

Capítulo IV

Nutrición y fertilización

Álvaro Tamayo Vélez
Nelson Walter Osorio Vega

Características de los suelos

Clima frío

En términos generales, los suelos de clima frío en Colombia tienen una relativa baja disponibilidad de nutrientes, desbalances nutricionales y un pH normalmente bajo, lo que hace que se consideren entre extremada y fuertemente ácidos (pH entre 4,5 y 5,5). El aluminio intercambiable es, por lo general, menor de $3,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de suelo; no obstante, puede representar hasta el 60 % de la capacidad de intercambio catiónico (Muñoz, 1998).

En estos suelos de clima frío, la materia orgánica humificada desempeña un papel preponderante en las propiedades físicas, pues genera suelos bien estructurados y estables (Zapata & Osorio, 2010).

En cambio, en cuanto a las propiedades químicas, la materia orgánica contribuye notablemente a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la capacidad *buffer* del suelo (Zapata, 1998); sin embargo, su tasa de descomposición es muy baja (~0,1%) y, por tanto, aporta poco nitrógeno, fósforo y azufre inorgánico. Por tal razón, los cultivos que se establecen en esta región (hortalizas y frutales como la mora y el lulo) responden positiva y significativamente a aplicaciones de enmiendas orgánicas (compost, gallinaza, lombricompost, etc.) que exhiben una mayor mineralización (Tamayo, Hincapié, Bernal, & Londoño, 1998).

Otra característica importante de estos suelos es la alta capacidad de cambio aniónico y la fijación de fosfatos, lo cual se atribuye a los altos contenidos de alófana, goethita e imogolita y a complejos húmico-alofánicos (Shoji, Nanzyo, & Dahlgren, 1993). Por otro lado, los contenidos de calcio y magnesio tienden a ser bajos por la alta lixiviación. Sin embargo, el potasio puede estar en valores medios y altos, debido a que el material parental (cenizas volcánicas y feldespatos de potasio, entre otros) aún contribuye con el aporte de este elemento. Los elementos menores catiónicos (Fe, Mn, Cu y Zn) suelen estar en contenidos altos y medios; en contraste, el boro y el molibdeno tienden a presentar baja disponibilidad (Jaramillo, 1995; Muñoz, 1998).

En la década del setenta (siglo xx), se utilizó cal agrícola en dosis tan altas como 20-30 t/ha para neutralizar la acidez, mientras que otros elementos como el magnesio y el potasio no se aplicaron tan regularmente, de forma que en algunos cultivos se generó desbalance de bases y deficiencia de estos dos elementos.

Clima medio

En Colombia, el piso térmico medio o templado abarca la franja altitudinal entre los 1.000 y los 2.000 m s. n. m. Sus suelos se distinguen por un relieve quebrado que favorece los procesos erosivos, son moderadamente evolucionados y su naturaleza mineralógica es bastante variable. Predominan los suelos de origen volcánico, sobre todo, en las zonas de producción de café (Guerrero, 1995).

En estos suelos se encuentran valores de pH entre 5,0 y 6,0 (de fuerte a moderadamente ácido), el contenido de aluminio intercambiable fluctúa de bajo a medio y los contenidos de materia orgánica son muy variables (usualmente en el rango de 3% a 5%), pero en suelos formados a partir de ceniza volcánica se pueden encontrar niveles entre 15% y 20%. Los contenidos de fósforos disponibles en estos suelos son normalmente bajos (< 15 mg/kg=ppm), mientras que los contenidos de potasio

intercambiable están entre medios y altos (0,15-0,3 y $>0,3$ cmol_c kg⁻¹). En general, estos suelos son de mediana fertilidad, con alta probabilidad de respuesta a las aplicaciones de nitrógeno (N) y fósforo (P). Un alto porcentaje de estos suelos exhibe un bajo contenido de magnesio intercambiable y la relación calcio/magnesio tiende a ser amplia (>3) (Guerrero, 1995).

El exceso de calcio (Ca), por antagonismo iónico, puede inducir deficiencia de magnesio (Mg). En relación con los elementos menores, estos suelos presentan contenidos bajos de boro (B) ($<0,5$ mg/kg), cobre (Cu) ($<1,0$ mg/kg) y zinc (Zn) ($<1,5$ mg/kg). Los suelos generalmente tienen una buena disponibilidad de hierro (Fe) y manganeso (Mn) (Marín, 1986).

Clima cálido

El clima cálido comprende regiones localizadas a altitudes menores a 1.000 m s. n. m. Su temperatura es superior a los 24 °C, cubre aproximadamente el 80 % de la extensión territorial del país e incluye las llanuras costeras del Caribe y del Pacífico, los valles del Magdalena, Cauca, Cesar, Sinú, Catatumbo y Patía, entre otros, y las extensas regiones de la Orinoquía y la Amazonía. A continuación, se resumen las características generales de las principales regiones de clima cálido, de acuerdo con Marín (1986) y Guerrero (1996).

Costa Atlántica. Los suelos son de origen aluvial, marino o lacustre, en general más o menos bien drenados, excepto aquellas áreas aledañas a los ríos que sufren inundaciones periódicas. Los suelos no inundables, mecanizables, tienen niveles de fertilidad variable.

Valle del Bajo Magdalena. Los suelos de esta región son predominantemente de naturaleza aluvial, originados de sedimentos arenosos, limosos y arcillosos. La mayor parte del área está siendo utilizada en la explotación de ganadería de carne y, en menor proporción, en cultivos de algodón, arroz, sorgo y maíz. La mayor limitante para el uso de la tierra es el exceso de agua durante la estación lluviosa.

Llanos Orientales. Los suelos de esta región se han desarrollado bajo condiciones de alta precipitación y temperatura, a partir de sedimentos aluviales lavados, lo que ha originado suelos muy ácidos y pobres. Son suelos con concentraciones tóxicas de aluminio y su fertilidad es baja o muy baja, ya que presentan deficiencias en casi todos los nutrientes esenciales. Las zonas de piedemonte y de planos aluviales tienen condiciones de fertilidad menos adversas.

Valle del Alto Magdalena. Esta región está localizada en la parte central del país, entre las cordilleras Central y Oriental, incluye terrazas y planadas aluviales, así como planicies semidesérticas. En términos generales, los suelos de esta región son fértiles y apropiados para el desarrollo de una agricultura tecnificada.

Valle del Cauca. Los suelos de esta región se han desarrollado principalmente a partir de depósitos aluviales y están compuestos, en especial, de sedimentos arcillosos y de arenas volcánicas; aunque en los extremos sur y norte, existen también fuertes influencias de cenizas volcánicas. Tradicionalmente, los suelos del Valle del Cauca se han considerado como de alta fertilidad, sin embargo, en los últimos años una buena parte de estos ha presentado deficiencias en potasio y, ocasionalmente, en fósforo, sobre todo en aquellas áreas de explotación agrícola intensiva. Por otra parte, la ocurrencia de suelos salinos y sódicos se ha incrementado acentuadamente.

Funciones de los macronutrientes

Como nutrientes se entienden todos aquellos elementos que son requeridos por la planta para su crecimiento y formación de sustancias orgánicas. De acuerdo con ciertos criterios de esencialidad, se ha determinado que la planta requiere de 17 elementos: 3 orgánicos (carbono, hidrógeno y oxígeno) y 14 minerales; estos elementos cumplen diversas funciones estructurales y metabólicas en las plantas que son resumidas en la tabla 4.1. Las funciones que cumplen todos ellos son tan importantes que el crecimiento y desarrollo del vegetal podría fallar por la deficiencia total o parcial de alguno de ellos (Osorio, 2014).

Las plantas obtienen el carbono y el oxígeno directamente del aire por fotosíntesis, mientras que el hidrógeno procede directa o indirectamente del agua del suelo. Las plantas, no obstante, son incapaces de vivir solamente a base de aire y agua, necesitan elementos químicos que, por lo general, les son proporcionados a expensas de las sustancias minerales del suelo. Es interesante señalar que estos elementos, que las plantas obtienen del suelo, son los que comúnmente limitan el desarrollo de los cultivos. El crecimiento de las plantas, salvo circunstancias excepcionales, como pueden ser sequía, bajas temperaturas, suelos anómalos o enfermedades, no se altera seriamente por una deficiencia de carbono, hidrógeno y oxígeno. Esto justifica la importancia de los nutrientes del suelo y de los elementos que contienen (Osorio, 2014).

Nitrógeno (N)

El papel más importante del nitrógeno en las plantas es su participación en la estructura de las moléculas de proteína, de aminoácidos, de ácidos nucleicos, de adenosín trifosfato (ATP), de vitaminas y de fosfolípidos. En consecuencia, el nitrógeno está involucrado en la mayoría de las reacciones bioquímicas determinantes para la vida vegetal. Este elemento desempeña también un papel importante en el proceso de la fotosíntesis, debido a que es indispensable para la formación de la molécula de clorofila (Glass, 1989).

El nitrógeno es el componente de vitaminas que tienen una importancia extraordinaria para el crecimiento de la planta. Entre las funciones más importantes de este se cuenta la de favorecer el crecimiento del follaje, el desarrollo de los tallos y la formación de frutos y granos, en resumen, la formación de los tejidos. Se puede decir, en consecuencia, que es uno de los elementos más importantes para el crecimiento y el desarrollo vegetal (Salisbury & Ross, 1994).

El exceso de nitrógeno, por otro lado, retarda la maduración del cultivo y la formación de frutos, provoca un escaso desarrollo del sistema radicular de la planta y un crecimiento excesivo del follaje. También reduce la producción de compuestos fenólicos (fungistáticos) de lignina de las hojas, lo que hace que se disminuya en la planta la resistencia a los patógenos obligados, pero no a los patógenos facultativos (Guerrero, 1996).

Como regla general, todos los factores que favorecen las actividades metabólicas y de síntesis de las células y que retardan la senescencia de la planta hospedera (como la fertilización nitrogenada) aumentan la resistencia a los parásitos facultativos. Por otro lado, las aplicaciones altas de nitrógeno aumentan la concentración de azúcares, aminoácidos y amidas libres, lo que aparentemente favorece el desarrollo de enfermedades de las plantas y el ataque de insectos plagas (Marschner, 1997).

Fósforo (P)

Aunque de los tres elementos primarios (N, P, K), el fósforo es aquel que se requiere en menores cantidades, la disponibilidad de este elemento en la mayor parte de los suelos agrícolas del trópico es en extremo limitada. El fósforo, en todo caso, es un elemento que juega un papel clave en la vida de las plantas: es constituyente de ácidos nucleicos, fosfolípidos, vitaminas, las coenzimas NAD y NADP y, más importante aún,

forma parte del ATP (compuesto almacenador de energía en la planta). El fósforo, en consecuencia, se requiere en altas concentraciones en las regiones de crecimiento activo. Otra de sus funciones es la de estimular el desarrollo de la raíz, así como intervenir en la formación de los órganos de reproducción de las plantas y acelerar la maduración de los frutos —en los cuales, generalmente, se acumula en concentraciones altas—. El exceso de este elemento acelera la maduración a expensas del crecimiento y puede generar efectos adversos sobre la utilización de otros elementos nutritivos, como cobre, hierro y zinc (Glass, 1989).

El potencial de fijación del fósforo (como fosfato) en andisoles parece estar relacionado con la presencia de diferentes materiales en la fracción arcillosa, que resultan de meteorización de la ceniza volcánica. Los suelos dominados por complejos humus-aluminio (Al) —los cuales tienen un alto potencial de adsorber el fósforo—, aparentemente son difíciles de saturar. El contenido de carbono total podría ser un arma de diagnóstico complementaria, que ayuda a determinar la capacidad de fijación de fósforo en andisoles. La acumulación de materia orgánica es mayor en suelos volcánicos localizados a mayor altitud (>2.000 m s. n. m.); de hecho, evidencia indirecta obtenida en andisoles de Ecuador y Colombia permite concluir que la fijación de fósforo está estrechamente relacionada con el contenido de carbono en el suelo (complejos humus-Al) (Espinosa, 1996; Gualdrón & Herrón, 1979).

Potasio (K)

Para un crecimiento vigoroso y saludable, las plantas deben tomar grandes cantidades de potasio. Este nutriente, altamente móvil, está relacionado con casi todos los procesos biológicos de la planta; sin embargo, no forma parte de la estructura de los compuestos orgánicos de esta. Se conoce que el potasio tiene un papel vital, debido a que cataliza procesos tan importantes como la fotosíntesis, gracias a la cual, la energía del sol, en combinación con agua y dióxido de carbono, se convierte en azúcares y materia orgánica. También interviene en la formación de clorofila y en la regulación del contenido de agua en las hojas (Salisbury & Ross, 1994).

Se ha demostrado, asimismo, que el potasio juega un papel fundamental en la activación de más de 60 sistemas enzimáticos en las plantas. También es importante en la formación del fruto: se le reconoce como un elemento que mejora la calidad de este, ya que extiende el periodo de llenado e incrementa su peso. Además, fortifica los tallos, mejora la resistencia a plagas y enfermedades y ayuda a la planta a resistir mejor el estrés (Salisbury & Ross, 1994).

Otra función básica del potasio es regular la entrada de dióxido de carbono (CO_2) en las plantas a través de los estomas, cuya función de abrirse y cerrarse es regulada por el suplemento de este elemento. Las células de guarda a cada lado del estoma acumulan grandes cantidades de potasio si el suplemento es adecuado, y así lo fuerzan a que se abra. En plantas bien provistas de potasio, se incrementa el número y tamaño de los estomas por unidad de área, lo cual facilita el intercambio de CO_2 y oxígeno en el tejido de la hoja. La función primaria del potasio está ligada al transporte y acumulación de azúcares dentro de la planta, lo cual tiene incidencia directa en el llenado de la fruta (Instituto de la Potasa y el Fósforo [Inpofos], 1999).

La apertura y cierre de estomas regula, además, la transpiración de la planta y esto, a su vez, regula el movimiento convectivo del agua, que facilita el movimiento de la solución del suelo y de los iones disueltos hacia la raíz. Finalmente, la transpiración permite que la planta haga termorregulación y se eviten las altas temperaturas que afectarían el desempeño vegetal (Salisbury & Ross, 1994).

Calcio (Ca)

El calcio forma parte de la pared celular que mantiene unidas entre sí las células. Igualmente, ejerce un efecto neutralizador de los desechos orgánicos de la planta, influye en la utilización de magnesio, potasio y boro, y en el movimiento de las sustancias producidas por las hojas. La deficiencia de calcio implica una reducción del crecimiento: las hojas jóvenes se enroscan y comienzan a secarse por las puntas y los bordes. Algunas veces las hojas nuevas no se desarrollan completamente (Marschner, 1997).

