

**EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS MENORES SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DEL  
CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA**

**DIEGO FERNANDO NARANJO POLANIA**

**CODIGO 12202132**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA**

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AGRONOMIA**

**IBAGUE, AGOSTO 16 DE 2018**

**PROYECTO DE GRADO MONOGRAFIA**

**EFFECTOS DE LOS ELEMENTOS MENORES SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DEL  
CAFÉ (*Coffea arabica L.*) EN LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA**

**DIEGO FERNANDO NARANJO POLANIA**

**CODIGO 12202132**

Trabajo de grado presentado para optar el Título de Agrónomo

**FRANCISCO JOSE MONTEALEGRE TORRES**

**INGENIERO AGRONOMO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA**

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AGRONOMÍA**

**IBAGUE, AGOSTO 16 DE 2018**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

---

---

**Jurado**

---

---

**Jurado**

---

---

---

## **Dedicatoria**

A dios y a la vida que me han dado grandes oportunidades y a mí como reconocimiento al esfuerzo y trabajo puesto en esta monografía.

## **Agradecimientos**

A Dios y a mis padres por darme la vida

A mi esposa Angélica por su apoyo

A la Doctora Nelly Méndez por sus orientaciones y apoyo

A los docentes por sus enseñanzas

Al Ingeniero Francisco Montealegre por su valioso apoyo

Y a cada una de las personas que han compartido conmigo la etapa de aprendizaje entre otras circunstancias por la que pasa un estudiante.

## Resumen

Son 17 elementos los requeridos por la planta para su funcionamiento, actualmente la agricultura se enfoca principalmente al nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en segunda instancia el magnesio (Mg), azufre (S) y calcio (Ca) pero los elementos menores como el hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), zinc (Zn), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y níquel (Ni) se desconocen, ocasionando diferentes síntomas que afectan el desarrollo de la planta y por ende la productividad y calidad de la producción. Esta monografía se realiza para que los productores cafeteros y profesionales incluyan en la nutrición de café a los elementos menores, teniendo herramientas para el diagnóstico del cultivo y su correcta nutrición. Para la elaboración de esta monografía se realizó una revisión bibliográfica seleccionando revistas científicas y publicaciones de instituciones reconocidas alrededor del cultivo del café; se encontraron bien definidos los síntomas, funciones, los procesos que cumplen y la necesidad de ser incluidos los elementos menores en los planes de nutrición de café, por otra parte no se puede concluir cual es el orden de importancia de absorción de elementos menores ya que varía en diferentes investigaciones, inclusive entre territorios, como ocurre en los departamentos de Colombia, tal vez por esta razón Colombia aún no define un plan de nutrición incluyendo los elementos menores y solo da a conocer la extracción de ellos, sin embargo sugiere que los suelos que tengan más del 12% de materia orgánica no requieren la adición de elementos menores pero no todos los suelos cumplen con este porcentaje; existe una etapa crítica en el desarrollo del fruto de café y es antes de los 90 días después de la antesis en este lapso se absorbe más del 40% del total de los elementos menores siendo necesario la fertilización vía foliar o suelo con anterioridad para que la planta lo pueda asimilar y transportar a los frutos de café, de esta forma formándose un fruto de calidad y buen peso, por último, existe tecnología que se desconoce su

aplicación en Colombia, como lo es la incorporación de tabletas nutricionales que aportan nutrientes por mayor tiempo a la planta, tal vez reduciendo costos en el cultivo de café.

## Abstract

Are 17 elements required by the plant for its operation, currently agriculture focuses mainly on the nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), in the second instance the magnesium (Mg), sulfur (S) and calcium (Ca) but the minor elements as iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), boron (B), zinc (Zn), molybdenum (Mo), chlorine (Cl) and nickel (Ni) are unknown, causing different symptoms that affect the development of the plant and therefore the productivity and quality of coffee; This monograph is performed so that the coffee producers and professionals included in the nutrition of coffee trees to the minor elements, having tools for the diagnosis of crop and its proper nutrition. For the elaboration of this monograph was carried out a literature review by selecting journals and publications of institutions recognized around the cultivation of coffee. We found well defined symptoms, functions, processes that meet and need to be included the elements in coffee nutrition plans, on the other hand it is not possible to conclude which is the order of importance of absorption of minor elements since varies in different investigations, inclusive between territories, as it happens in the departments of Colombia, perhaps for this reason Colombia does not yet define a nutrition plan including the minor elements and only discloses the extraction of them, however it suggests that soils that have more than 12% organic matter do not require the addition of minor elements but not all soils meet this percentage, There is a critical stage in the development of the coffee fruit and is before the 90 days after anthesis in this period is absorbed more than 40% of the total of the minor elements, being necessary the foliar or soil fertilization beforehand so that the plant can assimilate and transport coffee fruits, thus forming a fruit of quality and good weight, finally, there exists technology that his application is not known in Colombia, such as the incorporation within the plant's nutritional

tablets that provide nutrients for as long the plant, perhaps reducing costs in the cultivation of coffee.

## Índice

Resumen.....	ii
Abstract.....	iv
Indice De Tablas Y Figueras.....	5
Introduccion .....	8
1. Descripción De Los Elementos Menores .....	10
1.1 Boro.....	10
1.1.1 Deficiencia.....	10
1.1.2 Función.....	15
1.1.3 Causas.....	16
1.1.4 Exceso o toxicidad.....	17
1.1.5 Forma de absorción y transporte. ....	17
1.2 Zinc.....	18
1.2.1 Deficiencia.....	18
1.2.2 Función.....	20
1.2.3 Causas.....	21
1.2.4 Exceso o toxicidad.....	21
1.3 Manganeso .....	21
1.3.1 Deficiencia.....	22

1.3.2 Función.....	22
1.3.3 Causas.....	23
1.3.4 Exceso o toxicidad.....	24
1.3.5 Forma de absorción.....	24
1.4 Hierro.....	25
1.4.1 Deficiencia.....	25
1.4.2 Función.....	28
1.4.3 Causas.....	28
1.4.4 Forma De Absorción.....	29
1.5 Cobre.....	29
1.5.1 Deficiencia.....	29
1.5.2 Función.....	30
1.5.3 Causas.....	31
1.5.4 Exceso o toxicidad.....	31
1.5.5 Forma de absorción.....	31
1.6 Cloro.....	31
1.6.1 Deficiencia.....	31
1.6.2 Función.....	32
1.6.3 Forma de absorción.....	33
1.7 Molibdeno.....	33

1.7.1 Deficiencia.....	33
1.7.2 Función.....	34
1.7.3 Causas.....	34
1.7.4 Forma de absorción.....	34
1.8 Niquel.....	35
1.8.1 Deficiencia.....	35
1.8.2 Función.....	36
1.8.3 Toxicidad.....	37
2. Requerimientos Nutricionales De Los Elementos Menores En Las Plantas De Cafe .....	37
3. Programa De Fertilizacion En Café Con Elementos Menores Diseñado Para Brasil.....	52
4. Interaccion Zinc Y Fosforo .....	60
5. Movilidad De Los Elementos Menores.....	62
6. Aporte De Elementos Menores Por El Sombrio .....	63
7. La Materia Organica Y Los Micronutrientes .....	64
8. Agricultura De Precisión.....	65
9. La Injertacion Y La Absorcion De Elementos Menores .....	66
10. Elementos Menores Y Calidad De La Bebida .....	67
10.1 Boro.....	67
10.2 Cobre.....	68
10.3 Zinc.....	69

11. Fertilizacion Con Tabletas En La Rama Ortotrópica .....	72
12. Tolerancia A El Exceso Manganeso .....	73
13. Translocacion De Boro.....	75
14. Otras Consideraciones Sobre El Boro.....	78
Conclusiones.....	80
Referencias.....	82

## Indice De Tablas Y Figueras

Tabla 1. Cantidades de micronutrientes extraídos por 1000 kg de café almendra.....	39
Tabla 2. Cantidades totales de micronutrientes extraídos (g) por las partes que componen el fruto de café equivalentes a 1.000kg de café almendra (1250 kg de c.p.s.) .....	40
Tabla 3. Cantidades de nutrientes extraídos por 1.000 kg de café almendra por departamento ..	41
Tabla 4. Programa de fertilización foliar.....	46
Tabla 5. Interpretación de los contenidos foliares .....	53
Tabla 6. Relación entre los nutrientes foliares considerados adecuados .....	53
Tabla 7. Fertilización edáfica .....	54
Tabla 8. Módulos de fertilización .....	55
Tabla 9. Modulo para elementos menores .....	56
Tabla 10. Dosis maxima por módulo.....	57
Tabla 11. Ajuste en la dosis de acuerdo con el análisis foliar .....	58
Tabla 12. Fuentes de micronutrientes para ser aplicados vía foliar.....	58
Tabla 13. Resumen de estándares de micronutrientes foliares .....	59
Tabla 14. Movilidad de elementos menores en el suelo .....	62
Tabla 15. Aporte de elementos menores del sombrero de guamo y café .....	64
Figura 1. Deficiencia de Boro, Fuente (FNC y Cenicafe, 2013).....	10
Figura 3. Toxicidad por Boro, Limbo Inferior, Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).....	17

