




CAPÍTULO III

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



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

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

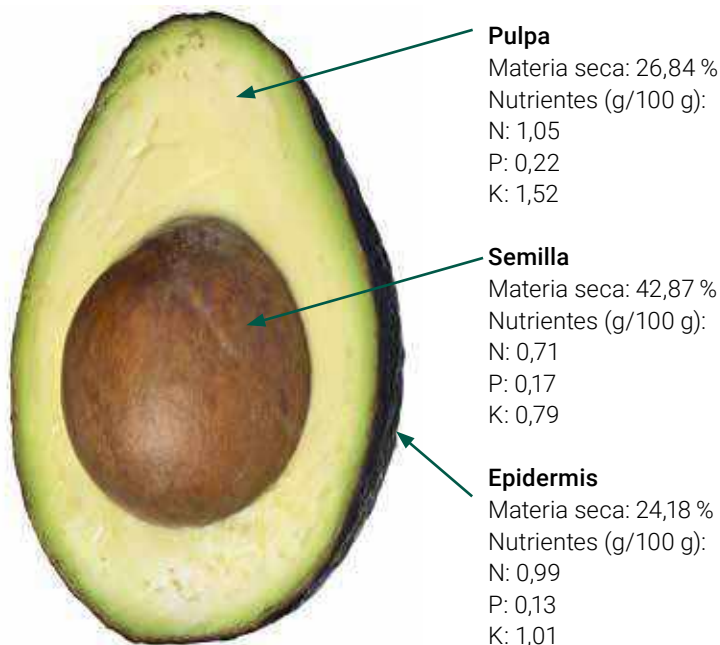
- Peso total del fruto: 57,56 g
- Semilla: 12,33 g
- Testa: 0,33 g
- Pulpa: 38,44 g
- Epidermis: 6,46 g

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

En aguacate, la floración, el cuajado de frutos y la caída de junio son etapas fenológicas claves para dirigir estrategias que permitan retener en la planta el mayor número de frutos posible.

En la fenología de todas las plantas hay etapas que tienen una mayor demanda de algunos nutrientes que otras. En cultivos perennes como el aguacate, la floración, el cuajado de frutos (que incluye la caída masiva de flores y frutos recién cuajados) y la caída de junio (que se produce cuando se presenta en simultáneo el crecimiento exponencial del fruto, el crecimiento vegetativo en inflorescencias indeterminadas y el crecimiento de la raíz [Hamid et al., 1988]) son etapas fenológicas de alta demanda de nutrientes. Estas etapas son claves para dirigir estrategias que permitan retener en la planta el mayor número de frutos posible, ya que esto se va a reflejar en un mayor rendimiento. En la figura 14 se describe la participación de cada elemento, de acuerdo con los reportes bibliográficos.

Figura 14. Esquema de distribución de materia seca en tejidos del fruto de aguacate y composición mineral de elementos primarios.



Fuente: Elaboración propia con base en Rosecrance et al. (2012).

Nitrógeno

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

una-dos semanas, mientras que a 10 °C puede tardar 12 semanas o más (Bender & Faber, 1999). La absorción de N por las plantas en forma de NO_3^- ocurre principalmente mediante flujo de masas (Matimati et al., 2014), debido a su forma aniónica, la cual no le permite adherirse a los minerales arcillosos, y, por lo tanto, permanece en la solución del suelo (Guerrero-Polanco et al., 2018).

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

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

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

En las zonas de estudio evaluadas (Rionegro, Herveo y Morales), la condición ácida del suelo puede reducir la presencia y actividad de bacterias nitrificantes, pero al mismo tiempo la presencia de altos contenidos de materia orgánica (MO) puede asegurar una alta disponibilidad de N, aunque con una posible liberación más lenta. En el suelo se registraron contenidos de MO del 11,5 % para Herveo, el 17,1 % para Morales y el 19,8 % para Rionegro. Los niveles de N en hojas, verificados con el análisis de tejidos, confirmaron contenidos normales del elemento en la planta (2,25%), de acuerdo con los valores propuestos por Embleton y Jones (1972) y verificados por Lovatt (2001) para aguacate Hass. Por otra parte, se verificaron contenidos de N en el fruto, con valores de extracción por hectárea de 54,6 kg de N para la localidad de Rionegro, 50,8 kg para Morales y 55,7 kg para Herveo, para un rendimiento de 20 t/ha, que se encuentra dentro de los rangos de extracción de N reportados por varios autores (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 2001; Maldonado-Torres et al., 2007).