El calcio es uno de los nutrientes más determinantes en la calidad de los frutos puesto que mejora su conservación: los frutos con altos contenidos de calcio tienden a resistir más el transporte y a permanecer en buenas condiciones durante bastante tiempo. La concentración de calcio en el tejido, necesaria para lograr estos resultados, es usualmente superior a las concentraciones acumuladas en condiciones normales por los frutos (Salisbury & Ross, 1994).

Magnesio (Mg)

El magnesio es el componente principal de la clorofila e interviene en la síntesis de carbohidratos. Participa en la síntesis de proteínas, nucleoproteínas y del ácido ribonucleico, y favorece el transporte de fósforo dentro de la planta (Glass, 1989).

Es un elemento móvil en ella, por lo que su deficiencia se presenta primero en las hojas más viejas.

Del total de magnesio absorbido por la planta, aproximadamente la mitad se encuentra en el tronco y las ramas del árbol, un tercio, en las raíces y el resto, en las hojas. Durante la floración y fertilización se produce una translocación significativa del magnesio hacia los brotes y frutos (Glass, 1989).

Azufre (S)

El azufre es un elemento esencial para el desarrollo vegetal. La cantidad requerida por las plantas es similar a la de fósforo y magnesio. Algunos cultivos de importancia en el trópico y en el mercado mundial, tales como el café, el algodón, la palma africana y la caña de azúcar, absorben más azufre que fósforo (Guerrero, 1996).

En la planta, el azufre es constituyente de las proteínas, varias vitaminas como la tiamina y la biotina y es componente importante de numerosas enzimas. Además, forma parte de algunos compuestos orgánicos responsables del olor y sabor de algunas hortalizas, como la cebolla y el ajo (Salisbury & Ross, 1994).

Funciones de los micronutrientes

Los investigadores están muy de acuerdo en que los llamados micronutrientes desempeñan una función tan importante como los elementos mayores.

Hierro (Fe)

El hierro es el microelemento más abundante en la mayoría de los suelos cultivables, pero buena parte de él se encuentra en forma no asimilable. La química de este elemento, al igual que la del manganeso (Mn), es muy compleja, pues se sabe que se oxida y reduce fácilmente según las condiciones del suelo. Cuando se oxidan, ambos elementos quedan en formas poco solubles y, por tanto, son poco asimilables para las plantas. El papel más conocido del hierro en el metabolismo de la planta es su participación en el grupo prostético del sistema citocromo, un grupo de enzimas implicadas en la oxidación terminal de la respiración (Epstein & Bloom, 2005).

Algunas de las enzimas y de los portadores que actúan en el mecanismo respiratorio de las células vivas están compuestos de hierro; ejemplos específicos son la catalasa,

la peroxidasa, la oxidasa citocrómica y los citocromos. La participación del hierro en la forma de tales compuestos en los mecanismos oxidativos de las células desempeña indudablemente uno de los papeles más importantes para el metabolismo celular (Epstein & Bloom, 2005).

El hierro interviene en la formación de clorofila y es, por lo tanto, indispensable en la formación de alimentos en la planta. Hace parte de la secuencia de reacciones que sintetizan los componentes de la clorofila, actúa como parte de un mecanismo enzimático que opera en el sistema respiratorio de las células vivas y participa en las reacciones que incluyen la división y el crecimiento celular. El hierro, asociado con el cobre, el manganeso y el boro, aumenta el contenido de lignina, compuesto orgánico que cumple funciones de sostén y protección de la planta contra el ataque de organismos causantes de enfermedades (Epstein & Bloom, 2005).

Manganeso (Mn)

El manganeso tiene una función estructural en el sistema de membranas del cloroplasto y actúa en la disociación fotosintética de la molécula de agua. El manganeso es un elemento esencial para la respiración y para el metabolismo del nitrógeno; en ambos procesos actúa como activador enzimático. El manganeso interviene en la activación de numerosas enzimas que actúan en el metabolismo de los carbohidratos, tales como la hexoquinasa, la adenosina y la fosfoglucoquinasa. Es el ion metálico predominante en el metabolismo de los ácidos orgánicos y activa la reducción del nitrito y la hidroxialamina en amoníaco (Devlin, 1982; Salisbury & Ross, 1994).

También es el ion metálico predominante en las reacciones del ciclo de Krebs. El manganeso genera resistencia de la planta a varios patógenos, inhibiendo la enzima fungosa fentin-metilesterasa, esencial para iniciar el proceso infeccioso. Además, inhibe enzimas producidas por hongos ya establecidos en la planta. El manganeso es esencial en el proceso que controla en la raíz la producción de microflora, pues reduce la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos patogénicos (Epstein & Bloom, 2005).

Cobre (Cu)

El cobre está presente en diversas enzimas o proteínas relacionadas con los procesos de oxidación y reducción. Dos ejemplos notables son la citocromooxidasa, una enzima respiratoria que se halla en las mitocondrias, y la plastocianina, una proteína de

los cloroplastos. El cobre induce la formación de polen viable, por ello su más alta demanda se presenta en la floración. El cobre actúa conjuntamente con el manganeso y el zinc en la utilización y movilización de otros nutrientes (Epstein & Bloom, 2005; Salisbury & Ross, 1994).

Zinc (Zn)

El zinc es indispensable en la formación de clorofila. Es componente de varias enzimas, entre ellas, las que promueven el crecimiento. También interviene en la utilización del agua y otros nutrientes. El zinc regula el crecimiento de los meristemos en la raíz y en la parte aérea, pues, al controlar la síntesis de triptófano, regula la síntesis de la hormona del crecimiento conocida como ácido indolacético (AIA, auxina) (Epstein & Bloom, 2005).

El zinc activa diversos procesos enzimáticos, como la fosforilación de la glucosa y, a través de ella, la formación de almidón. De igual manera, actúa en la anhidrasa carbónica para la utilización del ácido carbónico y la asimilación del CO₂. Además, está involucrado en la reducción de nitratos y en la síntesis de aminoácidos que se transformarán en proteínas de amoníaco (Salisbury & Ross, 1994).

Molibdeno (Mo)

El molibdeno es esencial para el proceso de fijación del nitrógeno por parte de las bacterias en los nódulos de las raíces de las leguminosas y por parte de las bacterias asimbióticas que crecen dentro o en la superficie de la raíz (rizoplano). Además, este nutriente es componente de la enzima nitrato reductasa, esencial en la asimilación metabólica del nitrógeno. El molibdeno es parte estructural de una oxidasa que genera el aldehído del ácido abscísico (ABA), regulador del crecimiento que protege las plantas contra factores de estrés fisiológico. El molibdeno induce, además, efectos positivos en la formación de polen viable al momento de la floración y fecundación (Devlin, 1982; Salisbury & Ross, 1994).

Boro (B)

El boro participa de una serie de procesos fisiológicos dentro de la planta y, en ocasiones, su deficiencia se confunde con la de otros nutrientes como la del fósforo y el potasio. Dos de las funciones del boro en las plantas se encuentran muy bien definidas: la síntesis de la pared celular y la integridad de las membranas plasmáticas.

Por esta razón, su deficiencia restringe el crecimiento de nuevas raíces y de nuevos brotes. El boro actúa sobre la diferenciación de tejidos y la síntesis de fenoles y auxinas; interviene en la germinación y el crecimiento del tubo polínico; y es importante en el metabolismo de ácidos nucleicos y en la elongación y división celular.

El boro también interviene en el transporte de almidones y azúcares desde la hoja hasta los frutos en formación. Contribuye a disminuir la caída de flores y a aumentar la producción de frutos; además, está asociado con la actividad celular que promueve la maduración. Una vez que el boro ha sido utilizado por los tejidos en crecimiento activo de la planta, no puede trasladarse y ser utilizado nuevamente. Esto significa que debe existir una fuente permanente de este elemento disponible para la planta durante todo su ciclo de crecimiento y desarrollo (Devlin, 1982; Salisbury & Ross, 1994).

Cloro (Cl)

Las plantas absorben el cloro en forma del ion cloruro (Cl^-), el cual está relacionado con la apertura de los estomas, por lo tanto, interviene en la turgencia de las células y ayuda al metabolismo del nitrógeno. Las plantas tienen su mecanismo de tolerancia a los excesos, por lo cual el cloro sobrante se acumula en las vacuolas. Generalmente las aguas de riego son ricas en cloruros, por esto, casi nunca es necesario hacer aplicaciones de dicho elemento (Devlin, 1982; Salisbury & Ross, 1994). A manera de resumen, se presentan las funciones de los nutrientes esenciales para las plantas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Principales funciones de los nutrientes

Nutriente	Funciones principales
Componentes de compuestos orgánicos	
C	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, ATP, NADP, clorofila y reguladores de crecimiento (p. ej., IAA).
H	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos.
O	Hace parte de la estructura de carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. También es aceptor de electrones.

(Continúa)

(Continuación tabla 4.1.)

Nutriente	Funciones principales
Componentes de compuestos orgánicos	
N	Hace parte de la estructura de aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos y de la clorofila.
S	Es parte esencial en la conformación de sulfo-aminoácidos (cisteína y metionina). También es responsable de la conformación estructural y en la estabilidad de proteínas, la coenzima A y las vitaminas. Cumple un papel importante en la constitución de aromas y sabores.
P	Es importante en la conformación de ATP, NADP, lípidos de las membranas celulares, ácidos nucleicos y fosfo-azúcares.
Activadores de enzimas	
K	Activador de ~60 enzimas. Es esencial en la síntesis de proteínas y responsable de la turgencia y apertura de estomas.
Ca	Activador de enzimas. Es esencial para la permeabilidad de la membrana en asociación con las pectinas de la pared celular.
Mg	Activador de enzimas y ATP, componente de la clorofila.
Mn	Activador de enzimas, esencial en la fotólisis del agua.
Zn	Cofactor de varias enzimas (dehidrogenasas, aldolasa, fosfatasa, DNA y RNA polimerasa).
Ni	Parte fundamental de la enzima ureasa.
Agentes rédox	
Fe	Componente de citocromos, peroxidasa y ferredoxina, en los cuales es responsable de reacciones rédox.
Cu	Componente de la citocromo oxidasa (respiración), la plastocianina (fotosíntesis), el superóxido dismutasa (radicales O_2^-) y el fenol oxidasa (síntesis de lignina). Es responsable de reacciones rédox.
Mo	Componente de la nitrato reductasa (reducción del NO_3^-) y de la nitrogenasa (reducción de N_2 en rizobios).
Otras funciones	
B	Es fundamental para el crecimiento del tubo polínico y para la estabilidad de la estructura de la pared celular por formación de enlaces cis-diol con compuestos orgánicos.
Cl	Ósmosis, balance de cargas y fotólisis del agua.

Síntomas de deficiencias de nutrientes en aguacate

Las carencias nutricionales y su influencia en el desarrollo de la planta han sido estudiadas por varios investigadores en plantas jóvenes cultivadas en soluciones nutritivas controladas, de las variedades Booth-8, Lula y Fortuna (Avilán, Leal, & Bautista, 1989; Charpentier & Martin-Prevel, 1967). Dichas deficiencias se describen en los apartados siguientes. En la tabla 4.2 se indican los síntomas visuales, su ubicación y algunas causas.

Tabla 4.2. Síntomas visuales predominantes de deficiencia en nutrientes

Parte afectada	Síntoma predominante	Elemento deficiente	Observaciones
Tercio superior (hojas jóvenes)	Clorosis	Generalizada	Fe Color blanco, exceso de fósforo; pH >6,5
		Intervenial	Mn, Cu, Zn Exceso de fósforo; pH >6,5
	Deformaciones	Hojas asimétricas	B Más intenso en sequía, muerte de meristemas, alta ramificación, hojas gruesas, venas suberizadas (corchosas); pH >7,5
		Hojas angostas	Zn, Mo Molibdeno: pH >5,0
	Entrenudos cortos	Ca, Cu, Zn	
	Necrosis	Muerte descendente	Cu Plantas pequeñas
Alta ramificación		Ca Frutos rajados	

(Continúa)

(Continuación tabla 4.2.)

Parte afectada	Síntoma predominante		Elemento deficiente	Observaciones
Tercio medio	Clorosis	Generalizada	S	Avanza a hojas jóvenes muy rápidamente
Tercio inferior (hojas viejas)	Clorosis	Generalizada	N	Plantas pequeñas, desarrollo retrasado
		Intervenial	Mg	Exceso de potasio; pH < 5,0
		Marginal (punta y bordes)	K	Rápida necrosis. Mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades, y deshidratación
	Hojas oscuras	Manchas púrpuras	P	Plantas muy pequeñas, desarrollo muy retrasado; pobre crecimiento radical; pH < 5,5

Fuente: Osorio, Serna y Montoya (2012)

Nitrógeno

La deficiencia de este elemento en aguacate se manifiesta en un crecimiento y desarrollo reducido de la planta, con ausencia de ramificaciones laterales. También se presenta palidez en las hojas, con pequeñas deformaciones y una clorosis característica (figura 4.1) (Avilán et al., 1989). El sistema radical se hace poco ramificado, con raíces más finas y más largas (Avilán et al., 1989; Silva, Malavolta, & Montenegro, 1982). Otro síntoma muy marcado de la deficiencia de este elemento es la presencia de racimos florales terminales sin brotes foliares acompañantes.



Foto: Alvaro Tamayo Vélez

Figura 4.1. Síntoma de deficiencia de nitrógeno en hojas de aguacate.

Fósforo

Como en el caso del nitrógeno, la deficiencia de fósforo en aguacate causa una reducción en el crecimiento y desarrollo de la planta, hace que la emisión de hojas nuevas sea muy espaciada y se inhibe el crecimiento de las yemas terminales. Las hojas de los árboles con deficiencia de fósforo presentan manchas necróticas, irregulares e

intervenales. Además, la coloración verde de la planta se torna un tanto azulada y esta sufre una inclinación de 45 grados, debido al doblamiento de los pecíolos y de la base de las hojas (Avilán et al., 1989).

El tamaño de hoja reducido y de forma redondeada es otra de las consecuencias de la deficiencia de este elemento. Los niveles foliares indican que la carencia de fósforo corresponde a tenores inferiores a 0,05%, pues el nivel normal está entre 0,095% y 0,13%, lo cual depende de la variedad y de la saturación de otros elementos. La carencia de fósforo también hace que las raíces se tornen más gruesas y con pocas ramificaciones (Avilán et al., 1989).