Figura 2. Toxicidad por Boro, Limbo superior, Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).....	17
Figura 4. Deficiencia de Zinc, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).....	18
Figura 5. Deficiencia de Zinc, Fuente (FNC y Cenicafe, 2013) .....	18
Figura 6. Deficiencia de Manganeso, Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993) .....	21
Figura 7. Deficiencia de Manganeso, Fuente: (FNC y Cenicafe, 2013) .....	21
Figura 9. Deficiencia de Hierro, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).....	25
Figura 8. Deficiencia de Hierro, Fuente: (FNC y Cenicafe, 2013) .....	25
Figura 11. Deficiencia de Cobre, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).....	29
Figura 10. Deficiencia de cobre, Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).....	29
Figura 12. Deficiencia de Molibdeno, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993) .....	33
Figura 16. Absorción de Zn en el desarrollo del fruto de café, fuente (Ramirez , Bertsch, & Mora, 2002).....	47
Figura 14. Absorción de Mn en el desarrollo del fruto de café, fuente (Ramirez , Bertsch, & Mora, 2002).....	47
Figura 13. Absorción de Fe en el desarrollo del fruto de café, fuente: (Ramirez , Bertsch, & Mora, 2002).....	47

Figura 17. Absorción de Cu en el desarrollo del fruto de café, Fuente: (Ramirez , Bertsch, & Mora, 2002)..... 47

Figura 15. Absorción de B en el desarrollo del fruto de café, fuente (Ramirez , Bertsch, & Mora, 2002)..... 47

Figura 18. Relación entre el pH del suelo y la actividad de microorganismos y disponibilidad de nutrientes para las plantas, fuente: (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánche, 2006) .. 62

## Introduccion

Del cultivo de café en Colombia viven aproximadamente 563 mil familias, en el año cafetero (Nov-Oct) 2016-2017 la cosecha valió 7.8 billones de pesos (FNC, 2017, pág. 5) cifra que hace mover la economía permitiendo a los cafeteros tener mayor poder adquisitivo.

La nutrición del cultivo de café es fundamental para el correcto funcionamiento de la planta, la planta requiere de 17 nutrientes como lo son (carbono-C, hidrogeno-H, oxigeno-O, Nitrógeno-N, Fosforo-P, Potasio-K, Calcio-Ca, Magnesio-Mg y azufre-S, Hierro-Fe, Manganeso-Mn, Cobre-Cu, Zinc-Zn, Boro-B, Cloro-Cl, Molibdeno-Mo y Níquel-Ni), actualmente la nutrición se basa en la aplicación de nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K), en segunda instancia magnesio (Mg), azufre (S) y calcio (Ca) pero la planta requiere de 7 elementos más como lo son el Hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), zinc (Zn), cloro (Cl) y níquel (Ni) por esta razón se hace necesario la elaboración de esta monografía ya que se busca aclarar sus requerimientos, los síntomas de deficiencia y la función que cumple en la planta.

En ningún momento se desconoce la importancia de los elementos mayores en la nutrición del cultivo, solo se busca profundizar para complementar la fertilización y mejorar la producción tanto en calidad como en cantidad y el desempeño de la planta.

Los elementos menores están presentes en la planta facilitando procesos como la división celular, sintetizar proteínas, activar de enzimas, formar parte de proteínas, formar nucleótidos, transportar de azucares a través de las membranas, defender la planta, entre otros procesos, adicionalmente ayudan en la ruptura de la molécula del agua, componen la pared celular y hasta elongan el tubo del polen.

Del cultivo de café se extraen los frutos, para el desarrollo de este fruto la planta extrae del suelo ciertas cantidades de nutrientes que no retornaran, por lo cual es necesario conocer las cantidades extraídas en el tiempo correcto para suministrarlas porque se afecta el desarrollo y la calidad del fruto, afectando la producción del cultivo.

No es común encontrar síntomas de deficiencia de elementos menores en las plantas de café, sin embargo el desconocimiento de las mismas evita su corrección a tiempo.

## 1. Descripción De Los Elementos Menores

### 1.1 Boro



*Figura 1. Deficiencia de Boro, Fuente (FNC y Cenicafe, 2013)*

#### 1.1.1 Deficiencia.

Se presentan manchas de color café en los brotes de las hojas nuevas, hay muerte de las yemas terminales y aparición de nuevos brotes, las hojas más viejas tienen un color “verde aceituna” que se extiende desde el ápice hacia la

base, en forma de “V” invertida y en las venas de las hojas más viejas se encuentra tejido corchoso (FNC y Cenicafe, 2013), los anteriores síntomas tienen relación con los descrito por (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017) quienes dicen que en casos severos de deficiencia de B, las yemas terminales y la punta de la rama pueden secarse o morir, hay súper brotamiento, los internudos se acortan y el pegamento de la floración es menor.

(Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993) Adicionan a las descripciones anteriores que cuando hay deficiencia las hojas son pequeñas y tienen formas extrañas, los síntomas son parecidos a los causados por el hongo Phoma y hay menor crecimiento de raíces.

Por otra parte (Rosolem; Leite, 2007) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016) dicen la deficiencia de este elemento se traduce en reducción del sistema radicular, aborto de flores y frutos malformados.

Para (Salisbury & Ross, 2000, pág. 195) la carencia de este elemento no son nada habituales, los vegetales con deficiencia de boro pueden tener una amplia variedad de síntomas aunque el primer síntoma suele ser la falta de crecimiento y alargamiento anormal en la punta de la raíz junto con la inhibición de la síntesis de ADN, también se desactiva la división celular en el ápice del tallo y en las hojas más jóvenes.

Para (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 116) las plantas con deficiencia de boro pueden presentar una amplia gama de síntomas dependiendo de la edad y del tipo de planta, uno de los primeros signos de la deficiencia de B es, por ejemplo la inhibición en el crecimiento y desarrollo de las raíces tanto primarias como secundarias, la división celular en los tallos y en las hojas jóvenes cesa, y a ello le siguen la necrosis y la muerte de los meristemas, lo que se relaciona con su posible papel en la síntesis de uracilo precursor del RNA.

La deficiencia o toxicidad por Boro disminuyen la conductancia estomática, transpiración y fotosíntesis neta, especialmente en hojas jóvenes (Bogiani *et al.*, 2013; Landi *et al.*, 2013b; Mukhopadhyay *et al.*, 2013) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016). La fotosíntesis neta es más sensible a condiciones de deficiencia de boro que ha condiciones de toxicidad (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 140).

Bajo condiciones de deficiencia de Boro se ha reportado que los daños inducidos en las membranas de las células guarda de los estomas afectan el funcionamiento de las bombas de protones (ATPasa/ H<sup>+</sup>) (Ahmad *et al.*, 2009; Broadley *et al.*, 2012) citado por (Echeverry,

Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016), ocasionando la disminución en la absorción de K<sup>+</sup> y favoreciendo la salida pasiva de K<sup>+</sup> de células guarda de los estomas (Wimmer y Eichert, 2013) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016). Además Bogiani *et al.* (2013) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016) encontraron que la deficiencia de Boro disminuye la densidad de estomas y afecta el funcionamiento de los mismos debido a la acumulación de azúcares en ellos.

La concentración intercelular de CO<sub>2</sub> incrementa bajo condiciones de deficiencia y toxicidad de Boro, lo que sugiere que la disminución de la fotosíntesis neta también se debe a limitaciones no estomáticas (Han *et al.*, 2008; Sheng *et al.*, 2009; Bogiani *et al.*, 2013) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016), probablemente por alteración en varios procesos como:

- daño en membranas
- alteración en la actividad de enzimas involucradas en la fotosíntesis
- acumulación de hexosas y almidón en hojas
- daños en la estructura de los cloroplastos
- alteración en la eficiencia fotosintética
- daño en el aparato fotosintético
- entre otros.

En este sentido, los daños en las membranas celulares ocasionados por la deficiencia de Boro afectan a las proteínas que participan en la fotosíntesis (Pinho *et al.*, 2010) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016), adicionalmente se ha reportado que la deficiencia y toxicidad de Boro disminuyen significativamente las actividades de las enzimas

Rubisco (71%-85% de disminución), NADP-GAPDH (~90%) y FBPasa del estroma (~73%), sin presentarse diferencias entre la deficiencia y la toxicidad (Han *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2009) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 140).

Chen *et al.* (2014) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 141) demostraron con estudios de proteómica, que la deficiencia y la toxicidad por Boro afectan negativamente a las proteínas involucradas con las reacciones de luz (OEC23 (Oxygen evolving complex-23 protein of Photosystem II), PSI RC2-1 (photosystem II reaction-center subunit II-1) y subunidad \_\_de H<sup>+</sup>-ATPasa). El mecanismo por el cual el estrés por Boro afecta a las enzimas que participan en la fotosíntesis es desconocido, sin embargo puede estar relacionado con la acumulación de hexosas (glucosa y fructosa) y la disminución en la translocación de fotoasimilados en las hojas de las plantas con deficiencia de Boro (Zhao y Oosterhui, 2002; Bariya *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2008) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016), las cuales llevan a la disminución de la expresión de genes que codifican para enzimas de la fotosíntesis (Krapp *et al.*, 1993) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 141). La acumulación de glucosa está relacionada con el aumento de la actividad de la enzima invertasa (INV), superando la capacidad de la enzima hexoquinasa (HXK) para fosforilar hexosas, con lo cual se desencadena una retroalimentación negativa del ciclo de Calvin (Sheen, 1994; Rolland *et al.*, 2006) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 141).