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

El fruto de aguacate no solo es rico en grasa y aceite, sino que también contiene una alta concentración de proteína en relación

con otras frutas. Por lo tanto, el fruto de aguacate es un fuerte sumidero de carbono y nitrógeno. Cuando el desarrollo del fruto y el crecimiento vegetativo ocurren al mismo tiempo, con lo que entran en competencia, se debe considerar la distribución, el transporte y la asignación de nitrógeno hacia ambos tipos de estructuras en el momento de orientar los planes de fertilización. La cantidad promedio de proteína en frutos de aguacate Hass en California es de 5,0 g a 7,5 g por fruto de aguacate, lo que representa más de 1 g de nitrógeno por fruta fresca (Lovatt, 1995). En contraste con el fruto de aguacate, las hojas presentan en promedio solo 4 mg de proteína por gramo de peso fresco, un valor 7,5 veces menor que el encontrado en hojas de cítricos.

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

- Fin del crecimiento del brote vegetativo: brote apical con cuatro o más meristemos de ejes secundarios de la inflorescencia (noviembre).
- Hinchamiento temprano de la yema: se forma el número total de ejes secundarios de las inflorescencias (10); los ejes que se desarrollaron primero comienzan a elongarse y a iniciar la formación de los órganos de la flor (enero).
- Hinchamiento de la yema: los ejes secundarios jóvenes de la inflorescencia están elongados; los ejes secundarios, que se desarrollaron primero, presentan flores completamente formadas con el gineceo en estado temprano de desarrollo (febrero).
- Antesis a cuajado inicial del fruto e iniciación del flujo vegetativo de primavera en el ápice de inflorescencias indeterminadas (abril).

- Final del estado 1 de desarrollo del fruto (fase inicial de división celular) e inicio del periodo de caída de junio (junio).
- Inicio del estado 2 de desarrollo del fruto (incremento rápido en tamaño) y final del periodo de caída de junio (julio).

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

Los tratamientos que recibieron el nitrógeno extra en abril o noviembre también dieron lugar a una mayor producción de frutos de gran tamaño de importancia comercial (tamaños de 60 mm, 48 mm y 40 mm). De acuerdo con este estudio, Lovatt (2001) sugiere que el calendario de aplicación de fertilizantes es un criterio fundamental a la hora de orientar planes de fertilización. Más adelante se describen los planes de fertilización aplicados en la localidad de Timbío, como ejemplo para realizar su cálculo, así como los incrementos obtenidos en la producción.

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



Newett et al. (2018) citan algunos ejemplos de dosis de fertilización aplicadas a cultivos de aguacate Hass, en distintos escenarios del mundo, que varían de acuerdo con las características edafoclimáticas y los factores de desarrollo del cultivo, como las distancias de siembra, la edad, los niveles de producción, etc. A continuación, se describen, para cada zona productora, las consideraciones planteadas por dichos autores en relación con las dosis de N aplicadas:

Australia: la recomendación estándar para árboles maduros con un nivel óptimo de nitrógeno foliar (2,2-2,6% para Hass) es de aproximadamente 110 kg de N/ha/año, en plantaciones con una densidad de 278 árboles/ha y con el dosel cubriendo aproximadamente el 78% del suelo total del huerto. En una encuesta realizada a productores de aguacate en Australia, se encontró una amplia variación en los rangos de aplicación de dosis de N, que oscilan entre 69 kg y 528 kg de N/ha/año, con solo el 18% de la población encuestada, que corresponde a productores con mayor rentabilidad, con rangos de aplicación entre 85 kg y 140 kg de N/ha/año.

Brasil: según Cantuarias-Avilés (2018), citado por Newett et al. (2018), el Instituto Agronómico de Campinas (IAC) desarrolló las pautas para la producción de aguacate de acuerdo con las condiciones de desarrollo locales. El 90% de los huertos de aguacate en Brasil son de secano, y la temporada de lluvias ocurre desde octubre hasta marzo. Para un rendimiento esperado de 10 t/ha a 25 t/ha, se recomienda aplicar de 60 kg/ha a 120 kg/ha de N cuando el N foliar está por debajo del 2%, y que la tasa anual de fertilización, especialmente el nitrógeno y el potasio, se reparta en tres aplicaciones durante la temporada de lluvias.