Potasio

La deficiencia de potasio afecta medianamente el desarrollo de las plantas; se caracteriza por la aparición de unas manchas marrón-rojizas que inician en los bordes de las hojas (figura 4.2), avanzan hacia las nervaduras (principales y secundarias) y luego afectan los pecíolos, hasta finalmente cubrir toda la hoja (Avilán et al., 1989).



Foto: Alvaro Tamayo Vélez

Figura 4.2. Síntomas de deficiencia de potasio en hojas de aguacate.

Calcio

Las plantas con deficiencia de calcio presentan las siguientes características: un crecimiento lateral reducido, emisiones foliares abundantes y de entrenudos cortos, parálisis en el desarrollo de las yemas terminales de las ramas que dan lugar a rosetas de hojas lanceoladas y clorosis apical que avanza por los espacios intervenales y llega a abarcar posteriormente toda la hoja (Avilán et al., 1989).

Los niveles normales de calcio en las hojas de aguacate se encuentran entre 0,9% y 1,5%; en plantas con deficiencia de este elemento, los valores se encuentran por debajo de 0,05 % (Avilán et al., 1989). Es necesario aclarar que las deficiencias de calcio están asociadas con el exceso de magnesio y de potasio, por lo que se debe tener en cuenta la relación Ca/Mg y la de Ca/Mg/K para determinar la deficiencia de calcio, ya que eventualmente los otros dos elementos, en altas concentraciones, pueden inhibir la absorción del primero.

En las hojas jóvenes de aguacate, las deficiencias de calcio se manifiestan con deformidad y márgenes irregulares, onduladas y curvadas hacia abajo en forma de gancho (figura 4.3). Frecuentemente se presentan de forma simultánea con las deficiencias de boro.



Foto: Álvaro Tamayo Vélz

Figura 4.3. Síntomas de deficiencia de calcio en hojas de aguacate.

Magnesio

El síntoma característico de la deficiencia de magnesio es una clorosis intervenal que se acentúa lateralmente y se presenta cerca de la nervadura central hasta llegar al borde de las hojas (figura 4.4). Los niveles adecuados en las hojas se encuentran entre 0,25% y 0,80%, mientras que el valor en plantas deficientes es de $< 0,1\%$ (Avilán et al., 1989).



Foto: Álvaro Tamayo Vélez

Figura 4.4. Síntomas de deficiencia de magnesio en hojas de aguacate.

Boro

La baja presencia de boro en la planta se evidencia como una severa disminución en el crecimiento y desarrollo de las plantas, debido a que su carencia afecta órganos nuevos. Los entrenudos son más cortos y las hojas más pequeñas, con presencia de necrosis en las nervaduras. Los meristemos terminales son inhibidos y los brotes continuos presentan una sobretrotación. Las plantas deficientes presentan un nivel ≤ 11 mg/kg en las hojas. Debido a la deficiencia de boro, las hojas nuevas presentan

un aumento del tenor de potasio y una disminución notable del tenor de calcio (Avilán et al., 1989). Otra consecuencia de esta deficiencia es la deformación de los frutos y las malformaciones de las ramas en forma de agallas.

Manganeso

La deficiencia de este elemento se evidencia de forma más tardía que la de los demás. Se presenta como una clorosis que recorre desde la base de la hoja hasta las nervaduras (secundarias y principal). Así, una banda estrecha es amarilla y el resto de ella, verde (figura 4.5). Los niveles foliares encontrados en las plantas deficientes estuvieron entre 8 y 13 mg/kg; se cree que un nivel crítico del elemento estaría alrededor de 16 mg/kg (Avilán et al., 1989).



Foto: Alvaro Tamayo Vélez

Figura 4.5. Síntomas de deficiencia de manganeso en hojas de aguacate.

Azufre

La deficiencia de azufre se manifiesta como una clorosis acentuada en las hojas nuevas, tanto en el limbo como en el pecíolo, la cual es bastante marcada hacia los extremos de las hojas (Avilán et al., 1989).

Hierro

La deficiencia de hierro se manifiesta con un color verde pálido en las hojas jóvenes, las cuales toman un color verde más acentuado en la base (figura 4.6). Las nervaduras conservan su coloración verde normal en las hojas maduras, pero en etapas avanzadas, las hojas se tornan cloróticas. Los niveles foliares para las plantas deficientes están entre 63 y 70 mg/kg (Avilán et al., 1989). Con la deficiencia de hierro, se presenta un aumento del potasio y del calcio, con disminución del tenor de magnesio (Avilán et al., 1989; Goodall, Embleton, & Platt, 1965).



Foto: Álvaro Tamayo Vélez

Figura 4.6. Síntomas de deficiencia de hierro en hojas de aguacate.

Zinc

La deficiencia de zinc se caracteriza por una clorosis en las hojas jóvenes y su incapacidad para alcanzar el tamaño normal. En las ramas terminales, se presenta un acortamiento de los entrenudos, acompañado por la formación de rosetas enteramente cloróticas, mientras que el resto del árbol muestra una coloración normal. En los frutos, esta deficiencia se manifiesta en un crecimiento reducido y de forma redondeada (Avilán et al., 1989).

Cobre

La carencia de cobre afecta los órganos jóvenes, en particular, los meristemos terminales. En los extremos, las hojas presentan necrosis y se enroscan; después, las hojas caen precozmente, de manera que las extremidades de las ramas principales y secundarias quedan desnudas (Avilán et al., 1989).

Antagonismos y sinergismos

A pesar del efecto benéfico de los fertilizantes, es común observar interacciones iónicas, es decir, la influencia sobre la intensificación o depresión de un ion en un tejido. Algunos reportes indican que la adición de grandes cantidades de nitrógeno al cultivo induce deficiencias de potasio, cobre, zinc y boro, reduce la concentración de magnesio e incrementa la de hierro y manganeso en las hojas. En cambio, aplicaciones altas de fósforo incrementan la concentración de nitrógeno, magnesio y manganeso y disminuyen la de potasio, zinc, cobre y boro. Así mismo, se considera que el exceso de calcio puede inducir deficiencias de potasio, hierro y manganeso en las hojas.

Toma de muestras de suelo y foliares

Son muchos los factores que afectan el rendimiento de los cultivos, entre los cuales, la disponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas ocupa un lugar importante. Cuando estos nutrientes no están en las cantidades adecuadas, es necesario agregar fertilizantes químicos, orgánicos o enmiendas para suplir las necesidades de la planta. El análisis químico del suelo dispuesto para el establecimiento del cultivo refleja el estado relativo de disponibilidad de nutrientes y permite diseñar recomendaciones que buscan suplir las deficiencias.

El suelo no es una masa homogénea, sino más bien compleja y heterogénea que presenta múltiples variaciones. Por ello, en la toma de la muestra debe examinarse el área a ser estudiada en relación con la homogeneidad, la topografía, el color y el tipo de suelo, la textura, el grado de erosión, los manejos no técnicos anteriores, la cobertura vegetal, el drenaje y otras características que pueden servir de guía para diferenciar las unidades de muestreo y de muestras entre sí para una posterior recomendación (Avilán et al., 1989). Lo anterior permite que se definan unidades de mapeo por lotes (lote 1, lote 2, lote 3, etc.).

El esquema más sencillo y más usado consiste en tomar submuestras al azar en forma aleatoria en todo el terreno. Para eso, se puede seguir un recorrido en zigzag, y en cada cambio de dirección se toma una submuestra (figura 4.7).



Foto: Jorge Alonso Bernal Estrada

Figura 4.7. Recorrido en zigzag a través del lote de aguacate. En cada punto se toma una submuestra.

También se pueden tomar muestras en trayectos diagonales en forma de X (figura 4.8), en los cuales se escogen las plantas de forma sistemática (un árbol cada cierto número de árboles), dependiendo del tamaño del lote (Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998).



Foto: Jorge Alonso Bernal Estrada

Figura 4.8. Recorrido en forma de X; se siguen dos transectos diagonales.

Se puede usar cualquier otra forma sistemática de muestreo para cubrir adecuadamente el campo y acomodarse a las condiciones particulares de cada huerto (Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998). En cada árbol seleccionado se eligen de dos a cuatro sitios equidistantes de muestreo, que se ubican debajo de este, en la zona comprendida entre la mitad de la copa y el perímetro de la misma, como se indica en la figura 4.9 (Avilán, Rengifo, & Leal, 1986; Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998).

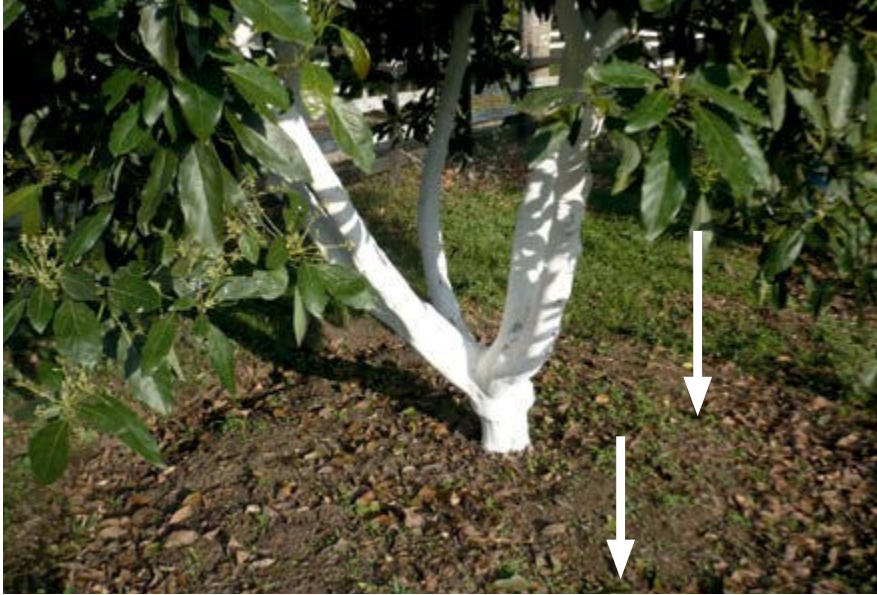


Foto: Alvaro Tamayo Vélez

Figura 4.9. Se indican con flechas los sitios donde se toman las submuestras de cada árbol.

Luego, se mezclan las submuestras para obtener una muestra compuesta, que irá al laboratorio. Por ser el aguacate un cultivo perenne, las exigencias de nutrientes para satisfacer sus procesos fisiológicos —como crecimiento vegetativo, floración y fructificación— varían de acuerdo con la edad de la planta, por tal motivo, es necesario hacer muestreos de suelos periódicamente a lo largo de la vida del cultivo.

Las muestras para análisis de suelo en huertos establecidos se deben tomar de lotes uniformes con respecto al tipo de suelo, la edad de la planta, el manejo y el nivel de producción. Estas propiedades delimitan la unidad de muestreo. Las muestras se deben tomar de árboles escogidos, de modo que se pueda obtener una muestra representativa del campo (Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998). Con relación a la profundidad del muestreo, se debe realizar tomando en consideración las características de la distribución del sistema radical del aguacatero (Avilán et al., 1989).

Se debe efectuar un muestreo superficial (0 cm a 20 cm) y uno profundo (20 cm a 50 cm). Este último es muy importante para verificar si a esta profundidad hay o no impedimentos físicos para el crecimiento de la raíz que afecten su desarrollo y modifiquen su distribución en el perfil del suelo, aspecto relevante por cuanto va a determinar la localización del fertilizante y otras prácticas de cultivo (Avilán et al., 1989). Además, el muestreo a una profundidad entre 20 cm y 50 cm puede ayudar al diagnóstico de casos particulares en los que existan problemas de acidez o acumulación de sales en la subsuperficie (Lazcano-Ferrat & Espinoza 1998).

Las submuestras de cada árbol se recolectan en un recipiente plástico limpio y se mezclan completamente. A partir de esta mezcla, se retira una porción de alrededor de 1 kg de suelo y se envía al laboratorio. Para un buen diagnóstico, además del análisis del suelo —que arroja información sobre el contenido de los elementos disponibles en él, así como de ciertas características que pueden afectar el comportamiento de los fertilizantes—, se debe realizar un análisis foliar, para identificar lo que la planta está asimilando (Avilán et al., 1989). Las muestras para los análisis foliares se deben tomar con los mismos criterios indicados anteriormente para las muestras de suelos y con el mismo muestreo sistemático (Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998).

En los árboles seleccionados, la muestra foliar se debe tomar a una altura media de 1,5 m a 2 m, alrededor de la copa (figura 4.10), tomando seis a ocho hojas de cinco a siete meses de edad en ramas jóvenes que no estén en producción (figura 4.11) (Avilán et al., 1989).



Foto: Jorge Alonso Bernal Estrada

Figura 4.10. Zona de muestreo para análisis foliar.



Foto: Jorge Alonso Bernal Estrada

Figura 4.11. Hojas para muestrear.

El muestreo completo debe provenir de por lo menos 25 árboles y contener más de 100 hojas por cada 2,5 hectáreas (Avilán et al., 1989). Algunos autores señalan que, además de la edad de la hoja, el tipo de retoño, la posición en la planta y la época de muestreo se debe tener en consideración el tipo de patrón y la incidencia de la enfermedad causada por *Phytophthora cinnamoni*, puesto que estos factores también afectan acentuadamente la concentración de los elementos en las plantas (Avilán et al., 1989; Lahav & Kadman, 1980). Se ha encontrado que los árboles injertados sobre patrones de la raza Guatemalteca son más susceptibles a la clorosis férrica que los injertados en patrones de raza Mexicana; así como, en Israel, los raza Antillana son más resistentes a la clorosis férrica que los de las razas Guatemalteca y Mexicana. En relación con la incidencia de la enfermedad, se indica que, en las plantas infestadas, las hojas muestran un incremento en la concentración de nitrógeno, sodio, cloro y cobre y una disminución en fósforo, hierro y manganeso, en comparación con la concentración observada en las hojas de plantas sanas (Avilán et al., 1989).

La aplicación de nutrientes en aguacate debe estar basada en los análisis de suelo y en los análisis foliares. Esto ayuda a obtener el mayor beneficio agronómico y económico

de la aplicación de fertilizantes. Los análisis de suelo y foliares deben estar acompañados, en lo posible, de registros rigurosos de producción, lo cual permite ajustar las dosis de nutrientes utilizadas a través de los años. La correlación entre el contenido foliar de nutrientes y el rendimiento permite determinar las concentraciones óptimas de nutrientes en las hojas, que en la mayoría de los casos cambian de región a región y de variedad a variedad (Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998).