Se ha reportado que bajo deficiencia de Boro además de la acumulación de hexosas, también se aumenta la acumulación de almidón en los cloroplastos, afectando negativamente la ultraestructura y función de los mismos (Han *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2009; Wimmer y Eichert, 2013) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 141). Además la

deficiencia y el exceso de B disminuyen el contenido de clorofilas, la relación Chl a/Chl b, y el contenido de carotenoides en diferentes especies con lo cual se disminuye la capacidad fotosintética de la planta (Pinho *et al.*, 2010; Mukhopadhyay *et al.*, 2013; Landi *et al.*, 2013b) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 141). La relación de clorofilas se puede ver reducida según Horn *et al.* (2007) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 141) por un aumento en el contenido de la clorofila b en plantas con toxicidad por B, sugiriendo una pérdida diferencial de los centros de reacción y de las proteínas de la antena captadora de luz.

Cuando se presenta un estrés por B se disminuye la apertura u oxidación de los centros de reacción del PSII por la baja re oxidación de la  $Q_A$ , y por tanto, no se produce el ATP y NADPH productos de la cadena transportadora de electrones, afectando así el Ciclo de Calvin (Guidi *et al.*, 2011) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 143)

Adicionalmente se logra evidenciar que cuando se presenta un exceso de B se disminuyen diferentes parámetros como:

- flujo de transporte de electrones (ET0/RC)
- transportadores totales de electrones (Sm)
- flujo de energía disipada (DI0/ RC)
- flujo de absorción (ABS/RC)
- el flujo de energía atrapado (TR0/RC).

Además, se reducen parámetros como:

- el rendimiento cuántico para el transporte de electrones (ET0/ABS)

- el rendimiento cuántico para la disipación de la energía ( $\phi_{DO}$ )
- la fracción de complejos liberadores de oxígeno
- el índice de desempeño (PIABS)
- el índice de desempeño total (PIABS-Total)

(Han *et al.*, 2009; Turán *et al.*, 2014) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 143).

Han *et al.* (2009) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 143) concluyeron que los parámetros de fluorescencia de la clorofila A son menos afectados por deficiencia de Boro que por exceso, indicando que bajas cantidades de Boro en plantas inhiben menos los aceptores del PSII.

### **1.1.2 Función.**

El boro tiene una función que aún no se ha determinado con exactitud, pero que resulta esencial en la elongación de los tubos del polen (Salisbury & Ross, 2000) lo cual coincide con (Dechen; Nachtigall, 2006) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016) cuando dicen que el boro actúa en el desarrollo del tubo polínico, por otra parte el mismo autor adiciona que el Boro es integrante de compuestos que constituyen la hemicelulosa en el transporte de azúcares a través de las membranas y en la formación de nucleótidos.

Existen evidencias que indican la participación especial del boro en la síntesis de los ácidos nucleicos, que es esencial para la división en los meristemos apicales (Salisbury & Ross, 2000, pág. 195). Sin embargo (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 139) dicen que la principal función del B es como componente estructural de la pared celular, (Botta *et al.*, 2007; Takano *et al.*, 2008; Kobayashi *et al.*, 2011) citados por (Echeverry, Quiroga,

Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016). Más del 90% del Boro en la planta está localizado en las paredes celulares (Ahmad *et al.*, 2009) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016), no obstante su función es la menos comprendida entre todos los nutrientes y las funciones que se le han atribuido parten de estudios de deficiencia o toxicidad del elemento, en los cuales se genera un “efecto de cascada” (Reid *et al.*, 2004; Broadley *et al.*, 2012) citados por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016) que afecta diferentes procesos como:

- desarrollo de semillas y frutos (Ahmad *et al.*, 2009; Agustí, 2013)
- división y elongación celular (Botta *et al.*, 2007; Ozturk *et al.*, 2010)
- crecimiento del tubo polínico (Blevins y Lukaszewsk, 1998)
- transporte y metabolismo de azúcares (Bogiani *et al.*, 2013)
- síntesis de fenoles y de algunas hormonas, como ácido indolacético (Ahmad *et al.*, 2009)
- metabolismo de ARN, respiración (Broadley *et al.*, 2012)
- fotosíntesis (Han *et al.*, 2008)
- el crecimiento de plantas (Wimmer y Eichert, 2013)
- Afecta el intercambio gaseoso (Pinho *et al.*, 2010)

Tomado de (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, págs. 139, 140)

### **1.1.3 Causas.**

La falta del elemento en el suelo o en la fertilización, suelos pobres en materia orgánica, acidez o encalado en exceso, exceso de lluvia o sequía y mucho nitrógeno en la fertilización (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

#### 1.1.4 Exceso o toxicidad.



Figura 2. Toxicidad por Boro, Limbo Inferior,  
Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)



Figura 3. Toxicidad por Boro, Limbo superior,  
Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

Las hojas viejas son de color amarillento y presentan manchas secas en los bordes y en la punta, Ocurre principalmente después de poda drástica de la planta (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993); (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017).

#### 1.1.5 Forma de absorción y transporte.

El boro se absorbe desde el suelo casi siempre en forma de ácido bórico sin disociar ( $H_3BO_3$ ). Además su transporte es lento hacia fuera de los órganos floemáticos después de que haya llegado hasta ellos por el xilema (Raven, 1980) citado por (Salisbury & Ross, 2000). El Boro después de ser cargado al xilema, se transporta a otras partes de la planta por la corriente transpiratoria (Blevins y Lukaszewski, 1998; Tanaka y Fujiwara, 2008) citado por (Echeverry, Quiroga, Balaguera Lopez, & Magnitskiy, 2016, pág. 139)

## 1.2 Zinc



Figura 5. Deficiencia de Zinc, Fuente (FNC y Cenicafe, 2013)



Figura 4. Deficiencia de Zinc, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

### 1.2.1 Deficiencia.

Para la (FNC y Cenicafe, 2013) cuando la planta tiene deficiencia de Zn las hojas nuevas son más pequeñas, lanceoladas y cloróticas adicionalmente presentan entrenudos cortos, lo anterior coincide con (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017) & (Tariq *et al.*, 2007) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016) cuando reportan que la deficiencia de Zn se manifiestan con el acortamiento de los internudos de la base de la rama hacia la punta, haciendo que las pequeñas hojas queden estrechas y amarillentas, muerte de las puntas, y súper brotamiento, (Tariq *et al.*, 2007) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016) adiciona que hay formación de "rosetas" en las puntas de las ramas y menor producción de materia seca, especialmente de parte aérea.

Según (Malavolta, Rocha Fernández, Casale, & Peres Romero, 1993) La deficiencia de zinc ocasiona graves disturbios tales como menor pegado de flor y frutos más pequeños.

Bajos contenidos de este elemento en cafetos pueden afectar más el desarrollo reproductivo que el vegetativo (Fávaro, 1992) citado por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). La carencia de Zn puede provocar la disminución de la producción de semillas (Malavolta *et al.*, 1997; Mengel & Kirkby, 1987) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014), que puede estar relacionada con el menor desarrollo de las anteras y con la inviabilidad de los granos de polen cuando la planta está bajo deficiencia de este elemento (Sharma *et al.*, 1987; Sharma *et al.*, 1990) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014).

Para (Salisbury & Ross, 2000) en la deficiencia de zinc se observan hojas pequeñas, se forma el rosetón que se produce como resultado de la disminución de crecimiento de las hojas jóvenes y los internudos del tallo, los bordes foliares suelen presentar distorsiones y pliegues.

Frecuentemente se produce una clorosis intervenal en hojas lo que indica que el zinc participa en la formación de la clorofila o bien impide su destrucción. El retraso del crecimiento del tallo que se produce cuando existe una deficiencia de zinc se debe en parte a que quizás sea necesario para producir una hormona del crecimiento llamada ácido indolacético (auxina) (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196). Hay una clara relación entre los niveles de Zn y la concentración de auxinas, que incluso llega a disminuir antes de que se manifieste la deficiencia de zinc en la planta (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 114). Existen pruebas de su papel en la síntesis del triptófano, aminoácido precursor de la hormona (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 114).

### 1.2.2 Función.

(Capa Mora , 2015, pág. 31) Afirma que el Zinc regula las auxinas responsables del crecimiento vertical de la planta. Muchas enzimas contienen zinc unido fuertemente, que resulta esencial para su correcto funcionamiento (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196).

El zinc (Zn) desempeña diferentes papeles siendo importante para mantener la integridad de las membranas, síntesis de proteínas, síntesis del triptófano, aminoácido precursor del AIA, desintoxicación de radicales superóxido, integridad estructural de ribosomas y producción de semillas (Broadley *et al.*, 2007; Henriques; Chalfun-Junior; Aarts, 2012) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

Para (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113) el zinc tiene un papel estabilizador sobre la molécula de clorofila. El Zn es necesario para la actividad de al menos ochenta sistemas enzimáticos (normalmente formando parte de su estructura, aunque no sufre cambios en su estado de oxidación); por ejemplo la NADH-deshidrogenasa la alcohol-deshidrogenasa, que cataliza el paso del acetaldehído a etanol en la fermentación alcohólica, y las cinco anhidrasas carbónicas descritas hasta el momento, que aceleran la hidratación reversible del dióxido de carbono a bicarbonato en la fotosíntesis (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 114).

Junto con el Cu, constituye algunos tipos de superóxido dismutasa (SOD), presentes en distintos orgánulos y en el citoplasma de la célula vegetal e implicadas en la defensa contra los radicales superóxido (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 114).El Zn participa en la estabilidad del ribosoma y su presencia en la RNA polimerasa, lo que le convierte en un regulador de la expresión génica (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 114).