California, Estados Unidos: las pautas para la aplicación de dosis de N se basan en la cantidad removida por la cosecha; por ejemplo, para un rendimiento de 10 t/ha, se recomienda aplicar 72 kg de N/ha, mientras que para un rendimiento de 20 t/ha se recomienda la aplicación de 100 kg de N/ha. Lovatt y Witney (2001) reportan

un requerimiento de 101 kg de N/ha/año para generar un rendimiento de 12,35 t/ha.

Chile: en plantaciones de ultra alta densidad, mayores a 1.100 árboles/ha (Gardiazabal et al., 2015), ubicados en la localidad de Llay Llay, con clima mediterráneo y suelo arcilloso o franco-arcilloso, el rango de N aplicado oscila entre 115 kg y 150 kg de N/ha/año, alcanzando rendimientos de 30 t/ha.

Fósforo

El fósforo es absorbido de la solución del suelo por las raíces de las plantas como ion ortofosfato, principalmente $H_2PO_4^-$, y en un grado menor como ion fosfato secundario HPO_4^{2-} . Los dos factores principales que controlan la disponibilidad de P para las raíces de las plantas son: la concentración de iones de fosfato en la solución del suelo y la capacidad del suelo para reponer estos iones cuando son absorbidos por las raíces de las plantas (Syers et al., 2008). La resistencia de un suelo particular a elevar sus contenidos de P-disponible cuando se incrementa la aplicación de fertilizantes fosfatados es conocida como capacidad tampón del suelo y corresponde a la cantidad de P que es necesario agregar como fertilizante para elevar el P disponible en 1 mg/kg (ppm) de fosfato por cada kilogramo de fósforo aplicado (Rojas, 2002).

La cantidad total de fósforo presente en la capa arable de los suelos oscila normalmente entre 200 mg/kg y 5.000 mg/kg. Tomando valores medios de 500 mg/kg para los horizontes subsuperficiales, esto equivaldría a valores del orden de 200-4.000 kg de P/ha. Esta cantidad sería, en principio, más que suficiente para abastecer de fósforo a cualquier cultivo, pero desafortunadamente solo menos del 1% está disponible para la planta. La máxima disponibilidad se presenta en pH entre 6,5 y 7,5, pero es insoluble en pH muy altos (Mengel et al., 2001).

A través de varias reacciones químicas, el P se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía, como el adenosín trifosfato (ATP) (Afif, 2005). El fósforo influye en el desarrollo de las flores, el cuajado de frutos, la formación de brotes y yemas, y el crecimiento de raíces (Ataucusi, 2015); la baja disponibilidad en el suelo está asociada con la inhibición del crecimiento de yemas y la baja generación de brotes vegetativos (Ataucusi, 2015).

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

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

Productos comerciales	Porcentaje	
	N	P2O5
Fosfato diamónico (dap)	18	46
Fosfato monoamónico (map)	10	48
Ácido fosfórico		50
Roca fosfórica		25-40

Fuente: Elaboración propia.

Para las localidades en estudio (Rionegro, Herveo y Morales), se registró un contenido de P disponible en el suelo de 6,6 ppm, 5,9 ppm y 6,4 ppm, respectivamente, y un contenido en hojas del 0,11 % para Rionegro y el 0,13 % para Herveo y Morales. Con estos contenidos, tanto a nivel de suelo como de planta, se obtuvieron valores de extracción por hectárea de 7,0 kg para Rionegro, 6,5 kg para Herveo y 7,5 kg para Morales, para un rendimiento de 20 t/ha.

La interacción entre nutrientes y las formas disponibles pueden favorecer o afectar de manera negativa su disponibilidad para las

plantas. En este sentido, Mengel et al. (2001) reportan que las plantas fertilizadas con amonio absorben más aniones que cationes, además de que liberan iones H^+ al suelo, lo que acidifica la rizosfera. Otros autores reportan evidencias sobre el estímulo en la liberación de fósforo y su mineralización después de cinco días, y la biodisponibilidad de fósforo hasta por 40 días tras la aplicación de urea (Ning et al., 2021). Igualmente, estudios llevados a cabo por Bar et al. (1997) reportan que la alta presencia de nitrato reduce los niveles de fósforo en plantas de aguacate.