Las concentraciones de los nutrientes en las hojas sirven de referencia para ajustar los niveles de producción a través de los años. La tabla 4.3 presenta los rangos de suficiencia generales de la concentración foliar de nutrientes en aguacate. La extracción de nutrientes del campo en la fruta cosechada puede ser un buen parámetro a utilizar para determinar las dosis de nutrientes a aplicar (tabla 4.4) (Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998).

Tabla 4.3. Niveles nutricionales en las hojas del aguacate

Nutriente	Deficiente	Adecuado	Excesivo
Macronutrientes (%)			
Nitrógeno	< 1,60	1,60-2,00	> 2,00
Fósforo	< 0,05	0,08-0,25	> 0,30
Potasio	< 0,35	0,75-2,00	> 3,00
Calcio	< 0,50	1,00-3,00	> 4,00
Magnesio	< 0,15	0,25-0,80	> 1,00
Azufre	< 0,05	0,20-0,60	> 1,00
Micronutrientes (mg/kg)			
Boro	< 50	50-100	> 100
Cobre	< 5	5-50	> 50
Hierro	< 50	50-200	--
Manganeso	< 30	30-200	> 500
Molibdeno	< 0,05	0,05-1,0	--
Zinc	< 30	30-150	> 300

Exigencias nutricionales

La fertilización es una práctica importante de manejo en el aguacate, cuyo objetivo es aumentar la concentración de nutrientes en la solución del suelo cuando estos no existen en cantidad suficiente para satisfacer las demandas del cultivo. Debido a que el sistema radical del aguacatero no es muy extenso y carece de pelos absorbentes, es necesaria la presencia en el suelo de una cantidad elevada de nutrimentos de fácil disponibilidad. Los estudios llevados a cabo en diferentes regiones productoras del mundo indican que el aguacatero responde favorablemente a la fertilización, especialmente, a la nitrogenada.

En Florida (EE. UU.) se determinó que la aplicación de nitrógeno tenía gran influencia en el crecimiento del diámetro del tronco, en la producción, el tamaño de los frutos, condición de la planta y, en general, en el tamaño del árbol (Lynch, Goldweber, & Rich, 1954). Algunos autores consideran que se debe establecer una relación nitrógeno-fósforo-potasio (N, P, K) de 1:0,5:1, en la cual el nitrógeno es igual a la unidad. Altos o bajos niveles de potasio no favorecen la producción y un nivel alto de fósforo tiende a disminuir los rendimientos (Avilán et al., 1989).

Otros autores que han trabajado con suelos aluviales ácidos, con el cultivar Fuerte, y han aplicado niveles de nitrógeno que varían entre 0 kg y 1 kg por planta señalan que, a pesar de la extrema variabilidad característica del aguacatero, la máxima producción ocurre cuando existe un moderado nivel de nitrógeno en las hojas (1,6 %-2 %) (Avilán et al., 1989; Embleton, Jones, & Garber, 1959).

En Venezuela, en suelos inceptisol, con una moderada o baja suplencia de nitrógeno y fósforo y una baja de potasio, se encontró una respuesta significativa sobre el rendimiento de la interacción nitrógeno-potasio. La aplicación de 1.200 g árbol⁻¹ de nitrógeno y 1.600 g árbol⁻¹ de potasio redonda en un incremento del beneficio económico sobre la parcela testigo en el orden del 67 %, en la variedad Pollock con seis años (Avilán et al., 1989; Sergent, 1979).

Sugerencias generales de fertilización

Tras tomar como base la edad fisiológica y la producción por planta (cajas de frutos/planta), Malavolta (1980), citado por Avilán y Leal (1984), sugiere un plan de fertilización como se muestra en las tablas 4.4 y 4.5. La aplicación de los fertilizantes debe ser fraccionada en tres o cuatro veces al año.

Tabla 4.4. Plan de fertilización en árboles jóvenes de aguacate (menores de cuatro años)

Edad planta (años)	g/planta		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	40	0	20
2	80	40	20
3	120	60	60

Fuente: Avilán y Leal (1984)

Tabla 4.5. Plan de fertilización en árboles de aguacate en producción (mayores de cinco años)

Nivel de potasio en el suelo	g/caja de frutos		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Bajo	100	50	100
Medio	100	50	50

Fuente: Avilán y Leal (1984)

De acuerdo con el criterio de fertilización por sustitución, Avilán, Chirinos y Figueroa (1978) recomiendan aplicar 200, 100 y 200 g árbol⁻¹ de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente, por cada 60 kg de fruta fresca producida. En caso de no tener acceso a análisis foliares o de suelos, una buena práctica es restituir al suelo los nutrientes extraídos por la cosecha: una recomendación general es aplicar a cada planta 660 g de N, 320 de P₂O₅ y 660 K₂O por cada 100 kg de fruta producida por árbol.

Es aconsejable fraccionar la aplicación de nutrientes de la siguiente forma: aplicar una tercera parte del nitrógeno y todo el fósforo y el potasio antes de la floración; el segundo tercio del nitrógeno, cuatro meses más tarde (inicio de las lluvias); y el tercio final de nitrógeno, cuatro meses después. En la tabla 4.6, se muestra una recomendación de fertilización en árboles de aguacate en producción.

Tabla 4.6. Recomendación por fertilizante para árboles en producción para una cosecha de 10 t/ha de fruta fresca

Nutrientes	Fertilizante (kg/ha/año)	Fertilizante (g/planta/año)
N (urea)	140	1.400-1.600
P (superfosfato triple)	40	400-600
K (cloruro de potasio)	106	1.200-1.400
Ca, Mg		500-600

Fuente: Avilán y Leal (1984)

El adecuado manejo de la fertilización del aguacate requiere el apoyo de los parámetros presentados arriba en la tabla 4.1. Los resultados de los análisis foliares se comparan con los de esta tabla para tener una idea clara del estado nutricional de la planta. En este caso, es también importante el análisis de suelo, para decidir cuáles son las dosis de nutrientes a aplicar.

En realidad, lo que se busca es aplicar nutrientes para mantener la concentración foliar adecuada, condición que, a su vez, garantiza rendimientos altos si los otros factores de la producción se manejan adecuadamente. Con estos conceptos se puede fertilizar de acuerdo con la edad de la planta como se indica en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Fertilización del aguacate de acuerdo con la edad de la planta

Edad de la planta (años)	Fertilizante (g/árbol/año)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
A la siembra	300	100-200	200-300
2	600	200-600	200-300
3	800	300-800	200-600
4	1.000	300-800	300-800
5	1.500	400-1.200	400-1.200
6	1.800	500-1.500	400-1.200
7 en adelante	2.000	500-1.500	600-1.400

Fuente: Avilán y Leal (1984)

Las cantidades de fósforo y potasio a aplicar dependen de la cantidad de estos presentes en el suelo (según su análisis) y del porcentaje de nutrientes en las hojas arrojado por el análisis foliar. Cuando el contenido es bajo, se utilizarán dosis altas, y viceversa. En el caso de que el contenido sea alto, es aconsejable fraccionar la dosis de nutrientes a través del año de la siguiente manera: la tercera parte del nitrógeno, todo el fósforo y todo el potasio, antes de la floración; el segundo tercio del nitrógeno, al inicio de las lluvias; y el tercio final de nitrógeno a mediados de la época lluviosa.

Se estima que los nutrientes en los frutos representan un tercio o más de las necesidades totales de la planta. Los niveles se deben ajustar de acuerdo con los coeficientes de eficiencia de los nutrientes cuando se aplica un fertilizante: urea 50%, fósforo 15% y cloruro de potasio 60% (Hiroce et al., 1979).

Zona de aplicación del fertilizante

La localización del fertilizante alrededor de la planta de aguacate se debe hacer teniendo en cuenta la ubicación de la mayor cantidad de raíces activas, lo cual asegura el aprovechamiento de los fertilizantes aplicados. Cuando las plantas están muy jóvenes, las raíces están muy cercanas y el fertilizante se debe aplicar en la cercanía de la raíz (figura 4.12). Para evitar daños a la raíz, se recomienda aplicar dosis bajas o moderadas pero más frecuentes, en vez de dosis altas muy espaciadas en el tiempo. La alta concentración de sales puede causar toxicidad en las raíces.



Foto: Alvaro Tamayo Vélaz

Figura 4.12. Aplicación de fertilizantes alrededor de plántulas recién trasplantadas.

Cuando se trata de árboles en producción (> 4 años), las raíces están distribuidas en la zona de plateo, lugar en que se puede hacer la fertilización, aunque algunos recomiendan aplicar entre la mitad del radio de la copa y la proyección externa de esta (figura 4.13) (Avilán et al., 1986; Lazcano-Ferrat & Espinoza, 1998). El método de aplicación del fertilizante más recomendable en el cultivo de aguacate es al voleo dentro de la zona de aplicación, para generar un buen y uniforme desarrollo de las raíces.



Foto: Jorge Alonso Bernal Estrada

Figura 4.13. Aplicación de fertilizantes en la zona de plateo de árboles de aguacate en producción.

Encalamiento

Dada la condición ácida y la baja disponibilidad de calcio y magnesio de muchos de los suelos cultivados con aguacate, particularmente en la Región Andina de Colombia, la aplicación de cal es una práctica muy común. Varios autores coinciden en afirmar que el rango adecuado de pH del suelo para el aguacate está entre 5,5 y 6,5. A razón de la poca disponibilidad de nutrientes, en especial, de fósforo y de elementos menores, y de la eficiencia de la fertilización nitrogenada (sobre todo, con amonio) se recomienda un rango aún más estrecho, entre 5,5 y 6,0 (figura 4.14).

Infortunadamente, es común encontrar que los agricultores usan inadecuadamente la cal. En algunos casos, por aplicaciones insuficientes, en otros, por aplicaciones excesivas o por una inadecuada escogencia del tipo de cal —cal agrícola CaCO_3 , cal viva CaO , cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y cal dolomita $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ —.

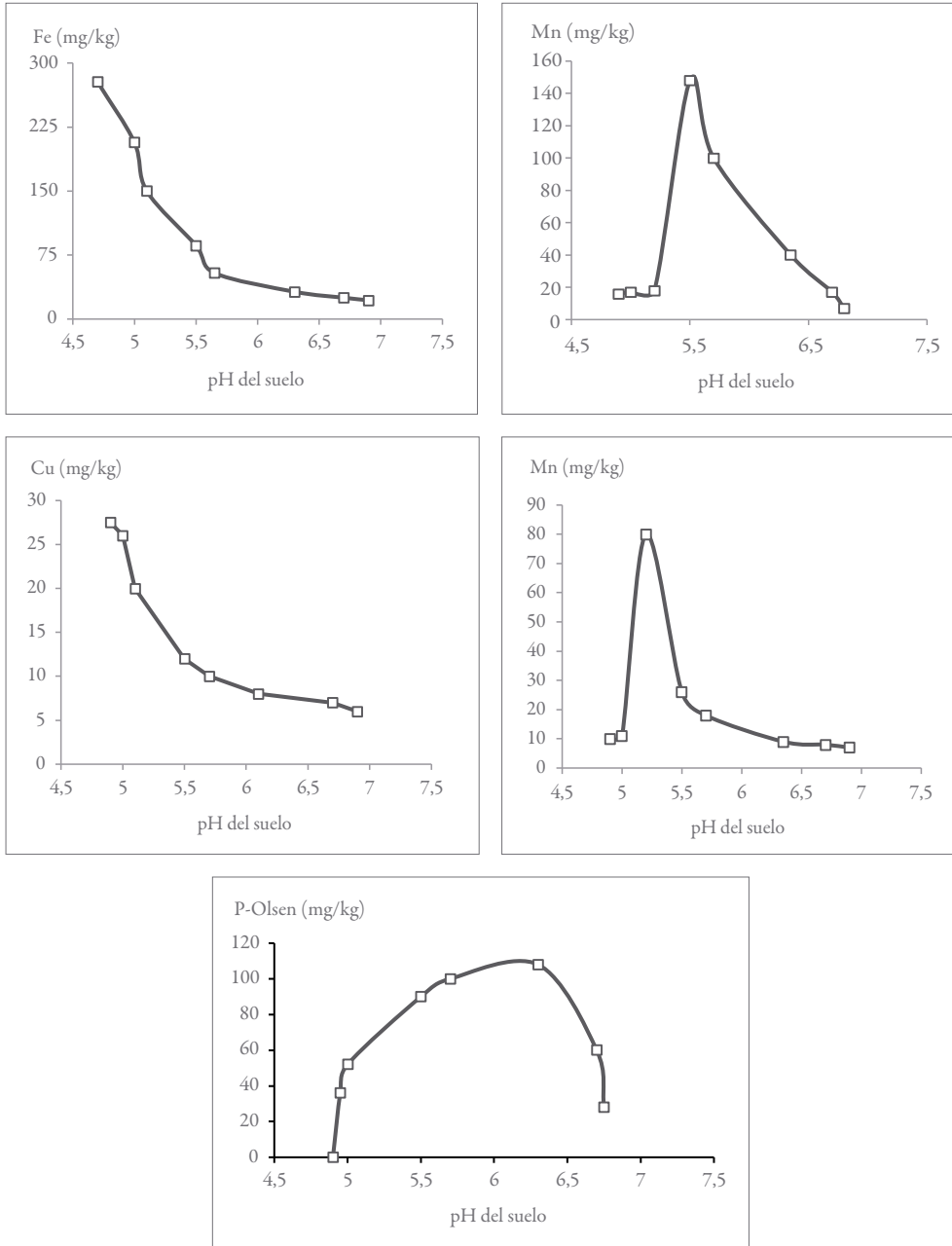


Figura 4.14. Disponibilidad de hierro, manganeso, cobre, zinc y fósforo en andisoles del oriente antioqueño en función del pH del suelo. Estudio retrospectivo en suelos cultivados intensivamente durante 20 años. Los cambios en el pH del suelo son producto de la frecuente aplicación de cal. Las líneas discontinuas muestran un nivel adecuado de disponibilidad.

Fuente: Osorio (2014)

En un muestreo realizado por Osorio et al. (2012) y por Serna, Montoya y Osorio (2012) se encontró que, en huertos de aguacate del oriente y norte antioqueño, el 34,3 % de las muestras de suelos ($n=70$) presentó valores de $\text{pH} < 5,5$, el 30 % tuvo un $\text{pH} > 6,3$ (algunas alcanzaron valores tan altos como 7,1) y solo un 35,7 % presentó un pH adecuado. En el primer caso ($\text{pH} < 5,5$), se esperan deficiencias de calcio, magnesio, fósforo y molibdeno y altos niveles de aluminio, que es potencialmente tóxico para las plantas. En el segundo caso ($\text{pH} 6,3-7,1$), es posible encontrar una baja disponibilidad de hierro, manganeso, cobre, zinc y fósforo y menor disponibilidad de boro (figura 4.15).