### 1.2.3 Causas.

Alto contenido del elemento en el suelo o sobre fertilización, encalado, mucho fósforo, mucha luz (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

### 1.2.4 Exceso o toxicidad.

Las hojas más viejas quedan amarillentas casi del color de la yema de huevo (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993); (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017).

### 1.2.5 Forma de absorción.

El zinc se absorbe en forma de  $Zn^{2+}$  divalente, y probablemente a menudo a partir de quelatos de zinc (Salisbury & Ross, 2000, pág. 195). Su disponibilidad es mayor a un pH bajo (ácido) (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113).

## 1.3 Manganeso



Figura 7. Deficiencia de Manganeso, Fuente: (FNC y Cenicafe, 2013)



Figura 6. Deficiencia de Manganeso, Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

### **1.3.1 Deficiencia.**

Las hojas nuevas son más grandes de lo normal, son de color verde claro uniforme y las nervaduras de color verde más oscuro (FNC y Cenicafe, 2013). (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993); (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017) Reporta que aparecen al principio muchos puntitos blanquecinos en las hojas más jóvenes, que luego se juntan tomando un color amarillento casi yema de huevo.

Según (Salisbury & Ross, 2000, pág. 195) las deficiencias de manganeso no son habituales pero algunas enfermedades aparecen cuando existen cantidades inadecuadas de este elemento, los síntomas iniciales suelen consistir en una clorosis intervenal en las hojas más jóvenes o antiguas, lo que depende de la especie y está asociado o seguido por lesiones necróticas.

Con el microscopio electrónico (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113) observaron que la deficiencia en manganeso produce específicamente una desorganización de las membranas del tilacoide, también de las membranas del núcleo y de las mitocondrias, aunque en estos dos últimos casos de forma no tan acusada; (Salisbury & Ross, 2000) también afirman que la deficiencia de manganeso genera la desorganización de las membranas tilacoidales, pero tiene poco efecto sobre la estructura de los núcleos y las mitocondrias.

### **1.3.2 Función.**

El Mn tiene una función estructural en el sistema de membranas del cloroplasto y que una de sus aportaciones más importantes es, igual que en el caso del cloro, ayudar a la disociación fotosintética de la molécula de agua. El ion  $Mn^{2+}$  también activa numerosas enzimas (Salisbury

& Ross, 2000, pág. 195). (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113) Explica que sólo ha podido demostrar su presencia en dos:

1. La primera es el complejo manganeso-proteína que transporta los electrones desde el agua al fotosistema II, el cual requiere no menos de cuatro átomos de Mn por centro de reacción (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113).
2. En segundo lugar, el manganeso se encuentra formando parte de la Mn-SOD (Mn superóxido dismutasa), una de las isoenzimas de la SOD presente en las mitocondrias y los peroxisomas y de forma más irregular en los cloroplastos. Así, por ejemplo existe en el tabaco, pero no se encuentra en el guisante. Junto con otras formas que contienen Fe, Cu o Zn, constituye un conjunto de enzimas implicadas en la defensa de la planta contra la presencia de radicales superóxido ( $O_2^{\circ-}$ ) formados en diversas reacciones enzimáticas (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113).

El Mn está igualmente implicado como activador de muchas enzimas respiratorias del ciclo de Krebs (descarboxilasas y deshidrogenasas), aunque puede ser reemplazado (como ocurre en la isocitrato deshidrogenasa) por otros cationes divalentes, principalmente el  $Mg^{2+}$ . Asimismo está implicado en la actividad de la arginasa, enzima clave del ciclo de la urea que escinde la arginina en urea y ornitina, y en la enzima málica dependiente de NAD en plantas C4 (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113)

### **1.3.3 Causas.**

Mucha materia orgánica, suelos muy ventilados, encalado excesivo (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

#### **1.3.4 Exceso o toxicidad.**

La toxicidad de manganeso así como la tolerancia al exceso de este metal, varía ampliamente entre especies de plantas y entre variedades de la misma especie (Foy *et al.*, 1988) citados por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007)

Para (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993); (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017) se encuentran internudos cortos, hojas pequeñas y amarillentas. Ocurre en suelos ácidos o compactados; sin embargo Según Marschner (1995) citado por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007) dice en la mayoría de las dicotiledóneas, los síntomas de toxicidad de manganeso se caracterizan por la clorosis entre las nervaduras y necrosis, generalmente acompañados por la deformación de las hojas nuevas.

#### **1.3.5 Forma de absorción.**

El manganeso se encuentra en tres estados de oxidación ( $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$  y  $Mn^{4+}$ ), en forma de óxidos insolubles en el suelo, aunque también existe como quelato y sobre todo se absorbe en forma del catión manganeso divalente ( $Mn^{2+}$ ), después de que se libere de algún quelato o tras una reducción en óxidos con una valencia superior en la superficie de la raíz (Uren, 1981) citado por (Salisbury & Ross, 2000, pág. 195).

## 1.4 Hierro



Figura 9. Deficiencia de Hierro, Fuente: (FNC y Cenicafe, 2013)



Figura 8. Deficiencia de Hierro, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

### 1.4.1 Deficiencia.

Las hojas nuevas son de color amarillo hasta verde pálido, con nervaduras verdes (FNC y Cenicafe, 2013) (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017) (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

La deficiencia de hierro se caracteriza por la falta de clorofila (Salisbury & Ross, 2000, pág. 186), para el mismo autor la carencia de hierro generalmente se caracteriza porque se desarrolla una clorosis intervenal bastante pronunciada, muy similar a la deficiencia de magnesio pero esta ocurre en la hojas jóvenes, a veces la clorosis intervenal va seguida de una clorosis de las venas, de modo que toda la hoja adquiere un color amarillento. En los casos agudos, las hojas jóvenes llegan a ponerse blancas con lesiones necróticas (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194).

Aun no se conoce la razón de que la carencia de hierro produzca una inhibición rápida de la formación de clorofila, pero parece ser que hay dos o tres enzimas que catalizan ciertas reacciones de la síntesis de clorofila que requieren  $Fe^{2+}$  (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194).

El hierro acumulado en las hojas más antiguas se encuentra relativamente inmóvil en el floema, igual que en el suelo, probablemente porque se precipita internamente en las células de las hojas

en forma de óxido insoluble o de compuestos de fosfato férrico, orgánicos o inorgánicos. En los cloroplastos se almacena una forma estable y abundante de hierro existente en las hojas, en forma de un complejo de hierro y proteína denominado Fitoferritina (Seckback, 1982) citado por (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194), según (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111) cerca del 80% del hierro de las hojas se localiza en estos orgánulos.

La deficiencia de Fe modifica la estructura de los cloroplastos dando lugar a la llamada clorosis férrica (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111). Cuando el pH es alto y además hay presencia de bicarbonatos contribuye a que se presente una deficiencia de hierro, mientras que en los suelos ácidos es más abundante el aluminio soluble y se limita la absorción de hierro (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194).

Es habitual la deficiencia de hierro en suelos calizos porque la solubilidad del hierro es muy baja a pH básico y sólo la formación de quelatos (complejos orgánicos con hierro) es capaz de solucionar el problema de la absorción del hierro en estas circunstancias (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111).

Existen dos estrategias para la absorción del Fe cuando se presenta una deficiencia:

1. La inducción de una reductasa férrica: es característica de las dicotiledóneas y las monocotiledóneas no gramíneas, cuando estas especies crecen en suelos con bajas concentraciones de Fe, aumentan en la parte sub apical de las raíces tanto el poder de reducción del Fe como la actividad ATPasa, que tiende a disminuir el pH del medio y consecuentemente acidifica la rizosfera incrementando la solubilidad del Fe III. El pH apoplástico radicular desempeña un papel clave en la toma de Fe, en ese espacio se realiza la reducción de Fe III a Fe II por medio de una Fe III-quelato reductasa (FCR)

presente en la membrana plasmática; esta forma Fe II es bastante más soluble que la forma Fe III. Por último existe un transportador de membrana que introduce el Fe II en el interior de la célula; estos tres sistemas (H<sup>+</sup>-ATPasa, FCR y el transportador de membrana) se inducen en condiciones de deficiencia de Fe en el medio. Por otro lado, las especies de estrategia I acumulan o excretan, o ambas cosas a la vez, compuestos fenólicos y flavinas, y acumulan ácidos orgánicos, principalmente malato y citrato. Aunque la causa de esta acumulación no está clara, se ha relacionado con la alta actividad de fosfoenol-piruvato carboxilasa detectada en algunas zonas de las raíces deficientes en Fe que conduciría a un aumento de la fijación de carbono en dichas raíces (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111).

2. la inducción de la excreción de fitosideróforos: desarrollada por las gramíneas (maíz, avena, cebada), se caracteriza por liberar en condiciones de deficiencia de Fe fitosideróforos (FS), que son aminoácidos no proteínogénicos que quelan el Fe III presente en el suelo. Su naturaleza química depende de la especie y el mecanismo de excreción no está todavía claro, si bien se ha sugerido un mecanismo de vesículas. Se ha demostrado que existe proporcionalidad entre la cantidad de fitosideróforos liberados y el grado de clorosis férrica en la planta. Posteriormente estos complejos, Fe III-fitosideróforos, son absorbidos sin reducción previa a través de un sistema de transporte de alta afinidad, una vez que el complejo llega al citosol, se libera el Fe III y el fitosideróforo se degrada o se excreta nuevamente al exterior. Se ha comprobado que la velocidad de absorción de estos complejos también está en relación directa con el grado de deficiencia de Fe (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111).

