones de semillas (posiblemente de origen antillano), ubicados en las localidades de Herrveo (Tolima), Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca), se ajustó el plan de manejo de la fertilización utilizando la metodología del Índice de Balance de Nutrientes (IBN) desarrollado por Keenworthy (1973) y aplicado en investigación por Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2003) en aguacate Hass. Con base en los valores obtenidos, a partir de los análisis de suelo, de tejidos y de los valores de extracción de nutrientes, se calcularon las necesidades de fertilización. En la localidad de Herrveo se registró un incremento en el rendimiento en 7 t/ha, en Rionegro 1,5 t/ha, y en Morales 8 t/ha. Después de verificado la funcionalidad del enfoque propuesto, se comparte la metodología para facilitar la estructuración de planes de fertilización bajo criterios que consideran, además de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, el estado nutricional de la planta.



BAC

BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

CORREO: bac@corpoica.org.co

TELÉFONO: (57 1) 422 73 00 EXT. 1257 o 1274

SKYPE: [biblioteca.agropecuaria](https://www.skype.com/name/identifiers/alias/biblioteca.agropecuaria)



Distribución gratuita

Prohibida su venta

www.corpoica.org.co



**ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES
DE AGUACATE
FRUTAS Y HORTALIZAS**