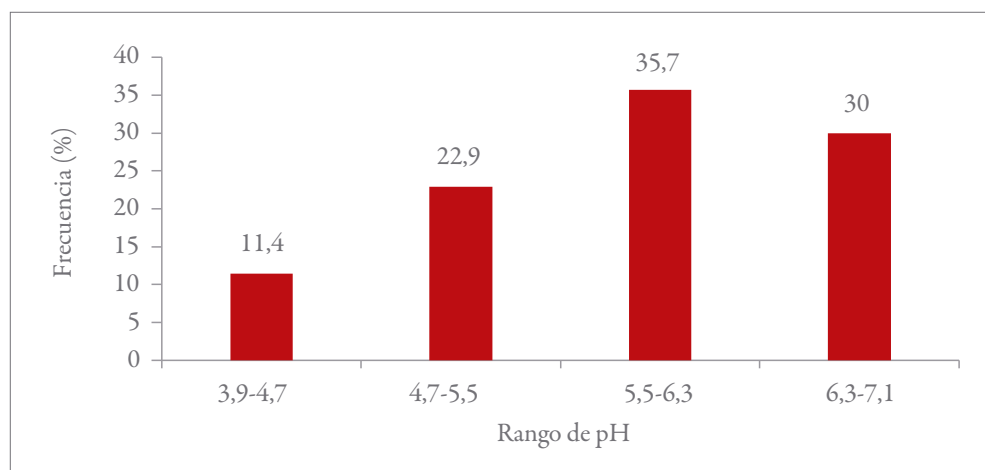


Figura 4.15. Frecuencia relativa de valores del pH del suelo de huertos de aguacate del norte y oriente de Antioquia.

Fuente: Osorio et al. (2012)

Para evitar los excesos de cal se debe usar un análisis de suelo que nos indique el valor del pH y los contenidos de calcio, magnesio y aluminio intercambiables. Aunque no existen niveles críticos de estos elementos establecidos experimentalmente para huertos de aguacate, los datos observados en huertos sanos y altamente productivos sugieren que se pueden manejar tentativamente valores de calcio intercambiable de 4,0 a 6,0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, mientras que los valores de magnesio pueden estar entre 1,5 y 2,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Para aplicar ambos elementos (Ca y Mg) se puede usar, por ejemplo, cal dolomita.

Otra alternativa para definir la cantidad de cal a aplicar es a través del uso de la incubación con cal. En este método, pequeñas porciones de suelo se someten a cantidades crecientes de cal y, luego de un periodo de incubación de 15 a 20 días

(a temperatura ambiente y con suficiente humedad —capacidad de campo—), se mide el pH del suelo (1:1) (Uchida & Hue, 2000). La cantidad a aplicar se escoge en función de la regresión entre la cantidad de cal aplicada y el pH deseado del suelo. En el caso del suelo que se muestra en la figura 4.16, la cantidad de cal dolomita (CaCO_3 : 50 %, MgCO_3 : 50 %) requerida para aumentar el pH de 5,1 a 5,5, en una zona de plateo de radio 0,5 m, será de 0,5 kg; en un plateo de 1 m de radio será de 2,2 kg. En ambos casos se considera una profundidad de 20 cm para la incorporación de la cal.

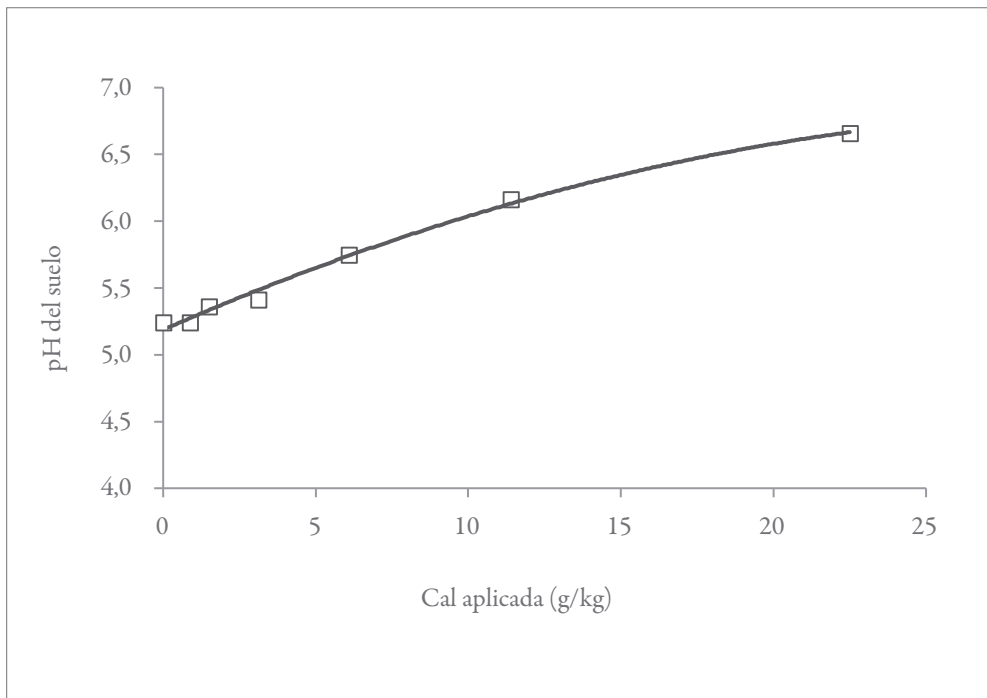


Figura 4.16. Se muestra el pH del suelo en función de la cantidad de cal aplicada medida luego de incubar las muestras del suelo por 20 días.

Fuente: Osorio et al. (2012)

Este método permite tener cierto control sobre los efectos de la aplicación de la cal. Las cantidades de cal dolomita arriba calculadas están muy por debajo de las frecuentes aplicaciones que se hacen al trasplantar las plántulas de aguacate y que fluctúan entre 5 y 10 kg/sitio, las cuales, por supuesto, elevan innecesariamente el pH y generan potenciales deficiencias de nutrientes que se corregirán aplicando más fertilizante. El sobreencalamiento no aumenta el rendimiento, pero sí los costos de producción.

Fertilización con fósforo

Como ya se mencionó, los suelos comúnmente exhiben baja disponibilidad de fósforo para las plantas. De ahí que sea necesaria la adición de fertilizantes fosfóricos solubles para mejorar la disponibilidad del nutriente en el suelo y así satisfacer los requerimientos de las plantas cultivadas. Montoya y Osorio (2009) realizaron un experimento en el cual aplicaron cantidades crecientes de KH_2PO_4 a un andisol y evaluaron la respuesta de las plántulas de aguacate cv. Villagorgona. Encontraron que las plantas de aguacate mejoraron su crecimiento solo cuando la concentración de fósforo soluble en el suelo alcanzó una concentración de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ (figura 4.17).

La cantidad requerida para obtener tal concentración de fósforo en la solución del suelo se puede determinar a través de isothermas de adsorción de P (Fox & Kamprath, 1970). Esto consiste en adicionar una fuente de fósforo soluble —p. ej., KH_2PO_4 , $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ — para, después de un periodo de incubación de seis días, evaluar la cantidad de fósforo que permanece en forma soluble y la cantidad que queda adsorbida. En la figura 4.18, se pueden observar isothermas de adsorción de fósforo para tres suelos de Colombia (un andisol, un oxisol y un molisol). Para obtener la concentración de fósforo en la solución de estos suelos de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, es necesario aplicar fósforo a razón de 1.658, 352 y 65 mg/kg de suelo, respectivamente. Como era de esperarse, el requerimiento de fósforo en el andisol fue mucho más alto y fue seguido por el oxisol. Si se considera, por ejemplo, la fertilización fosfórica requerida para el establecimiento de una plantación de aguacate en estos suelos, las cantidades de superfosfato triple (0-44-0) a aplicar serían de 159, 56 y 11,4 kg/sitio (para los cálculos, se consideraron los valores de densidad aparente de cada suelo así: 0,6, 1,0 y 1,1 g/cm^3 , respectivamente, una profundidad de 20 cm y un diámetro inicial del ploteo de 1 m) (figura 4.18) (Osorio, 2011).

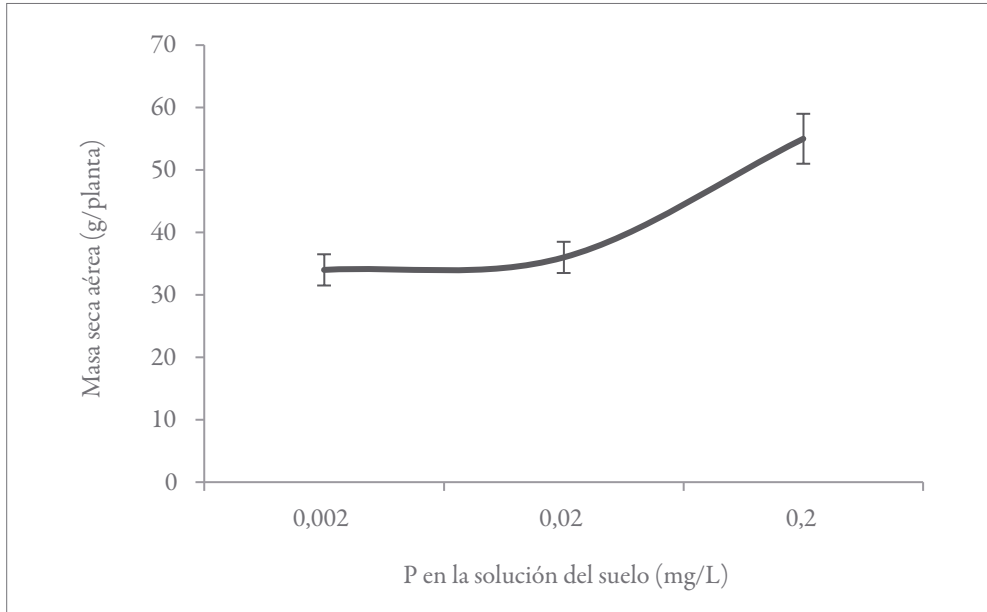


Figura 4.17. Efecto de la concentración de fósforo en la solución del suelo en la masa seca de plántulas de aguacate.

Fuente: Adaptada de Osorio et al. (2012)

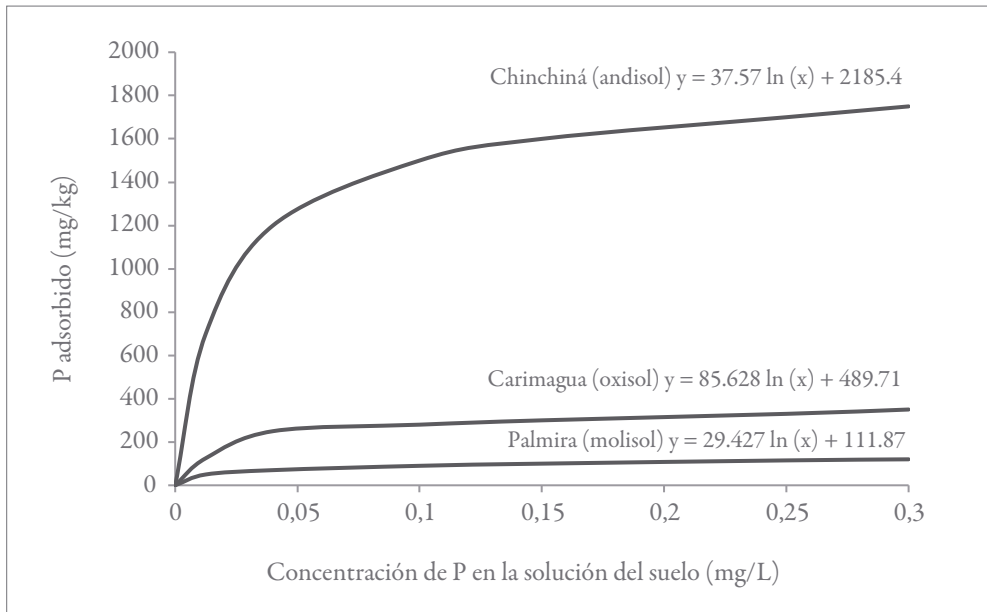


Figura 4.18. Isothermas de adsorción de fósforo de tres suelos de Colombia (andisol, oxisol y molisol). La línea discontinua indica la concentración de fósforo soluble de 0,2 mg/L.

Fuente: Osorio (2014)

Infelizmente, los productores de aguacate tienden a aplicar grandes cantidades de fertilizantes fosfóricos sin recurrir a estas técnicas, y caen en el problema de la sobrefertilización. Los excesos de fósforo son muy comunes en los huertos de aguacate. En el mismo estudio de Osorio et al. (2012) se encontraron en huertos de aguacate concentraciones excesivamente altas de fósforo soluble en casi la mitad de las muestras analizadas (47%), mientras que un 51,4% estuvo en un rango de fósforo de medio a adecuado y solo un 1,4% de las muestras presentó niveles muy bajos (figura 4.19).

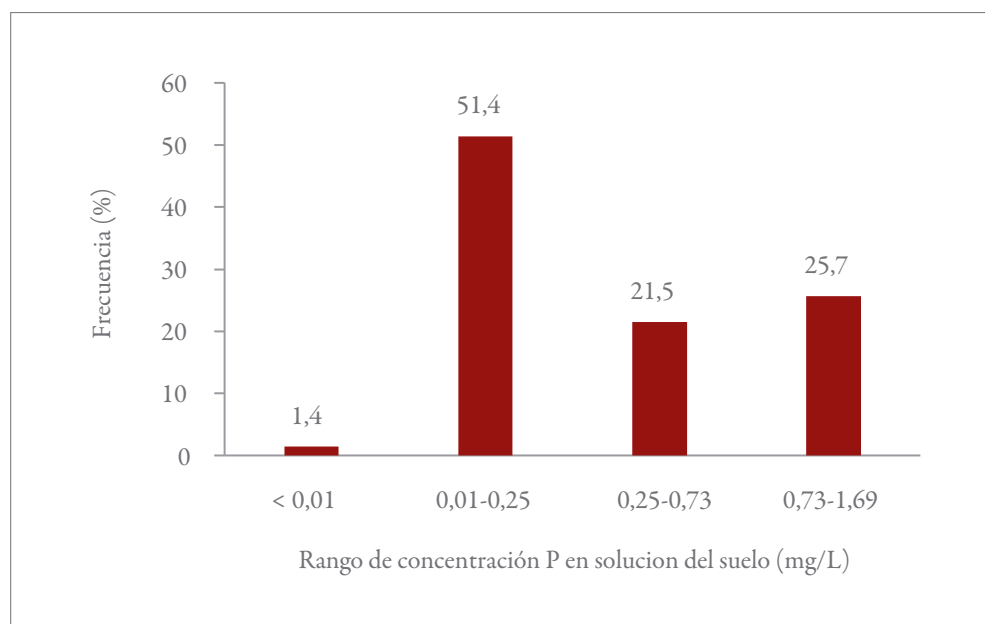


Figura 4.19. Frecuencia relativa de valores de concentración de fósforo en la solución del suelo agrupados por rango. Suelos del oriente y norte de Antioquia cultivados con aguacate.