### **1.4.2 Función.**

El hierro es esencial porque forma parte de algunas enzimas y numerosas proteínas, que trasladan electrones durante la fotosíntesis y la respiración (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194).

Forma parte de los grupos catalíticos de muchas enzimas redox del tipo hemoproteínas, como citocromos (tanto mitocondriales como cloroplásticos), catalasas, peroxidasas, etc., que presentan un grupo hierro-porfirina como núcleo prostético, el grupo hemo (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111).

El Fe se encuentra unido a grupos tiólicos de la cisteína en otras proteínas, hierro-azufre, las sulfo-ferro proteínas. Estas proteínas son clave en la fotosíntesis (como ocurre en el caso de la ferredoxina, la nitrito reductasa y la sulfito reductasa); en la fijación de nitrógeno (caso de la nitrogenasa) y en la respiración. Los estados redox  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  explican su presencia en estos sistemas enzimáticos, tanto de un tipo como de otro, al actuar como transportador de electrones en ellos (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111).

El Fe tiene un papel en la biosíntesis de la molécula de clorofila ya que regula la actividad del sistema enzimático encargado de la formación del ácido  $\delta$ -aminolevulínico (ALA), precursor de las porfirinas y el paso de la protoporfirina-Mg a la protoclorofilida (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113)

### **1.4.3 Causas.**

Alta materia orgánica y exceso lluvia, encalado excesivo (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

#### 1.4.4 Forma De Absorción.

El hierro puede ser absorbido como  $\text{Fe}^{3+}$  (Fe III) y más fácilmente dado su mayor solubilidad como  $\text{Fe}^{2+}$  o ion ferroso (Fe II) (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 111)

#### 1.5 Cobre



*Figura 11. Deficiencia de cobre, Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*



*Figura 10. Deficiencia de Cobre, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*

#### 1.5.1 Deficiencia.

En las hojas más jóvenes las nervaduras secundarias quedan salientes - 'costillas'. Puede haber deformación del limbo. En las plantas nuevas las hojas se pueden inclinar hacia abajo desde la base (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

Según (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196) las plantas casi nunca tienen deficiencia de cobre, normalmente porque lo necesitan en cantidades muy pequeñas, en ausencia de cobre las hojas jóvenes suelen tomar un color verde oscuro y están arrugadas o deformes, adicionalmente muchas veces tienen manchas necróticas.

Para (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113) entre los primeros signos de la deficiencia de Cu están la reducción en la lignificación y una acumulación de fenoles, al igual que sucede en la deficiencia de boro.

### 1.5.2 Función.

El cobre está presente en diversas enzimas o proteínas implicadas en los procesos de oxidación y reducción, dos ejemplos notables son la citocromo oxidasa, una enzima respiratoria que se halla en las mitocondrias, y la plastocianina, una proteína de los cloroplastos (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196).

La plastocianina, una proteína cloroplástica involucrada en el transporte electrónico de la fotosíntesis entre el fotosistema II y el fotosistema I y la enzima citocromo c oxidasa, una enzima respiratoria que cataliza la transferencia de electrones hasta el oxígeno en las crestas mitocondriales (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113).

Por otra parte, el Cu es un componente del complejo enzimático fenolasa que oxida fenoles, y se relaciona con la biosíntesis de lignina ya que forma algunos de sus precursores (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 113).

Este micronutriente es esencial para las plantas por ser componente de muchas enzimas y proteínas y por estar involucrado en innumerables rutas metabólicas. Varias enzimas, que contienen o son activadas por el Cu, catalizan reacciones de óxido-reducción (Marschner, 2012) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014);(Choudhary *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2010; Yruela, 2009) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016). Además, el Cu puede ejercer efectos directos o indirectos sobre hongos. Como efecto directo, la influencia de este micronutriente está relacionada con su capacidad fungistática desnaturalizando las proteínas del patógeno. Indirectamente su participación es importante en la síntesis de lignina que actúa como barrera a la penetración de microorganismos (Pasin *et al.*, 2002) citados por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda,

Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). De esta forma, el uso del cobre, mejora el desarrollo y la productividad de los cafetales y beneficia además, la calidad de los granos de café.

### **1.5.3 Causas.**

Falta del elemento en el suelo o en la fertilización, alta materia orgánica y exceso de lluvia, encalado excesivo (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

### **1.5.4 Exceso o toxicidad.**

Hojas amarillentas a lo largo de la nervadura principal, muerte de las raíces, defoliación (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993); (Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017).

### **1.5.5 Forma de absorción.**

El cobre se absorbe en forma de ion cúprico ( $\text{Cu}^{2+}$ ) divalente en suelos que estén bien aireados o bien como ion cuproso monovalente en suelos que estén húmedos y con poco oxígeno. El  $\text{Cu}^{2+}$  se quela en varios compuestos del suelo, pero es probable que proporcionen la mayor parte del cobre a las superficies radicales (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196).

## **1.6 Cloro**

### **1.6.1 Deficiencia.**

Los síntomas de deficiencia de cloro es las hojas generalmente son los siguientes: crecimiento reducido, marchitamiento, desarrollo de manchas cloróticas y necróticas; a menudo las hojas llegan a adquirir un color bronceado, mientras que las raíces reducen su longitud adquiriendo un

grosor mayor, o una forma de bastón cerca de las puntas (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194). El cloro nunca o casi nunca se encuentra ausente en la naturaleza gracias a su elevada solubilidad y su disponibilidad en los suelos, y también a que el viento o la lluvia puede transportarlo en forma de polvo o de pequeñas gotas hacia las hojas donde se produce la absorción (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194 y 195).

### **1.6.2 Función.**

Según (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194) la mayor parte de las especies absorben entre 10 y 100 veces más cloro del que necesitan. Una de las funciones del cloro es estimular la ruptura (oxidación) de la molécula de agua durante la fotosíntesis, aunque también es fundamental en las raíces, para que se efectúe la división celular en las hojas, así como un importante soluto osmóticamente activo (Terry, 1997; Flowers, 1988) citados por (Salisbury & Ross, 2000). (Rodríguez S & Flórez R, 2004, pág. 30) Agregan que la fotólisis del agua se realiza en el sitio de oxidación del fotosistema II.

Para (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 116) y (Salisbury & Ross, 2000) el cloro es de alta solubilidad y (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 116) agregan que en forma de anión se transporta tanto por el xilema como por el floema, esta gran movilidad le confiere dos funciones principales:

1. Mantenimiento del gradiente de pH existente entre el citosol y la vacuola por activación del Mg, Mn ATPasa del tonoplasto.
2. Como soluto osmóticamente activo de gran importancia. Así, está implicado en el mecanismo de apertura/cierre de las estomas junto con el potasio y en diversos movimientos o nastias.

### 1.6.3 Forma de absorción.

El cloro se absorbe desde el suelo como ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y en su mayor parte se conserva así (Engvild, 1986) citado por (Salisbury & Ross, 2000, pág. 194), uno de los más interesantes es el ácido 4-cloroindolacético, que debe ser una hormona natural del tipo auxina (Salisbury & Ross, 2000).

## 1.7 Molibdeno



Figura 12. Deficiencia de Molibdeno, Fuente (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

### 1.7.1 Deficiencia.

En las hojas más viejas aparecen manchas amarillentas y luego pardas entre las nervaduras.

Con el tiempo, esas hojas se enrollan hacia abajo a lo

largo de la nervadura principal y los bordes opuestos

llegan a tocar (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, &

Peres Romero, 1993).

Para (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196) las deficiencias de molibdeno se encuentran muy extendidas desde el punto de vista geográfico, muchas veces los síntomas son una clorosis intervenal que aparece antes en las hojas más antiguas o de mitad del tallo y que después avanza hacia las hojas más jóvenes, en algunas ocasiones se relaciona con una enfermedad llamada latigazo en donde las hojas no presentan clorosis sino que desarrollan unas hojas muy retorcidas que terminan muriendo. En los suelos ácidos la acción de añadir limo aumenta la disponibilidad del molibdeno y además elimina o reduce la severidad de su deficiencia.

### **1.7.2 Función.**

(Salisbury & Ross, 2000, pág. 196) Dicen que la función más documentada del molibdeno en los vegetales es la que forma parte de la enzima *nitrato reductasa*, que reduce los iones de nitrato a iones de nitrito, aunque también puede colaborar en la degradación de las purinas tales como adenina y la guanina debido a su necesidad como parte de la enzima *xantina deshidrogenasa* (Mendel y Muller, 1976; Pérez Vicente *et al.*, 1988) citados por (Salisbury & Ross, 2000), Asimismo forma parte de la enzima nitrogenasa, fundamental en la fijación biológica del nitrógeno y presente en todos los microorganismos capaces de realizar este proceso de fijación, tanto en forma libre como en simbiosis (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 115).

Una tercera característica probable del molibdeno es la de formar parte estructural esencial de una oxidasa que convierte el aldehído del ácido abscísico en la hormona ABA (Walker-simmons *et al.*, 1989) citados por (Salisbury & Ross, 2000).

### **1.7.3 Causas.**

Acidez del suelo (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993).

### **1.7.4 Forma de absorción.**

Debido a los mínimos requerimientos de Mo, se sabe muy poco de las formas en las que se absorbe y transforma en la célula vegetal (Azcón Bieto & Talón, 2013, pág. 114).