Potasio

El potasio es absorbido por las plantas en grandes cantidades, más que cualquier otro elemento mineral, a excepción del nitrógeno (Guerrero-Polanco et al., 2018). Para el óptimo crecimiento, los niveles de potasio en las plantas pueden encontrarse entre el 2% y el 3% en base seca. Cuando el potasio es limitado, los procesos esenciales de la vida de las plantas, desde la fotosíntesis hasta la regulación estomática, pueden verse afectados. A diferencia del N y el P, el K no forma parte de ningún compuesto orgánico vital en las plantas; sin embargo, la presencia de este elemento es vital para su crecimiento, ya que es conocido como un activador enzimático que promueve el metabolismo (Uchida, 2000).

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

La forma no disponible representa entre el 90% y el 98% del potasio total de los suelos, y está contenida en minerales primarios (feldespatos, ortosa, microclina, muscovita, biotita). La forma lentamente disponible representa del 1% al 10% del potasio total, y puede ser gradualmente tomada por las plantas o fijada. La forma fácilmente disponible es una combinación entre el potasio intercambiable y el disponible en la solución del suelo. En algunos suelos se puede presentar una reversión a formas lentamente disponibles en el proceso de fijación en las arcillas. La forma fácilmente disponible representa solo una pequeña fracción del potasio total del suelo, pues se encuentra entre el 0,1% y el 2%, dependiendo del tipo de suelo.

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K^+ , se encuentran la cantidad y tipo del mineral arcilloso, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de K^+ intercambiable, la capacidad del suelo para fijar el K^+ y la humedad, temperatura, aireación y pH del suelo (Havlin et al., 1998). Sin embargo, la fertilización en exceso de este mineral puede causar lixiviación o que sea tomada por la planta sin producir ningún efecto útil (Mengel et al., 2001).

Dentro de las funciones básicas del K, se conoce su papel regulador en la apertura y cierre estomáticos (Knight Jr., 2002), en el mantenimiento del balance de cargas eléctricas en los sitios de producción de ATP, en la promoción de la translocación de fotosintatos para el crecimiento de las plantas o su almacenamiento en frutos o raíces, y en la síntesis de proteínas (Salvo, 2017). Además, debido a su alta movilidad, este nutriente mantiene el pH de las células por la neutralización de ácidos orgánicos, lo que favorece la fotosíntesis (Mengel et al., 2001).

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

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

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

Fuente: Elaboración propia.

Para las localidades en estudio (Rionegro, Herveo y Morales), se registraron contenidos de K en el suelo de 0,26 cmol/kg para Herveo, 0,32 cmol/kg para Morales y 0,28 cmol/kg para Rionegro, y valores de extracción por el fruto de 83 kg/ha para Rionegro, 93,7 83 kg/ha para Herveo y 81,4 83 kg/ha para Morales. El contenido nutricional en hojas es del 0,75% para Rionegro, el 1,37% para Herveo y el 0,57% para Morales. Los valores registrados para estas localidades se encuentran dentro de los intervalos de concentración nutrimental óptimos para aguacate Hass, reportando valores entre 0,5% y 2,4% por varios autores (Embleton y Jones, 1972; Bertin et al., 1976; Goodall et al., 1979).

Calcio

El Ca es un elemento requerido para el crecimiento del aguacate y es un componente importante de la pared celular y la superficie exterior de las membranas celulares. En la pared celular vegetal, el Ca estabiliza su estructura y controla el crecimiento, las propiedades de intercambio de iones y la actividad enzimática. En aguacate, los niveles de Ca afectan el rendimiento, el tamaño y la calidad

poscosecha. La maduración del fruto se hace más lenta por los altos niveles internos de Ca. En suelos de baja disponibilidad de este elemento, adiciones al suelo han mejorado el crecimiento de las plantas y el rendimiento de frutos cuando se utiliza en balance con otros nutrientes, como fósforo y nitrógeno (Messenger et al., 1997).