Fuente: Osorio et al. (2012)

Tales excesos de fosfato en la solución del suelo no mejoran el crecimiento de las plantas, al contrario, lo pueden disminuir, ya que reducen la disponibilidad de elementos menores catiónicos (hierro, manganeso, cobre y zinc) en el suelo. Esto último tiende a ser manejado a través de la aplicación de fertilizantes, con lo que el costo de producción aumenta, pero no se obtienen más beneficios. Concentraciones altas de fósforo soluble tienen riesgos ambientales, ya que este puede pasar a aguas corrientes a través de la escorrentía y así contaminar aguas destinadas al consumo animal o humano, lo cual genera problemas de eutrofización. Como se explica a continuación, esto se puede evitar a través del uso de otras estrategias biotecnológicas como la asociación micorrizal.

Hongos micorrizo-arbusculares

Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (AMF, por su sigla en inglés) son microorganismos benéficos que promueven la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas, y ayudan especialmente en la absorción de elementos de baja movilidad como el fósforo, el cobre y el zinc. Estos hongos forman asociaciones mutualistas con las raíces de la mayoría de las plantas, incluyendo el aguacate. En la figura 4.20 se pueden observar las raíces de plántulas de aguacate altamente colonizadas por el hongo micorrizal *Glomus fasciculatum*. Las hifas del hongo funcionan como una extensión de la raíz, de forma que captan nutrientes más allá del alcance de las raíces. Se ha estimado que las raíces micorrizales pueden explorar 1.000 veces más suelo que la raíz no micorrizal y, con ello, acceder a más nutrientes, lo cual estimula el crecimiento vegetal.

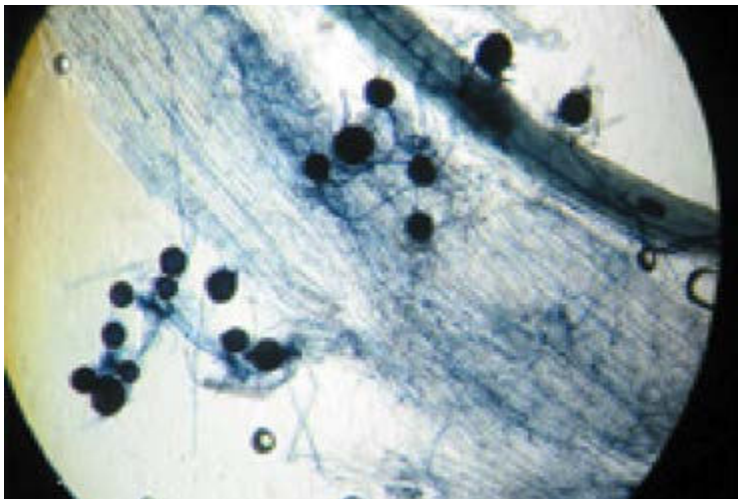


Figura 4.20. Raíces de aguacate con colonización micorrizal del hongo *Glomus fasciculatum* (imagen obtenida a través de un estereomicroscopio).

Fuente: Osorio et al. (2012)

En huertos de aguacate del norte y el oriente antioqueños se ha encontrado una alta presencia de hongos micorrizales en prácticamente todas las muestras analizadas. Sin embargo, la respuesta de las plantas a la inoculación micorrizal varía en función de la concentración de fósforo disponible en el suelo. A bajas concentraciones de fósforo, la planta deriva un gran beneficio de esta asociación, pero a altas concentraciones de este elemento, el crecimiento vegetal se puede ver afectado negativamente (figura 4.21) (Osorio et al., 2012).

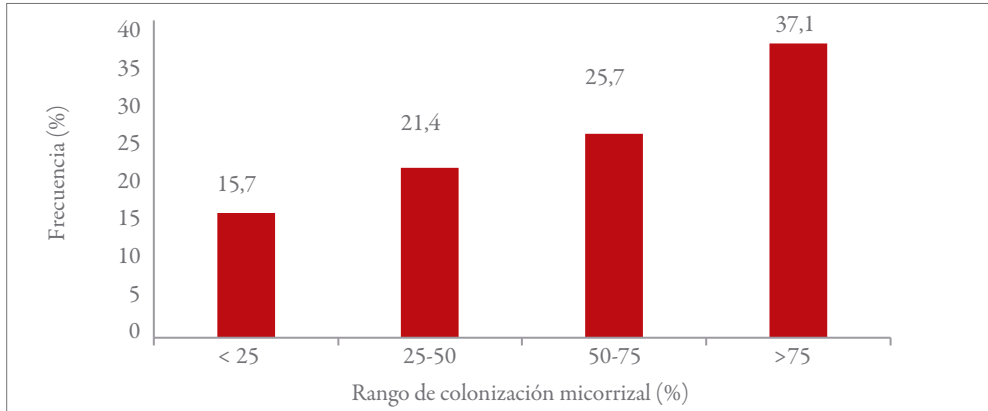


Figura 4.21. Frecuencia relativa de valores de colonización micorrizal de raíces de huertos de aguacate del norte y el oriente de Antioquia.

Fuente: Osorio et al. (2012).

En un sentido práctico, lo que sugieren los resultados de la figura 4.22 es que, en presencia de la asociación micorrizal, la concentración de fósforo no es necesaria, sino que puede ser contraproducente. De hecho, la cantidad de fósforo requerida en solución no es $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ sino que puede ser tan baja como $0,02 \text{ mg L}^{-1}$. Esto hace que el requerimiento de la fertilización fosfórica en presencia de raíces micorrizales disminuya considerablemente. Para el ejemplo mencionado de los tres suelos (andisol, oxisol, molisol) (figura 4.18), las cantidades de fertilizante fosfórico para alcanzar tal concentración serían 86, 25 y 0 kg/sitio (ver detalle de densidad aparente, profundidad y diámetro del ploteo, en el apartado “Fertilización con fósforo”).



Figura 4.22. Aspecto de las plántulas de aguacate no-inoculadas (M-) e inoculadas con el hongo micorrizal *G. fasciculatum* (M+) que crecieron con tres concentraciones de fósforo en la solución del suelo: 0,002, 0,02 y $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. Nótese cómo, a bajas concentraciones, hay una respuesta positiva a la inoculación con el hongo, pero, a concentraciones más altas, el efecto se vuelve negativo.

Fuente: Osorio et al. (2012)

Lo anterior representa reducciones del ~50 % del fertilizante fosfórico, pero quizá lo más importante es que de esta forma se evitan problemas agronómicos (inducción de deficiencias de micronutrientes) y se reducen los riesgos de contaminación ambiental.

La condición micorrizal, como se mostró en la figura 4.22, es aparentemente la regla y no la excepción. Así, la aplicación de altas dosis de fósforo ocasiona que el desempeño de la planta esté por debajo del óptimo deseado.

Microorganismos solubilizadores de fósforo

Ha sido tradicional la aplicación de altas cantidades de fertilizantes fosfóricos solubles para aumentar la disponibilidad de fósforo en el suelo (Narsian & Patel, 2000; Reddy, Kumar, & Babita, 2002). Este proceso es costoso y puede incrementar el riesgo de contaminación de aguas corrientes (Arcand & Schneider, 2006; Shigaki, Sharpley, & Prochnow, 2006).

Una alternativa que ha sido propuesta e investigada recientemente consiste en usar microorganismos solubilizadores de fósforo (MSP) mediante la producción de ácidos orgánicos (Osorio & Habte, 2014; Singh y Reddy, 2011). Muchos ácidos orgánicos son eficaces en la reducción de la fijación del fósforo, pues son capaces de desorber el fósforo previamente fijado en el suelo o de disolver el fósforo nativo de este (Guppy, Menzies, Moody, & Blamey, 2005). Es claro que algunas plantas son capaces de producir estos ácidos orgánicos en sus raíces (p. ej., el té, el pasto *Brachiaria*, la macadamia, etc.) o que estos son producidos por algunos microorganismos del suelo (Gyaneshwar, Naresh Kumar, Parekh, & Poole, 2002; Pandey, Trivedi, Kumar, & Palni, 2006), pero algunas de ellas no son tan eficientes en hacer esto. Una vez que el fósforo es solubilizado, pasa a la solución del suelo, donde puede ser tomado por las raíces más efectivamente.

Entre los microorganismos del suelo capaces de disolver fósforo se encuentran bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Bacillus* (Kim, Jordan, & McDonald, 1997) y algunos hongos como *Penicillium* y *Aspergillus* (Mittal, Singh, Nayyar, Kaur, & Tewari, 2008; Ramaekers, Remans, Rao, Blair, & Vanderleyden, 2010; Whitelaw, 1990) y *Mortierella* (Osorio, 2003; Osorio & Habte, 2013). Se espera que al inocular el suelo conjuntamente con AMF y MSP se pueda mejorar la efectividad en la absorción de fósforo solubilizado.

Las plantas micorrizadas pueden liberar una mayor cantidad de sustancias carbonadas en su rizosfera (micorrizosfera) que las plantas no micorrizadas, y los MSP podrían así liberar más ácidos orgánicos para, de esta manera, disolver fosfatos insolubles, particularmente, los de calcio (Osorio, 2014). En términos generales, infortunadamente existe poco conocimiento sobre la población microbiana asociada a la rizosfera del aguacate; mucho menos se conoce sobre el efecto conjunto que podría tener la inoculación con ambos tipos de hongos (micorrizal y solubilizador).

Tamayo y Osorio (2017) evaluaron el efecto individual y combinado (sobre el estado nutricional y el crecimiento de plántulas de aguacate cv. Hass en condiciones de vivero) al inocular el hongo *Mortierella* sp. y el hongo micorrizal *Rhizoglyphus fasciculatum*. Encontraron que solo la inoculación conjunta (*R. fasciculatum* y *Mortierella* sp.) incrementó significativamente la masa seca total de la planta en un 61 %, sin que se presentaran diferencias al usar la concentración de *Mortierella* sp. de 10^6 y 10^8 UFC/mL (figura 4.23).

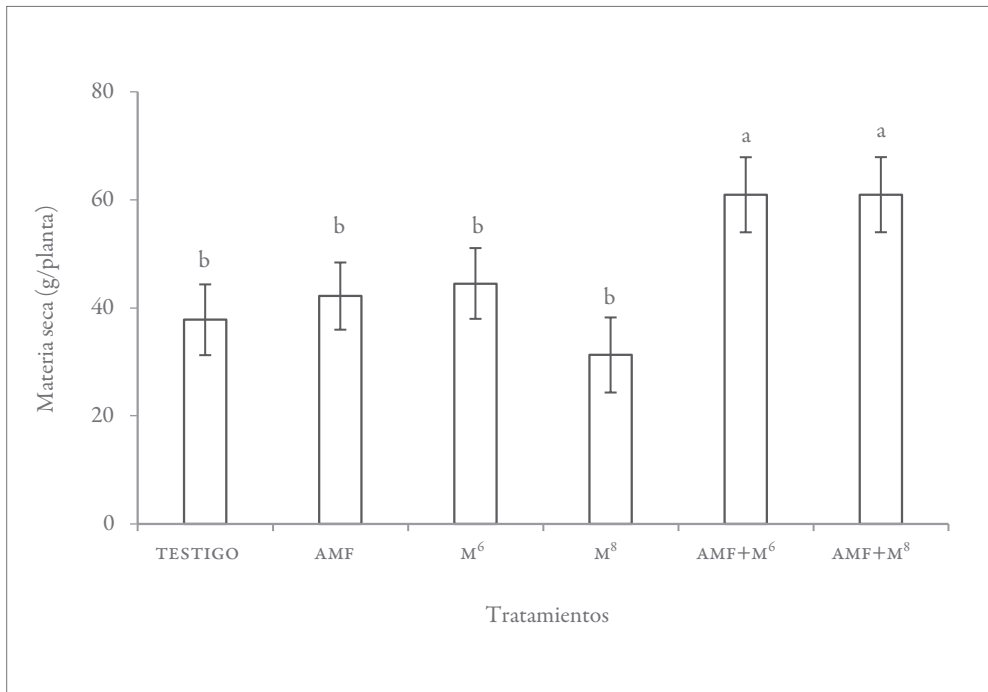


Figura 4.23. Materia seca aérea total de hojas y tallos de plantas de aguacate cv. Hass en función de los tratamientos de la inoculación individual y conjunta con *Mortierella* sp. (10^6 y 10^8 UFC/mL) y *R. fasciculatum* (AMF), 240 días después del trasplante en vivero. Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan.

Fuente: Tamayo y Osorio (2017)

Solo los tratamientos que incluyeron la inoculación conjunta ($AMF + M10^6$ y $AMF + M10^8$) incrementaron significativamente el valor de esta variable hasta alcanzar 170,4 y 150,9 μg de P planta⁻¹, lo cual representa un incremento de 2,5 y 2,2 veces más, respectivamente, que las plantas testigo (figura 4.24).