El molibdeno existe en el suelo principalmente en forma de sales de molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$  o  $\text{HMoO}_4^-$ ), y de  $\text{MoS}_2$ . En el primer caso el molibdeno existe en estado redox (valencia) de  $\text{Mo}^{6+}$ , pero en las sales de sulfito se presenta en forma de  $\text{Mo}^{4+}$  probablemente porque las plantas solo

necesitan cantidades de traza, no se sabe casi nada sobre las formas en que se absorbe, ni como se transforma en células vegetales (Salisbury & Ross, 2000, pág. 196).

## **1.8 Níquel**

### **1.8.1 Deficiencia.**

La existencia de la deficiencia de níquel en los cultivos se descubrió en los árboles de pecan que crecen en suelos arenosos, poco drenados y con baja capacidad de intercambio de cationes en el sudeste de los Estados Unidos (Wood *et al.*, 2004). Así como en especies que utilizan ureidos como una forma principal de transporte de nitrógeno.

En leguminosas y otras dicotiledóneas la deficiencia de níquel produce una disminución de la actividad de la ureasa y posteriormente la toxicidad de la urea, exhibida como necrosis de la punta de la hoja (Eskew *et al.*, 1984) citados por (Broadley, Brown , Cakmak, Rengel, & Fangjie, 2012, pág. 226). En las especies gramíneas los síntomas de deficiencia incluyen clorosis similar a la inducida por la deficiencia de hierro (Brown *et al.*, 1987a, b) citados por (Broadley, Brown , Cakmak, Rengel, & Fangjie, 2012, pág. 226), que incluye clorosis intervenales y necrosis parcheada en las hojas más jóvenes. La deficiencia de níquel también resulta en un marcado incremento en la senescencia de la planta y una reducción en la concentración de hierro en el tejido. Tanto en plantas monocotiledóneas como dicotiledóneas, la acumulación de urea en las puntas de las hojas puede usarse para detectar la deficiencia de níquel (Eskew *et al.*, 1984) citados por (Broadley, Brown , Cakmak, Rengel, & Fangjie, 2012, pág. 226). En las primeras etapas de toxicidad por níquel no hay síntomas claros aunque el crecimiento de brotes y raíces puede verse reducido. En pacanas, la deficiencia de níquel produce hojas deformadas, un síntoma

conocido como 'oreja de ratón' (Wood *et al.*, 2004) citados por (Broadley, Brown , Cakmak, Rengel, & Fangjie, 2012, pág. 226).

### **1.8.2 Función.**

El níquel forma parte fundamental de una enzima llamada *ureasa*, que cataliza la hidrólisis de urea a CO<sub>2</sub> y NH<sup>4+</sup> (Salisbury & Ross, 2000, pág. 197).

Las leguminosas forman ureidos en los nódulos radicales durante el proceso de fijación del nitrógeno, a continuación estos ureidos se transportan por el xilema hacia las hojas, estos ureidos también se transfieren desde las hojas antiguas y senescentes hacia las semillas en desarrollo y las hojas más jóvenes por el floema, el empleo de esos ureidos en el caso de la soja parece implicar su degradación a urea y la posterior hidrólisis de esta misma, porque cuando la planta empieza a florecer y no tiene níquel suficiente la urea aumenta de cantidad hasta alcanzar niveles tóxicos en las puntas de las hojas (Eskew *et al.*, 1984; Walker *et al.*, 1985) citados por (Salisbury & Ross, 2000, pág. 197). Cuando el níquel se elimina adecuadamente de las soluciones nutritivas las plantas acumulan tal cantidad de urea en las puntas de las hojas que parecen manchas necróticas. Por ello la degradación de los ureidos produce urea y resulta que sin níquel no se puede formar ureasa para eliminarla (Salisbury & Ross, 2000, pág. 197).

El níquel no es necesario para la síntesis de la proteína ureasa (Winkler *et al.*, 1983) citados por (Broadley, Brown , Cakmak, Rengel, & Fangjie, 2012, pág. 224), pero como componente metálico es esencial para la estructura y la función catalítica de la enzima (Klucas *et al.*, 1983) citados por (Broadley, Brown , Cakmak, Rengel, & Fangjie, 2012, pág. 224).

### **1.8.3 Toxicidad.**

Se ha verificado que las concentraciones de Ni superiores a 35 g g<sup>-1</sup> MS en la solución nutritiva son tóxicas para las plántulas de café (Pavan y Bingham, 1982) citado por (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011).

## **2. Requerimientos Nutricionales De Los Elementos Menores En Las Plantas De Cafe**

La cantidad de nutrientes requeridos por la cosecha varía de acuerdo a las características del cultivo (especie, variedad, nivel de producción), los factores climáticos (humedad y temperatura), las propiedades del suelo (fertilidad, tipo de suelo, pendiente), y el manejo cultural (Havlin, J.L.; Beaton, J.D.; Tisdale, S.L.; Nelson, W.L., 1999) citado por (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006); En concordancia a lo expuesto la extracción continuada de nutrientes por la cosecha acompañada de poco o nulo reemplazo a través del abonamiento reduce la producción e incrementa la probabilidad de respuesta a la fertilización (Havlin, J.L.; Beaton, J.D.; Tisdale, S.L.; Nelson, W.L., 1999) citado por (Sadeghian Khalajabadi, Beatriz Mejía , & Hernán González , 2013). En general la información anterior es útil para determinar a través de la experimentación la respuesta de los cultivos al suministro de nutrientes y en ocasiones para ajustar los planes de fertilización (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006).

(Colwell, 1994) citado por (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006) sugiere aplicar como dosis de sostenimiento la cantidad de nutrientes removidos por una cosecha con el fin de mantener un nivel adecuado de los elementos en el suelo, Dicha dosis puede determinarse mediante el análisis de los elementos extraídos por la cosecha y varía de acuerdo a la región y a las prácticas del cultivo, sin embargo en Colombia se presentan diferentes regiones

para la producción de café (ecotopos) y dependiendo de las condiciones climática la planta fisiológicamente forma más hojas que en otras regiones, por ejemplo en el municipio de Marquetalia (Caldas), se presenta una condición de baja luminosidad (1.623 horas luz/año) y alta precipitación (3.923 mm.año<sup>-1</sup>), la planta de café invierte más cantidad de nutrientes en la formación de hojas que en la producción de frutos con el fin de incrementar la superficie foliar para capturar una mayor cantidad de energía lumínica. En contraposición a lo anterior, en municipios como Chinchiná (Caldas), caracterizados por una mayor luminosidad (1.797 horas luz/año) y menor precipitación (2.711 mm.año<sup>-1</sup>), la planta emplea una mayor cantidad de nutrientes para producir frutos que hojas.

Según Guerrero citado por (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006) solo una porción de los elementos extraídos del suelo por los cultivos es removida por la cosecha (por ejemplo: los granos de maíz o soya) y el resto vuelve al suelo en forma de raíces, tallos y hojas, entre otros a través del ciclaje de nutrientes. Las cantidades extraídas por la almendra, el pergamino y el mucílago son removidas del lote, mientras que en el caso de la pulpa pueden retornar al cultivo cuando se emplea como abono orgánico (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006).

Una fracción considerable de los nutrientes acumulados en el fruto proviene de las reservas contenidas en las hojas más próximas a los frutos, sin descartar los aportes del suelo y de la removilización de los nutrientes desde otras partes de la planta (Valarini, Bataglia, Fazuoli, 2005) citados por (Sadeghian Khalajabadi, Beatriz Mejía , & Hernán González , 2013).

Si la concentración de un elemento nutriente esencial en el tejido vegetal está por debajo del nivel necesario para un óptimo crecimiento la planta es deficiente en ese elemento, lo que genera

una alteración en la ruta metabólica en la que participa dicho elemento afectando otros procesos involucrados (Barrera, Cruz, & Melgarejo, 2010, pág. 81).

(International fertilizer industry association - IFA, 1992) citado por (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006) reportan las siguientes cantidades de micronutrientes extraídos por 1000 kg de café almendra

*Tabla 1. Cantidades de micronutrientes extraídos por 1000 kg de café almendra*

Parte del fruto	Micronutrientes					
	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
	Gramos					
Café almendra	61,2	20,2	12,2	13,6	16,3	0,05
Fruto entero	112	50	84	32	51	0,12

*Fuente (International fertilizer industry association - IFA, 1992) citado por (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006)*

(Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006) analizaron 424 muestras de café almendra provenientes de 14 departamentos de Colombia, 62 muestras de pergamino o cisco, cinco muestras de pulpa y 23 de mucilago, adicionalmente se analizó la composición elemental de café cereza en 10 muestras de la variedad Colombia.

Tabla 2. Cantidades totales de micronutrientes extraídos (g) por las partes que componen el fruto de café equivalentes a 1.000kg de café almendra (1250 kg de c.p.s.)

<b>Parte del Fruto</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>B</b>
Café almendra	33,06	37,61	7,38	12,26	10,05
Pulpa	28,97	16,38	4,43	16,25	34,97
Pergamino	7,53	4,01	1,29	1,81	1,32
Mucilago	37,73	3,36	4,66	2,70	3,45
Total	107,29	61,36	17,76	33,02	49,79

Fuente: (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006, pág. 5)

Referente a los elementos menores, la toma de estos nutrientes por los frutos presentó el siguiente orden: Fe>Mn>B>Cu>Zn. (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006, pág. 5); Sin embargo (Sadeghian Khalajabadi & Salamanca Jimenez, 2015) encontraron el siguiente orden Mn>Fe>B>Cu>Zn y otros autores como Catani et al., (1989) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) encontraron que el orden de acumulación de micronutrientes en café fue Fe > Mn > B > Zn > Cu > Mo.