En aguacate se han demostrado fuertes correlaciones entre un mayor contenido de Ca en el fruto y una menor presencia de pudriciones (Hofman et al., 2002; Penter & Stassen, 2000) y de trastornos internos como pardeamiento vascular y manchas en la pulpa (Boyd et al., 2007; Eaks, 1985; Hofman et al., 2002; Kremer-Köhne et al., 1993; Penter & Stassen, 2000; Saucedo-Hernández et al., 2005; Thorp et al., 1997). Altos niveles de nitrógeno y bajos niveles de calcio en el exocarpo de frutos de aguacate pueden estar asociados con antracnosis y baja calidad de estos en poscosecha (Tomassini-Vidal & Pino-Huasacca, 2022). El Ca tiene poca movilidad dentro de la planta (Poovaiah et al., 1988), y una vez es transportado, se presenta competencia entre los órganos (hojas, brotes, frutos, raíces, etc.), especialmente intensa durante el crecimiento inicial del fruto, cuando se presenta un fuerte crecimiento vegetativo (Witney et al., 1990). En otros frutales, como los cítricos, se ha podido establecer un efecto de la carga de cosecha sobre el tamaño del fruto. En aguacate, Hofman et al. (2002) reportan una menor presencia de pudriciones en frutos de árboles con mayor rendimiento, y lo atribuyen a una mayor concentración de Ca debido al menor tamaño del fruto registrado en árboles con alta carga. De acuerdo con los hallazgos reportados por estos autores, es probable que el Ca sea un factor dominante que impulse la relación entre la calidad de la fruta y la nutrición del árbol.

Este elemento suele ser el catión más abundante en el complejo de cambio del suelo, pero la proporción utilizable depende del grado de saturación. En numerosos suelos, el calcio fijado en el complejo coloidal y el unido a los compuestos húmicos son las formas naturales más abundantes. Incluso en suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes para la adecuada nutrición de las plantas

cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes (Monge et al., 1994). El contenido de iones totales en la solución del suelo varía según el tipo de suelo; en la mayoría de los casos, entre el 60% y el 80% del total de estos iones se encuentra como Ca^{++} , y, aunque las raíces aprovechan menos del 3% del calcio disponible, esta cantidad es suficiente para satisfacer las demandas que, por ejemplo, tienen las frutales (Barber et al., 1963).

En suelos ácidos casi siempre hay cantidades suficientes de calcio para la adecuada nutrición de las plantas cultivadas, sobre todo cuando las especies son poco exigentes.

El Ca es absorbido por las raíces y distribuido al resto de la planta, principalmente a través del xilema, por efecto de la transpiración. Las hojas totalmente expandidas, con tasas de transpiración más altas, tienden a acumular más Ca que otras hojas jóvenes y frutos. Los factores que afectan la acumulación de Ca en el fruto son la concentración en el suelo, la concentración de otros cationes (ya que compiten con el Ca en zonas de absorción de las raíces) (Tomassini-Vidal & Pino-Huasacca, 2022), la textura y humedad del suelo (Bonomelli et al., 2019), el vigor del crecimiento vegetativo, el manejo del agua y, posiblemente, el portainjerto. Para reducir la incidencia de desórdenes fisiológicos en poscosecha, la relación $\text{Ca}^+\text{Mg}/\text{K}$ en el porcentaje de saturación de bases del suelo debe mantenerse entre 4 y 5 (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 2001).

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

El nitrato de calcio [Ca (NO₃)₂] estabiliza el pH del suelo a aproximadamente 7 (neutro) y es una fuente importante de nitrógeno en su forma fácilmente asimilable. El carbonato de calcio (calcita o caliza calcítica) es aplicado con frecuencia para elevar el pH de suelos ácidos, que se ven afectados por el uso de sales de amonio, urea o amoniaco anhidro, con tendencia a acidificar el suelo.

Magnesio

El magnesio (Mg) es un elemento esencial para el crecimiento y el desarrollo de las plantas. La disponibilidad de Mg para las plantas depende de los siguientes factores (Mikkelsen 2010):

1. Propiedades químicas del material parental de origen y su grado de meteorización.
2. Factores climáticos y antropogénicos específicos del lugar.
3. Prácticas de manejo agronómico, en donde se incluye las especies cultivadas, la rotación de cultivos y las prácticas de fertilización orgánica y mineral.

Debido a la gran variación en el contenido de Mg del material parental, su contenido total en los suelos varía considerablemente entre 0,05 % y 0,5 % (Maguire & Cowan, 2002). Se ha reportado que las concentraciones de Mg disponible para las plantas en la solución del suelo varían entre 125 µM y 8,5 mM (Barber, 1995). En suelos profundos de uso agrícola, una cantidad considerable del Mg total del suelo está ligado en forma intercambiable por la unión reversible del Mg a cargas permanentes y/o variables en los suelos. A diferencia de otros cationes como K, Ca y NH₄⁺, el Mg es altamente móvil en el suelo debido a que presenta una menor fuerza de adhesión a las cargas negativas que representan la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Gransee & Führs, 2012). Esta condición también puede resultar desfavorable en zonas productoras de aguacate del Cauca en donde la precipitación excede

la evapotranspiración durante periodos prolongados a lo largo del año, lo cual provoca pérdidas de Mg por lixiviación o lavado (Rebolledo-Roa & Burbano-Díaz, 2023).