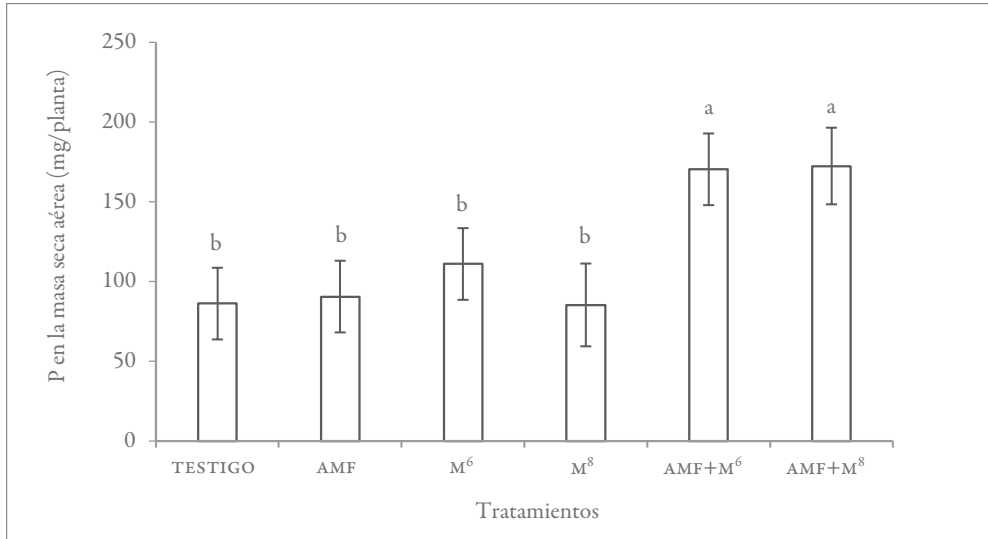


Figura 4.24. Contenido de fósforo en la masa seca aérea de plantas de aguacate cv. Hass en función de los tratamientos de la inoculación individual y conjunta con *Mortierella* sp. (10^6 y 10^8 UFC/mL) y *R. fasciculatum* (AMF), 240 días después del trasplante en vivero. Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan. Fuente: Tamayo y Osorio (2017)

El testigo sin inocular presentó una colonización muy baja (prácticamente nula) con valor de 1,2%; los otros tratamientos que no incluían inoculación micorrizal (M^6 y M^8) también presentaron valores muy bajos (1,2-2,3%) y no difirieron con las plantas testigo. En contraste, la mayor colonización micorrizal se observó cuando se aplicó *R. fasciculatum* (AMF) solo. Al inocular conjuntamente el hongo micorrizal con *Mortierella* sp., se redujo significativamente la colonización micorrizal con respecto a la inoculación sola con *R. fasciculatum* a valores entre 14,9% y 19,9%, pero estos estuvieron significativamente por encima de aquellos sin inoculación micorrizal (figura 4.25).

La colonización de raíces por el hongo *Mortierella* sp. fue afectada significativamente ($p < 0,05$) por los tratamientos (figura 4.26). En los tratamientos que no recibieron la inoculación con este hongo, incluido el testigo, no hubo presencia del hongo (colonización = 0%), mientras que, en aquellos inoculados con el hongo, este fue efectivamente detectado en las raíces. Se obtuvo mayor colonización cuando la

inoculación tuvo una concentración de 10^8 UFC/mL (72,9%) que cuando tuvo una de 10^6 UFC/mL (34,7%). El valor de colonización se redujo al inocular conjuntamente el hongo micorrizal *R. fasciculatum* (AMF + $M10^8$), caso en el cual el valor de colonización fue de 41,3% (figura 4.26).

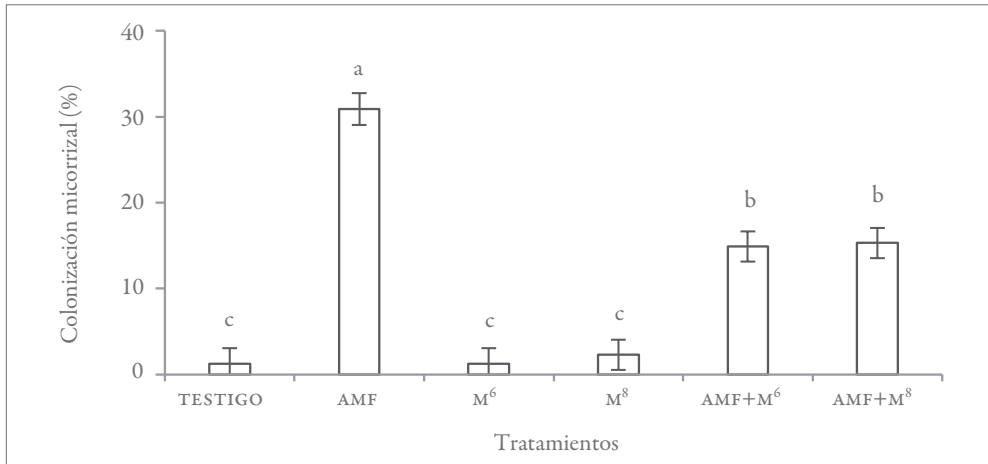


Figura 4.25. Colonización micorrizal en raíces finas de plantas de aguacate cv. Hass en función de los tratamientos con la inoculación individual y conjunta con *Mortierella* sp. ($M10^6$ y $M10^8$ UFC/mL) y *R. fasciculatum* (AMF), 240 días después del trasplante en vivero. Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan. Fuente: Tamayo y Osorio (2017)

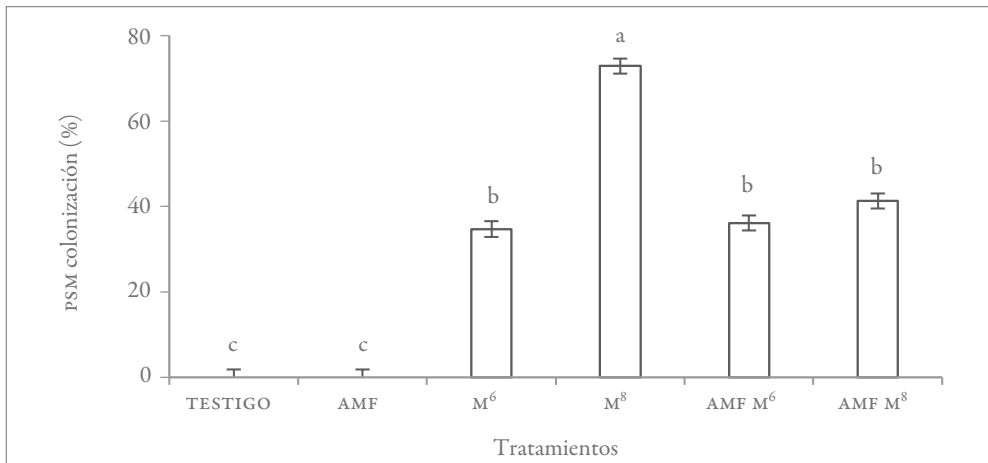


Figura 4.26. Colonización relativa de raíces finas de plantas de aguacate cv. Hass por el hongo *Mortierella* sp. en función de los tratamientos con la inoculación individual y conjunta con *Mortierella* sp. (M, 10^6 y 10^8 UFC/mL) y *R. fasciculatum* (AMF), 240 días después del trasplante en vivero. Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Duncan. Fuente: Tamayo y Osorio (2017)

Los resultados obtenidos por Tamayo y Osorio (2017) muestran que el contenido de fósforo foliar se vio afectado por la combinación de los hongos estudiados, es decir, cuando estos se inocularon conjuntamente, hubo una mayor acumulación de fósforo foliar en la planta que cuando la inoculación se hizo en forma individual. Además, a pesar de que el estudio se realizó en suelos andisoles (con una alta capacidad de fijación de fósforo), se encontró que hubo una mayor acumulación de este en la planta con la inoculación de los hongos mencionados que en plantas no inoculadas, tal como lo reportan diversos autores.

La altura y la materia seca de los tallos se vieron afectadas significativamente cuando se inocularon ambos hongos. La acumulación de fósforo en la planta se afectó significativamente por las inoculaciones conjuntas, y fue mayor cuando se aplicó la micorriza con el hongo *Mortierella* sp., en dos concentraciones; tratamientos que superaron en 2,47 y 2,19 veces, respectivamente, al testigo absoluto. La mayor colonización (31 %) se obtuvo cuando se aplicó solo la micorriza; de igual forma, la mayor concentración se determinó cuando se inoculó solo el hongo *Mortierella* sp. en dosis de 10^8 UFC.

Fuentes orgánicas

Después de que los nutrientes del suelo han sido absorbidos por las raíces del árbol, estos son transformados en compuestos orgánicos o inorgánicos y transportados a los diferentes órganos del árbol. Con la cosecha del fruto, cada año se retira de forma permanente una gran cantidad de estos nutrientes, mientras que otra parte de estos es removida de forma temporal, ya que es reciclada en el huerto con la caída de hojas y flores, entre otros. De ahí la importancia de mantener o incorporar la hojarasca y las ramas secas al pie de los árboles, ya que esto no solo mejora las propiedades físicas del suelo y su capacidad de retención de humedad, sino que tiene un papel importante en el ciclaje de nutrientes dentro de la plantación (Salazar-García, 2002).

Durante su evolución, el aguacate desarrolló diferentes estrategias de adaptación. Una de ellas es producir varios flujos de crecimiento vegetativo, compuestos de hojas de vida corta pero adaptadas a la sombra y que, en su búsqueda de luz, crecen en brotes terminales alejados del tronco y en la periferia del árbol (Wolstenholme & Whiley, 1999). El fruto del aguacate es muy demandante de energía y tiene una gran dependencia de las reservas del árbol (Wolstenholme, 1986). Esto hace que la estrategia de la planta sea de alta eficiencia para captar, almacenar, conservar y reciclar

carbohidratos y reservas minerales, lo cual lo hace parecer como un árbol cuya producción es barata en cuanto al gasto de nutrientes (Salazar-García, 2002).

La materia seca está compuesta por carbono (C) y otros nutrientes acumulados durante el crecimiento y desarrollo del fruto. Se usan también nutrientes en la síntesis de proteínas y aceite, ambos en altas cantidades en la fruta, por lo cual, la fruta con mayor contenido de materia seca y aceite requiere más nutrientes (Salazar-García, Lazcano-Ferrat, & González-Durán, 2006).

Saber que hay nutrientes cuya tasa de ciclaje es mayor al 50% y otros cuya tasa es muy baja o nula ayuda a entender por qué al aguacate se le considera un frutal cuya producción de fruto es económica desde el punto de vista nutrimental (Wolstenholme & Whiley, 1999). Por otra parte, la gran eficiencia en el ciclaje de nitrógeno, fósforo y potasio por parte de las hojas de ambos flujos vegetativos explica por qué en la región de estudio los árboles no muestran síntomas visuales de deficiencia de estos nutrientes, sin embargo, también explica la presencia de deficiencias de calcio, magnesio y boro y, en muchas ocasiones, de zinc (Salazar-García, Cossio-Vargas, & González-Durán, 2007).

La descomposición de la materia orgánica constituye, asimismo, uno de los flujos principales del ciclo del carbono (C), ya que una gran parte de este elemento se devuelve a la atmósfera por la respiración de los organismos descomponedores (Shiels, 2006).

Uno de los índices de calidad de la hojarasca que más se ha utilizado para predecir la descomposición es la relación carbono:nitrógeno (C:N) (Heal, Anderson, & Swift, 1997). En este sentido, Vitousek, Turner, Parton y Sanford (1994) y Thompson y Vitousek (1997) observaron que, entre otros factores, la disponibilidad de nitrógeno limita la descomposición. El patrón general para la pérdida de peso de la hojarasca en descomposición comprende dos fases de estado; una inicial, de rápido desarrollo por el lavado de compuestos solubles y la descomposición de materiales lábiles como (azúcares, algunos fenoles, almidones y proteínas), y una segunda más pausada, como resultado de la lenta descomposición de elementos recalcitrantes como celulosa, hemicelulosa, taninos y lignina.

Los estudios sobre las tasas de descomposición de hojarasca y de mineralización/inmovilización de nutrientes en aguacate en Colombia son muy escasos. La disponibilidad limitada o el alto costo de los fertilizantes minerales, además de las nuevas

exigencias del consumidor (técnicas de agricultura ecológica), hacen que los sistemas de cultivo tiendan a reducir la necesidad de aportes externos al sistema. Cada año, una buena parte de los nutrientes que son absorbidos por las plantas se devuelven al suelo por medio de la descomposición de hojas, restos de poda, abscisión de órganos, etc. Por ello, es primordial conocer y maximizar los beneficios de la descomposición de estos residuos y las tasas de reciclado de sus nutrientes.

De acuerdo con Kolmans & Vásquez (1999), al combinar fuentes de fertilización orgánica con fuentes de fertilización mineral (como la roca fosfórica), se activa la flora de la rizosfera, se fomentan las asociaciones benéficas entre hongos y raíces a través de la liberación de enzimas, se activa la descomposición de toxinas y el estímulo de la germinación y se disminuye la susceptibilidad a plagas y enfermedades. Por otra parte, al activar el metabolismo mediante sustancias orgánicas, se activa la absorción de sustancias de defensa y antibióticos del humus y se mejora el rendimiento y sanidad vegetal.

En el aguacate se pueden utilizar diferentes tipos de abonos orgánicos, cuya elección puede estar determinada por la disponibilidad local, el precio y la facilidad de transporte y aplicación. Las hierbas indeseables o el pasto que crece entre los árboles, por ejemplo, se pueden podar y sus residuos frescos se pueden dejar dispersos sobre el suelo; también se pueden utilizar para hacer compost y aplicarse como mantillo o *mulch*.

La gallinaza, los lombricompostos, los desechos urbanos y otros materiales orgánicos, así como las fuentes inorgánicas de fertilización (roca fosfórica), son recursos potencialmente valiosos para mejorar las condiciones fisicoquímicas del suelo y restaurar su productividad, pues aumentan la disponibilidad de nutrientes (Tamayo & Muñoz, 1997).

La gallinaza es utilizada como abono orgánico para mejorar la fertilidad de los suelos y como complemento a la nutrición del aguacate. La aplicación de gallinaza en cantidad suficiente mejora la estructura del suelo, aumenta la retención de humedad por parte de este, actúa como fertilizante de liberación lenta, incrementa la capacidad del suelo para almacenar nutrientes y es una fuente moderada de nitrógeno, fósforo y potasio y de algunos micronutrientes (Salazar-García, 2002).

La cantidad de nutrientes que pueden aportarse al suelo con la gallinaza dependerá de la cantidad, la forma de aplicación y de su incorporación. Dependiendo de las

características físicas y químicas del suelo, la aplicación individual de gallinaza a un árbol adulto de aguacate puede ser de 25 a 50 kg anuales o bianuales. Con el tipo de gallinaza usada en Nayarit (México), la incorporación de 50 kg (con 20% de humedad) por árbol aportó al suelo 30 g de nitrógeno en forma de nitratos, 37,2 g de fósforo y 16 g de potasio. Estas cantidades de nutrientes están muy lejos de ser suficientes para producir una cosecha redituable de aguacate (Salazar-García, 2002).