La extracción de nutrientes por la almendra del café puede variar parcialmente en las diferentes regiones de la zona cafetera colombiana, por ejemplo las muestras provenientes de Cesar por sus bajas extracciones de N, P, Mg y Fe; mientras que en las muestras analizadas de Huila son bajas en Ca y B, pero muy altas en Mn, lo cual puede deberse a la fertilidad del suelo (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006).

Debido a que la producción de café en Colombia presenta variaciones entre sitios y años, la cantidad de elementos extraídos y removidos también varía de acuerdo con el volumen de café cosechado (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006).

*Tabla 3. Cantidades de nutrientes extraídos por 1.000 kg de café almendra por departamento*

Departamento	Fe	Mn	Zn	Cu	B
Antioquia	33,40	42,10	7,10	11,90	9,80
Caldas	37,70	42,40	8,70	14,10	14,80
Cauca	28,60	29,70	5,50	13,60	7,00
Cesar	19,10	25,40	6,40	10,00	10,90
Cundinamarca	30,50	20,50	6,50	10,50	10,10
Huila	25,20	107,70	7,10	11,30	6,10
Magdalena	23,10	19,80	6,00	5,60	9,60
Nariño	40,50	43,80	7,90	11,10	6,20
Norte de Santander	25,90	28,00	8,30	14,10	8,50
Quindío	30,70	32,60	6,30	10,90	9,40
Risaralda	31,50	29,90	6,80	12,70	7,50
Santander	34,10	27,50	6,20	8,80	7,70
Tolima	37,20	24,70	6,90	11,60	8,10
Valle	31,60	27,80	6,90	9,30	7,30
<i>Huila</i>	<i>25,20</i>	<i>107,70</i>	<i>7,10</i>	<i>11,30</i>	<i>6,10</i>

*Fuente: (Sadeghian Khalajabadi, Mejia Muñoz, & Arcila Pulgarin, 2006)*

La caída de las hojas durante el proceso de la maduración de la cosecha se debe principalmente a la gran movilización de los nutrientes hacia los frutos, fenómeno que reduce su concentración en el tejido foliar. Por esta razón en muchas ocasiones durante los años de alta producción ocurre una mayor caída de las hojas disminuyendo así la cosecha en el siguiente ciclo (Chaves, Sarruge, 1984) citado por (Sadeghian Khalajabadi, Beatriz Mejía , & Hernán González , 2013)

(Sadeghian Khalajabadi & Gonzalez Osorio, 2012) Dicen que pocas veces se detectan deficiencias de elementos menores durante la etapa de crecimiento vegetativo, especialmente en suelos con altos contenidos de materia orgánica (mayor al 12%). Debido a ello por ahora solo se recomienda aplicarlos de manera correctiva, empleando dosis muy bajas, siempre y cuando se tenga la certeza de que se trate de una deficiencia, sin embargo en otros países los planes de fertilización incluyen a los elementos menores.

Para las condiciones de Colombia es posible encontrar en una misma planta de café, flores y frutos en diferentes estado de desarrollo, así como estructuras vegetativas (ramas, nudos y hojas) que serán el soporte de la producción para el siguiente ciclo. Lo anterior depende en buena medida de la humedad del suelo y del ambiente, gobernada por el régimen de lluvia. Ante esta circunstancia los planes de la fertilización deben ser suficientes para satisfacer tanto la demanda de los frutos como las necesidades nutricionales de los órganos vegetativos (Sadeghian Khalajabadi, Beatriz Mejía , & Hernán González , 2013).

El Inicio de la etapa reproductiva es fundamental en los planes de fertilización ya que lo extraído para el llenado de los frutos no retorna al suelo; según (Gonzalez Osorio, Sadeghian Khalajabadi, & Jaramillo Robledo, 2014) la acumulación relativa durante los primeros 60 a 90 días después de la floración representa sólo el 13%; posteriormente hasta los 180 días, en promedio en el fruto se

acumula el 62% de los elementos; y en los últimos 2 meses previos a la madurez de cosecha, en el fruto se acumula el 25%.

En Colombia para (Sadeghian Khalajabadi, 2008, pág. 25) el Boro es el único nutriente que eventualmente las plantaciones tecnificas responden positivamente en la etapa reproductiva, pero en países como Brasil y Costa Rica se ha profundizado en la nutrición del café respecto a los requerimientos de los elementos menores.

Según Cannell, 1985 citado por (Sadeghian Khalajabadi & Salamanca Jimenez, 2015) y (Sadeghian Khalajabadi, Beatriz Mejía , & Hernán González , 2013) el crecimiento del fruto del café comprende los siguientes estadios:

1. Cabeza de alfiler (“garrapata” o “puntilla”)
2. Expansión rápida
3. Formación del endospermo (crecimiento suspendido)
4. Acumulación de materia seca (llenado)
5. Maduración

En otros países productores de café, autores como (Laviola, y otros, 2007) han definido cinco estadios de formación de los frutos de café, los cuales son:

1. Pluma
2. Expansión rápida
3. Crecimiento suspendido
4. Granación
5. Maduración

Pluma o Garrapata: los frutos presentaron baja tasa de crecimiento y no se observa efecto en la acumulación de micronutrientes en los frutos de café (Laviola, y otros, 2007).

En este estadio los autores observaron que la proporción de acumulación tanto de B como de Zn, en los frutos fue mayor en comparación con la de acumulación de los otros micronutrientes, es probable que la mayor acumulación de B y Zn en el estadio de pluma o garrapata esté relacionado con la gran importancia de estos nutrientes en los procesos de división celular y en la estabilización de membranas de las nuevas células formadas (Marschner, 1995, Marengo & Lopes, 2005) citados por (Laviola, y otros, 2007).

En general el aumento de la acumulación de micronutrientes tiende a comenzar antes del inicio de la fase de expansión rápida, esto indica que las demandas metabólicas por micronutrientes en los frutos se inician en ese tiempo, en el que se observan incrementos significativos de materia seca en los frutos (Cannel, 1971; Coombe, 1976) citado por (Laviola, y otros, 2007).

Expansión rápida: este estadio se caracteriza por el rápido estiramiento de las células de los frutos, alcanzando cerca del 80% de su tamaño final. La acumulación de materia seca en el estadio de la rápida expansión se relaciona sobre todo a la expansión celular, con la deposición del material de la pared, siendo esencial para el flujo de agua a la fruta en el proceso de elongación celular. Es probable que la acumulación de nutrientes en los frutos en el estadio de expansión rápida ocurra por flujo de masa resultante de las altas tasas de translocación de agua para los frutos en este estadio, tan necesaria para la expansión celular (Laviola *et al.*, 2007) citados por (Laviola, y otros, 2007)

Crecimiento suspendido: se caracteriza por desaceleración en el crecimiento de los frutos de café presentando bajas tasas de acumulación de materia seca (Rena *et al.*, 2001) citados por (Laviola,

y otros, 2007). Sin embargo en el estudio realizado por (Laviola, y otros, 2007), en general la acumulación de micronutrientes se mantuvo constante en esta fase de crecimiento suspendido. En este estadio, se cree que está habiendo reciclaje y síntesis de enzimas y compuestos intermediarios (Taiz & Zeiger, 2004) citados por (Laviola, y otros, 2007), antes empleados en la síntesis de polímeros de pared para ser utilizados como precursores en la síntesis de compuestos de reservas en el estadio de granación o llenado. Por el hecho de que los micronutrientes tienen papeles importantes en la activación de enzimas (Marschner, 1995) citado por (Laviola, y otros, 2007), es posible que la acumulación continua de ellos en el estadio de crecimiento suspendido haya ocurrido en función del aumento de la demanda metabólica de esos elementos.

Granación o llenado: también llamado relleno del endospermo, la materia seca se deposita sobre todo en las semillas (Laviola *et al.*, 2007) citados por (Laviola, y otros, 2007). La acumulación de nutrientes se estabilizó antes del final del estadio de granación o llenado, es decir primero se acumulan los nutrientes para luego completar los procesos finales de formación de las semillas.

Maduración: se caracteriza principalmente por el aumento en contenido de azúcar y los cambios en la coloración de la cáscara del fruto (Puschmann, 1975; Rena *et al.*, 2001) citados por (Laviola, y otros, 2007).

(Ramirez , Bertsch, & Mora, 2002) Realizaron la curva de absorción o acumulación de nutrientes para los frutos, encontrando:

Día 30: tamaño 1 o “cabeza de alfiler” en este momento solo el Ca y el Mn se han consumido en más de un 5%

Día 60: Tamaño 1, 2, 3 o un máximo de 6mm de diámetro, para este momento más de un 20% del total que va ser consumido de Ca y Mn ha ingresado al fruto, el autor recomienda apoyar la planta suministrando los elementos al día 45 después de la floración.

Día 90: paralelo a una fuerte acumulación de agua por parte del fruto, un importante aumento en el tamaño (80% de las dimensiones máximas) y a la fuerte absorción de Ca y Mn, se produce un fuerte consumo de Zn, correspondiente al 45% del total. El B, Cu, presentan el mismo comportamiento. Más del 40% del total de esos elementos se va a consumir antes del tercer mes.

Día 120: El B, Zn, Cu y Fe presentan altos porcentajes de absorción, en esta época se tiene un tamaño de frutos 6 y 7 que ofrecen diámetros mayores a 1 cm.