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

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

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

La clorosis intervenal sobre hojas viejas es uno de los síntomas típicos de deficiencia de Mg. Se ha reportado que hasta el 35% del Mg total en plantas está ligado a los cloroplastos. Sin embargo, esta condición de clorosis es altamente dependiente de la intensidad de luz; es decir, plantas que crecen en condiciones de alta intensidad lumínica parecen tener un mayor requerimiento que aquellas que crecen en condiciones de baja luminosidad (Zekri & Obreza, 2013). Navarro y Navarro (2003) explican que cuando la

relación Ca/Mg es mayor a 10, las deficiencias de Mg pueden ser realmente visibles debido a que el Ca desplaza el Mg adsorbido por el complejo coloidal del suelo. Se ha demostrado que el Mg en el aguacate promueve un mayor número de brotes nuevos, así como la floración temprana y el mayor cuajado de frutos, al disminuir el número de frutos que abscisan (Chirinos, 1999) (Ataucusi, 2015). Además, este elemento contribuye al estatus hídrico de los tejidos (Cerdas Araya et al., 2006).

Los contenidos de Mg y Ca presentan una relación directamente proporcional con el aumento en la calidad del fruto (Martínez et al., 2014). La deficiencia de Mg es nociva, sobre todo cuando el Ca también es deficiente (Cerdas et al., 2006). Hofman et al. (2002) mencionan que la relación $(Ca + Mg)/K$ se correlaciona positivamente con el contenido de Mg y Ca en la pulpa de los frutos, y estos tres nutrientes se correlacionan negativamente con la antracnosis.

Azufre

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

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

A continuación, se describen algunas características del azufre:

- El 90% del azufre que se presenta naturalmente en los suelos está asociado con la MO. El humus del suelo contiene alrededor del 5% de este elemento. Similar a lo que ocurre con el N, la liberación de S depende tanto de la cantidad como de la tasa de descomposición de la MO. El azufre orgánico liberado, combinado con el que proviene de otras fuentes, como la lluvia y el agua de riego, puede proveer este elemento en cantidades suficientes para las plantas.
- La forma disponible de azufre para las plantas es el ion negativo sulfato, que puede ser absorbido por las raíces, pero usualmente se presenta en zonas muy profundas que superan la zona de raíces de la mayoría de las plantas.
- El sulfato de calcio es un compuesto soluble utilizado como fuente de liberación lenta de Ca, pero además suministra S.

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

Una condición que puede generar deficiencia de S se presenta cuando se utilizan altas tasas de fertilizantes nitrogenados. Si el suministro de N no es suplementado con adecuado S, el N disponible para ser usado por los cultivos puede ser excesivo en relación con el S. En condiciones altas de N y bajas de S, los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas pueden verse interrumpidos y las plantas pueden presentar síntomas de deficiencia de S. Las deficiencias de S eran más comunes en décadas pasadas, cuando era mayor el

uso de fertilizantes pobres en S, como nitrato de amonio, nitrato de potasio, urea, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP) (Zekri & Obreza, 2013).

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

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

Micronutrientes

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

La mayoría de los micronutrientes están normalmente disponibles en el suelo en cantidades suficientes. Cuando se presentan deficiencias, por lo general es resultado de condiciones químicas en el suelo que hacen que dichos elementos se presenten en formas insolubles y que no estén disponibles para las plantas. Esto pasa

especialmente con el zinc y el hierro, que tienen una solubilidad muy limitada a pH de 6 o superior. La deficiencia de elementos menores también puede presentarse por ciertas reacciones químicas que se producen en suelos que contienen cal o que son regados con agua que contiene altas cantidades de bicarbonato. Suelos pobres en drenaje y la presencia de enfermedad de la raíz también pueden considerarse como factores limitantes que contribuyen a un pobre desarrollo de las raíces absorbentes, responsables de la captación de dichos nutrientes (Crowley et al., 2001).