De acuerdo con los requerimientos de potasio, para que 156 árboles/ha produzcan una cosecha de 30 t de aguacate cv. Hass —la cual extrae 78,16 kg de potasio—, sería necesario aplicar 1,5 kg de gallinaza por árbol por año. De aquí la importancia de incluir aplicaciones adicionales de nutrientes a los huertos abonados únicamente con estiércoles (Salazar-García, 2002).

Conclusiones

La nutrición y la fertilización son aspectos esenciales en el manejo integral del cultivo de aguacate. Los nutrientes cumplen funciones esenciales que determinan el desempeño vegetal y controlan en muy buena parte el potencial de producción. Buena parte de los suelos colombianos exhiben baja disponibilidad de nutrientes, lo cual ocasiona deficiencias en las plantas. Si bien la identificación de los síntomas de deficiencia es una ayuda importante en el diagnóstico del estado nutricional de las plantas de aguacate, estos no se deben usar como único criterio de diagnóstico, ya que la aparición de los síntomas implica una pérdida significativa en el potencial productivo de la planta.

Los análisis de suelos son una herramienta fundamental para detectar con anticipación niveles deficientes de los nutrientes, razón por la cual se deben seguir cuidadosamente las instrucciones para tomar muestras adecuadas y representativas del suelo. Así mismo, las muestras de tejidos foliares pueden ser bastante relevantes para evaluar la existencia de problemas nutricionales en los huertos y así poder realizar correcciones a través de la fertilización.

En la actualidad, se cuenta con criterios satisfactorios para manejar la fertilización de los huertos de aguacate y asegurar la productividad de estos. Las recomendaciones deben ser atendidas técnicamente para evitar un manejo inadecuado de cales y fertilizantes. En algunos huertos se han detectado problemas por sobreencalamiento y sobrefertilización que deben ser evitados a través de herramientas de diagnóstico en laboratorio y manejo de suelo (incubación de cal e isoterma de adsorción de fosfato). Estas técnicas pueden jugar un papel importante en el manejo ambientalmente seguro de fertilizantes y enmiendas y, al mismo tiempo, obtener una mejor relación costo-beneficio.

Se debe poner mucho cuidado en el manejo de los elementos menores, ya que prácticas como la sobrefertilización y el sobreencalamiento pueden disminuir su disponibilidad para las plantas.

Los hongos micorrizo-arbusculares pueden jugar un rol importante en el manejo adecuado de la nutrición vegetal: los experimentos llevados a cabo son muy promisorios sobre sus efectos, pero estos deben ser evaluados en plantas en producción.

La materia orgánica incrementa la eficiencia en el reciclaje de nutrientes y ayuda a la sostenibilidad de condiciones físicas favorables en los suelos, por lo que es uno de los factores más importantes que afectan la fertilidad y productividad de suelos tropicales.

Referencias

- Arcand, M. M., & Schneider, K. D. (2006). Plant and microbial-based mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: a review. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(4), 791-807.
- Avilán, L., Chirinos, A. V., & Figueroa, M. (1978). Exportación de nutrientes por una cosecha de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Agronomía Tropical*, 28(5), 449-461.
- Avilán, L., & Leal, F. (1984). *Suelos y fertilizantes para frutales en el trópico*. Caracas, Venezuela: Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (Fonaiap).
- Avilán, L., Leal, F., & Bautista, D. (1989). Aguacate. En Autores (eds.), *Manual de fruticultura: cultivo y producción* (pp. 740-756). Caracas, Venezuela: Editorial América.
- Avilán, L., Rengifo, C., & Leal, F. (1986). *El cultivo del aguacatero*. Caracas, Venezuela: Fundación Servicio para el Agricultor (Fusagri).
- Chapman, H. D. (1966). *Diagnostic criteria for plants and soil*. Riverside, EE. UU.: Quality Printing Inc.
- Charpentier, J. M., & Martin-Prevel, P. (1967). Étude des carences minérales chez l'avocatier. I Croissance et symptômes. *Fruits*, 22(5), 213-233.
- Devlin, R. (1982). *Fisiología vegetal* (3.ª ed.). Barcelona, España: Editorial Omega S. A.
- Embleton, T. W., Jones, W. W., & Garber, M. J. (1959). Curvilinear relationship between leaf nitrogen and yield of fuerte avocados. *Proceedings American Society Horticultural Science*, 74, 378-382.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (Eds.). (2005). *Mineral nutrition of plants. Principles and perspectives* (2.ª ed.). Sunderland, EE. UU.: Sinauer Associates.
- Espinosa, J. (1996). Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. *Informaciones Agronómicas*, 23, 1-5.
- Fox, R. L., & Kamprath, E. (1970). Phosphate sorption isotherms for evaluating phosphorus requirements of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 902-907.
- Glass, A. D. M. (1989). *Plant nutrition. An introduction to current concepts*. Boston, EE. UU.: Jones and Bartlett Publishers.

- Goodall, G. E., Embleton, T. W., & Platt, R. G. (1965). Avocado fertilization. *University of California Cooperative Extension Bulletin*, 2024, 1-6.
- Gualdrón, A. R., & Herrón, F. (1979). Fraccionamiento, fijación y liberación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas del Oriente antioqueño. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 4, 59-93.
- Guerrero, R. (Ed.). (1995). *Fertilización de cultivos en clima medio*. Bogotá, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos S. A.
- Guerrero, R. (1996). Los nutrientes de las plantas. En autor (Ed.), *Fertilización de cultivos de clima cálido* (pp. 35-43). Bogotá, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos S. A.
- Guppy, C. N., Menzies, N. W., Moody, P. W., & Blamey, F. P. C. (2005). Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Australian Journal of Soil Research*, 43(2), 189-202.
- Gyaneshwar, P., Naresh Kumar, G., Parekh, L. J., & Poole, P. S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, 245(1), 83-93.
- Heal, O. W., Anderson, J. M., & Swift, M. J. (1997). *Plant litter quality and decomposition: An historical overview*. En G. Cadisch, & K. E. Giller (Eds.), *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition* (pp. 3-30). Wallingford, EE. UU.: CAB International.
- Hiroce, R., Ojima, M., Gallo, J. R., Bataglia, O. C., Furlani, P. R., & Furlani, A. M. C. (1979). *Composição mineral e exportação de nutrientes pelas colheitas de frutos subtropicais e temperados*. Documento presentado en el 5° Congresso Brasileiro de Fruticultura, Pelotas, Brasil.
- Instituto de la Potasa y el Fósforo (Inpofos). (1999). *Potasa: su necesidad y uso en agricultura moderna*. Quito, Ecuador: Inpofos.
- Kim, K. Y., Jordan, D., & McDonald, G. A. (1997). Effect of phosphate-solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizae on tomato growth and soil microbial activity. *Biology and Fertility of Soils*, 26(2), 79-87.
- Kolmans, E., & Vásquez, D. (1999). *Manual de agricultura ecológica. Una introducción a los principios básicos y su aplicación* (2.ª ed.). La Habana, Cuba: Grupo de Agricultura Orgánica de Actaf.
- Jaramillo, J. D. (1995). *Andisoles del oriente antioqueño. Caracterización química y fertilidad*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Lahav, E., & Kadman, A. (1980). *Avocado fertilization. Bulletin of the International Potash N.º 6*. Berna, Suiza: International Potash Institute.
- Lazcano-Ferrat, I., & Espinoza, J. (1998). Manejo de la nutrición del aguacate. *Informaciones Agronómicas*, 31, 3-6.

- Lynch, S. J., Goldweber, S., & Rich, C. E. (1954). Some effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the yield, tree growth, and leaf analysis of avocados. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 67, 220-224.
- Marín, G. (1986). *Fertilidad de suelos con énfasis en Colombia. Manual de asistencia técnica No. 39*. Mosquera, Colombia: Instituto Colombiano Agropecuario (ICA).
- Marschner, H. (1997). *Mineral nutrition of higher plants*. Londres, Inglaterra: Academic Press.
- Mittal, V., Singh, O., Nayyar, H., Kaur, J., & Tewari, R. (2008). Stimulatory effect of phosphate-solubilizing fungal strains (*Aspergillus awamori* and *Penicillium citrinum*) on the yield of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. GPF2). *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3), 718-727.
- Montoya, B., & Osorio, N. W. (2009). Mycorrhizal dependency of avocado at different levels of soil solution phosphorus. *Suelos Ecuatoriales*, 39(2), 143-147.
- Muñoz, R. (1998). Fertilización de la papa en Antioquia. En R. Guerrero (Ed.), *Fertilización de cultivos de clima frío* (2.^a ed., pp. 28-46). Bogotá, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos S. A.
- Narsian, V., & Patel, H. H. (2000). *Aspergillus aculeatus* as a rock phosphate solubilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(4), 559-565.
- Osorio, N. W. (2003). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo en suelos de Hawái. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/9276/>.
- Osorio, N. W. (2011). Effectiveness of phosphate solubilizing microorganisms in increasing plant phosphate uptake and growth in tropical soils. En D. K. Maheshwari (Ed.), *Bacteria in agrobiología: Plant nutrient management* (Vol. 3, pp. 65-80). Berlin, Alemania: Springer-Verlag.
- Osorio, N. W. (2014). *Manejo de nutrientes en suelos del trópico*. Medellín, Colombia. Editorial L. Vieco S.A.S.
- Osorio, N. W., & Habte, M. (2013). Phosphate desorption from the surface of soil mineral particles by a phosphate-solubilizing fungus. *Biology and Fertility of Soils*, 49(4), 481-486.
- Osorio, N. W., & Habte, M. (2014). Soil phosphate desorption induced by a phosphate-solubilizing fungus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(4), 451-460.
- Osorio, N. W., Serna, S. L., & Montoya, B. E. (2012). Use of soil microorganisms as a biotechnological strategy to enhance avocado (*Persea americana*)-plant phosphate uptake and growth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(2). 6645-6657.

- Pandey, A., Trivedi, P., Kumar, B., & Palni, L. M. S. (2006). Characterization of a phosphate solubilizing microorganism and antagonistic strain of *Pseudomonas putida* (B0) isolated from a sub-alpine location in the Indian Central Himalayas. *Current Microbiology*, 53(2), 102-107.
- Ramaekers, L., Remans, R., Rao I. M., Blair, M. W., & Vanderleyden, J. (2010). Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crops Research*, 117(2-3), 169-176.
- Reddy, M. S., Kumar, S., & Babita, K. (2002). Biosolubilization of poorly soluble rock phosphates by *Aspergillus turigensis* and *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology*, 84(2), 187-189.
- Salazar-García, S. (2002). *Nutrición del aguacate, principios y aplicaciones*. Querétaro, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap), Instituto de la Potasa y el Fósforo (Inpofos).
- Salazar-García, S., Cossio-Vargas, L. E., & González-Durán, I. J. L. (2007). Reciclamiento de nutrientes por las hojas de aguacate 'Hass'. *Proceedings VI World Avocado Congress*. Recuperado de <http://www.avocadosource.com/WAC6/es/Extenso/3a-102.pdf>.
- Salazar-García, S., Lazcano-Ferrat, I., & González-Durán, I. J. L. (2006). *Remoción de nutrientes por la cosecha de varios cultivares de aguacate en Nayarit. Folleto técnico N.º 1*. Recuperado de <https://goo.gl/48Zwq1>.
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1994). *Fisiología vegetal*. México, D. F.: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Sergent, E. (1979). *Efecto de algunos macronutrientes sobre el aguacate (Persea americana Mill)* (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Serna, S., Montoya, B., & Osorio, W. (2012). Monitoreo del pH y fósforo soluble en la rizósfera de árboles de aguacate en el norte y oriente antioqueño. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 186-190.
- Shiels, A. B. (2006). Leaf litter decomposition and substrate chemistry of early successional species on landslides in Puerto Rico. *Biotrópica*, 38(3), 348-353.
- Shigaki, F., Sharpley, A., & Prochnow, L. I. (2006). Animal-based agriculture, phosphorus management and water quality in Brazil: options for the future. *Scientia Agricola*, 63(2), 194-209.
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. A. (1993). *Volcanic ash soils-genesis, properties, and utilization*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Publishing.
- Silva, A. Q., Malavolta, E., & Montenegro, H. (1982). Deficiencias de macro e micronutrientes em abacateiro (*Persea americana* Mill.) cultivado en solución nutritiva. *Proceedings American Society for Horticultural Science Region Tropical* 25, 1-5.

- Singh, H., & Reddy, M. S. (2011). Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils. *European Journal of Soil Biology*, 47(1), 30-34.
- Tamayo, A., Hincapié, M., Bernal, J., & Londoño, M. (1998). Abonamiento orgánico y químico en clon de lulo La Selva (*Solanum quitoense* Lam.) a plena exposición solar en un andisol del Oriente antioqueño. En Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), *Memorias Segundo Seminario Frutales de Clima Frío Moderado*. Manizales, Colombia: Corpoica.
- Tamayo, A., & Muñoz, R. (1997). Abonamiento orgánico y químico del frijol (*Phaseolus vulgaris*) en suelos aluviales de clima medio. *Suelos Ecuatoriales*, 27, 96-99.
- Tamayo, A., & Osorio, N. W. (2017). Co-inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing fungus promotes the plant growth and phosphate uptake of avocado plantlets at nursery. *Botany*, 95(5), 539-545. doi: <https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0224>.
- Thompson, M. V., & Vitousek, P. M. (1997). Asymbiotic nitrogen fixation and litter decomposition on a long soil-age gradient in Hawaiian Montane Rain Forest. *Biotropica*, 29(2), 134-144.
- Uchida, R., & Hue, N. V. (2000). Soil acidity and liming. En J. A. Silva & R. Uchida (Eds.), *Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture* (pp. 101-111). Honolulu, EE. UU.: University of Hawaii.
- Vitousek, P. M., Turner, D. R., Parton, W. J., & Sanford, R. L. (1994). Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 75(2), 418-429.
- Whitelaw, M. A. (1990). Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Advances in Agronomy*, 69, 99-151.
- Wolstenholme B. N. (1986). Energy costs of fruiting as a yield-limiting factor with special reference to avocado. *Acta Horticulturae*, 175: 121-126.
- Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (1999). Ecophysiology of the avocado (*Persea americana* Mill.) tree as a basis for the pre-harvest management. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5(Especial), 77-88.
- Zapata, R. (1998). La acidez del suelo. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Zapata, R., & Osorio, N. W. (2010). La materia orgánica del suelo. En H. Burbano & F. Silva (Eds.), *Ciencia del suelo: principios básicos* (pp. 357-396). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.