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

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

Las deficiencias de Fe normalmente no son un problema para los árboles de aguacate, a menos que crezcan en suelos calcáreos con pH mayores a 7 o en suelos ácidos con altos contenidos de Mn, ya que una excesiva concentración de este elemento puede suprimir

el consumo de Fe. La deficiencia de Fe se caracteriza por un amarillamiento intervenal, con estrechas líneas verdes oscuras que se presentan a lo largo de las venas. Una clorosis severa provoca que las hojas se tornen de color amarillo pálido a blanco, así como síntomas de quemaduras en los márgenes y ápices, y en casos extremos las hojas se llegan a caer (Lahav & Whiley, 2002). En suelos calcáreos se pueden remediar las deficiencias de Fe con la aplicación de quelato de Fe o mediante el incremento del pH. Granja y Covarrubias (2018) sugieren que la estrategia de fertilización basada en sulfato de amonio, más un inhibidor de la nitrificación ureico con la aplicación de urea puede ser una alternativa efectiva y sustentable para contrarrestar los síntomas de clorosis por hierro en árboles de aguacate, con una efectividad similar a la alcanzada con aplicaciones de quelatos de hierro.

Las deficiencias de Zn se encuentran comúnmente en suelos calcáreos con pH elevados, pero también pueden presentarse en zonas con altas precipitaciones, que lixivian sales y conducen a la acidificación del suelo. Los síntomas se presentan en hojas nuevas con moteados intervenales, reducción del tamaño de las hojas y crecimiento del brote en forma de roseta (Crowley, 1992; Wallihan et al., 1958). Las estrategias para corregir las deficiencias de Zn dependen en gran medida del pH del suelo y, tal vez, de la cantidad de Mo disponible para formar complejos metálicos (Srivastava & Sethi, 1981). El zinc está involucrado en diversas funciones de las plantas, como la fotosíntesis, la formación de sacarosa y almidón, el metabolismo de proteínas y auxinas, la integridad de las membranas, la floración y la producción de semillas (Alloway, 2004).

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

La captación de boro del suelo es en gran parte pasiva, y su transporte en la planta se hace a través de los tejidos del xilema (Mengel

& Kirkby, 1978), aunque en aguacate se mueve parcialmente por el floema y puede ser traslocado desde las hojas hacia tejidos en desarrollo de flores y frutos (Minchin et al., 2012). El boro en el suelo está disponible para las plantas en forma de ácido bórico [B(OH)₃], que es la forma en la que es absorbido por las raíces y transportado vía xilema (Clarkson & Hanson, 1980; Raven, 1980). Algunas características del suelo, como un pH alto, elevados contenidos de calcio y bajos contenidos de humedad limitan la disponibilidad de boro e inducen deficiencias en cultivos que crecen en estas condiciones (Gupta, 1980; Gupta & MacLeod, 1981). El boro también es fácilmente lixiviado del suelo (Gupta et al., 1985) y, por lo tanto, debe ser sustituido periódicamente en un programa acorde con las condiciones climáticas, el contenido en el suelo y los requerimientos del cultivo (Harkness, 1960).

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

Existen reportes previos, realizados en Sudáfrica (Robbertse et al., 1990), California (Jaganath & Lovatt, 1995) y Nueva Zelanda (Dixon et al., 2005), sobre la aplicación foliar de B para mejorar funciones reproductivas del aguacate. Estos trabajos indican que la viabilidad del polen, la fertilización del óvulo y el cuajado del fruto son procesos proclives a mejorar con la aplicación foliar de B en el estado fenológico de coliflor como predominante. En aguacate se presenta tanto polinización cruzada como autopolinización. En la autopolinización, los tubos polínicos a menudo crecen más



lentamente que los de polinización cruzada y, por lo tanto, pueden tardar más en llegar al óvulo, lo que reduce las posibilidades de autofecundación y cuajado (Williams & Reese, 2019). La aplicación de B podría mejorar el cuajado al estimular el desarrollo de los tubos polínicos en la autopolinización.

En un estudio realizado en Australia, Hapuarachchi et al. (2022) encontraron que la aplicación de B al suelo no incrementó el cuajado de los frutos, mientras dosis altas, de 30 g por árbol, provocaron una reducción del 56% en el cuajado. Además, en este estudio se reporta un efecto del B sobre el aumento en el diámetro del fruto por un aumento directo de la masa de la pulpa entre el 8% y el 9%.