Después del día 120 hasta el día 210: no hay cambios abruptos en el consumo de micronutrientes, las exigencias de nutrientes varían entre 7 y 9% por mes, para esta época tres micronutrientes Zn, Fe, Cu completan todas sus necesidades antes de empezar la maduración.

Día 240: el B y Mn son importantes para la maduración

*Tabla 4. Programa de fertilización foliar*

Fecha de aplicación			Nutrimentos a aplicar	
Días	Semanas	Meses	Prioritarios	Secundarios
40-45	6	1.5	Ca	
60-75	11	2.5	Ca, Zn, B	
100-110	15	3.5	Zn, B	Cu, Fe
200-210	28	6.5		B

*Fuente: (Ramirez, Bertsch, & Mora, 2002)*

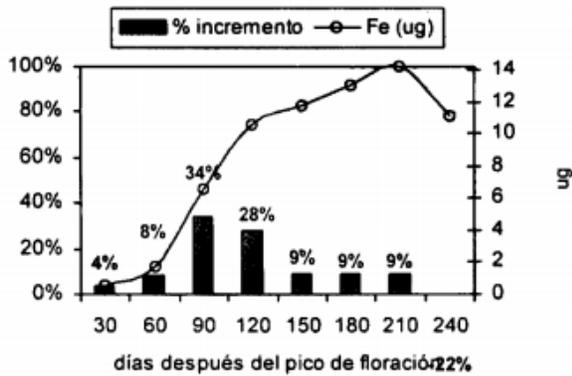


Figura 15. Absorción de Fe en el desarrollo del fruto de café, fuente: (Ramirez, Bertsch, & Mora, 2002)

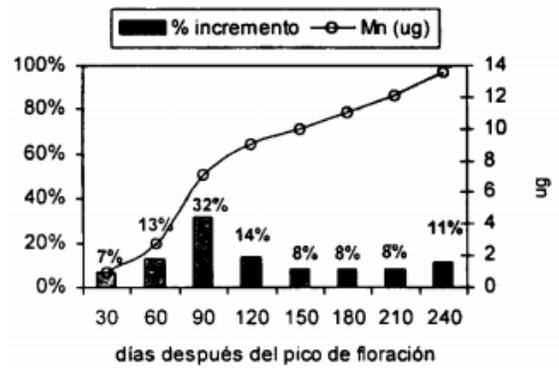


Figura 14. Absorción de Mn en el desarrollo del fruto de café, fuente (Ramirez, Bertsch, & Mora, 2002)

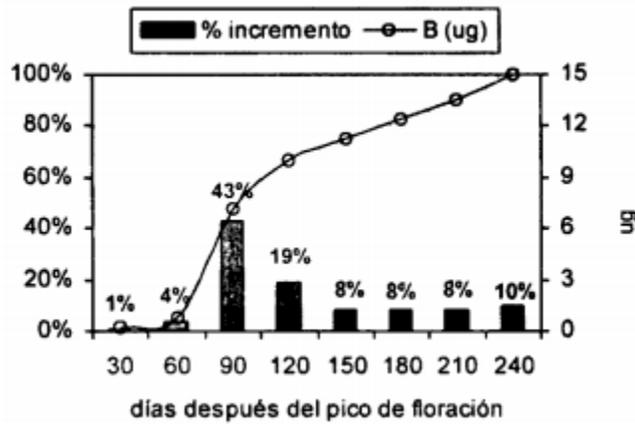


Figura 17. Absorción de B en el desarrollo del fruto de café, fuente (Ramirez, Bertsch, & Mora, 2002)

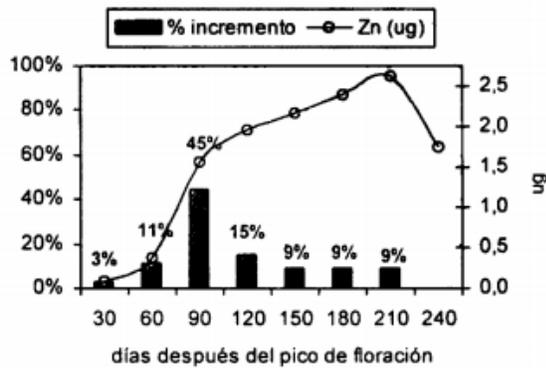


Figura 13. Absorción de Zn en el desarrollo del fruto de café, fuente (Ramirez, Bertsch, & Mora, 2002)

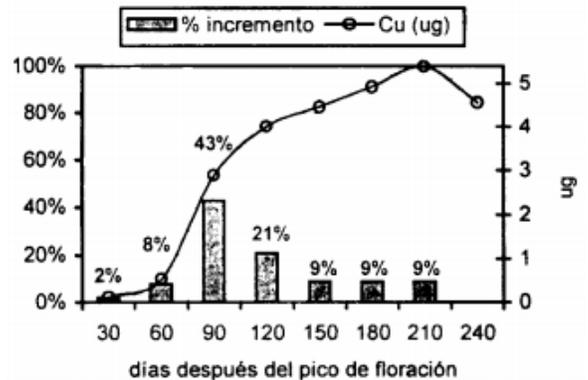


Figura 16. Absorción de Cu en el desarrollo del fruto de café, Fuente: (Ramirez, Bertsch, & Mora, 2002)

El suministro de micronutrientes al café ya sea vía suelo o vía foliar debe iniciarse antes de la fase de expansión rápida del fruto (Guimarães *et al.*, 1999; Rena & Favaro, 2000) citados por (Laviola, y otros, 2007). En las condiciones experimentales el suministro de B, Cu y Zn debería ocurrir antes de los 34 días después de la antesis (DDA). Si la aplicación de micronutrientes es a través del suelo ésta debe efectuarse después de la floración, por el hecho de las fuentes que los micronutrientes presentan, tienen en general baja tasa de liberación (Laviola, y otros, 2007).

Estos autores sugieren realizar tres fertilizaciones foliares siendo la primera realizada a los 30 DDA, independientemente de la ubicación del cultivo; la segunda y la tercera deben ocurrir con intervalos de 30-35 días o 40-45 días dependiendo del tiempo maduración del fruto de café.

Entre los tres principales micronutrientes, el Zn es el único que no puede ser suministrado eficientemente vía suelo debido a su gran facilidad en ser adsorbido por los coloides (Rena Favaro, 2000) citado por (Laviola, y otros, 2007). Se estima que la fracción de arcilla retiene más del 60% del Zn distribuido en el suelo (Kabata-Pendias y Krakowiak, 1995) citado por (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011) además según (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011) el transporte del Zn de las raíces a las hojas es lento y las ramas son los órganos de almacenamiento.

El níquel según (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011) puede afectar la maduración del fruto de café ya que en su investigación las plantas que recibieron este metal tuvieron un mayor porcentaje de frutos inmaduros, se ha informado que el Ni inhibe la biosíntesis de etileno en las frutas (Zheng *et al.*, 2006) citados por (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011) debido a la sustitución de  $Fe^2$  en la ACC oxidasa y la formación de un complejo enzima-metal inactivo (McGarvey y

Christoffersen, 1992) citado por (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011).

El número de días entre la antesis y la maduración de los frutos de café *canephora* varía según el genotipo, por lo tanto se cree que los períodos de mayor demanda de nutrientes para la formación de frutos también varían según el genotipo, lo que influye directamente en el manejo de los fertilizantes (Braidá Marré, y otros, 2014). La variación atribuida al ciclo de maduración del fruto está relacionada con las condiciones climáticas para el cultivo y / o el genotipo del café utilizado (Pezzopane *et al.*, 2003; Petek *et al.*, 2009) citados por (Braidá Marré, y otros, 2014). (Braidá Marré, y otros, 2014) Encontraron diferentes curvas de absorción de Fe, Cu, Mn, Zn, B en café *canephora*, este hecho sugiere que los genotipos tienen diferentes necesidades y que requieren una nutrición diferente. Los comportamientos exhibidos por los genotipos son similares a los resultados encontrados para las plantas de café arábica (*Coffea arabica* L.) cultivadas a diferentes altitudes (Laviola *et al.*, 2007) citado por (Braidá Marré, y otros, 2014), es decir, las principales especies comerciales del género *Coffea* muestran un comportamiento similar.

Para algunos genotipos las altas tasas de acumulación de Fe, Cu y Mn comenzaron al día 76 después de la antesis, estos resultados son similares a los encontrados por (Ramírez *et al.*, 2002) citado por (Braidá Marré, y otros, 2014) para *C. arabica* variedad caturra en donde encontraron los porcentajes más altos de acumulación de estos nutrientes entre los 90 y 120 días después de la antesis (Braidá Marré, y otros, 2014). Este período coincide con la fase de expansión rápida del fruto (Laviola *et al.*, 2008) citado por (Braidá Marré, y otros, 2014), un período que requiere más flujo de agua al fruto. El fruto, por lo tanto recibe mayor cantidad de Fe, Cu y Mn, que participan como activadores de la enzima en varios procesos metabólicos.

Respecto a la acumulación de Zn (Braidá Marré, y otros, 2014) observaron un aumento significativo hasta el día 134 después de la antesis, después del cual la concentración de Zn en los frutos se estabilizó hasta el final del ciclo de 266 días. Corroborando estos resultados, el café 'Caturra' arábica cultivado en Costa Rica acumuló todo su Zn a los 210 días después de la antesis, es decir no hubo aumento durante los últimos 30 días de la formación del fruto, concretamente del día 210 al día 240 (Ramírez *et al.*, 2002) citado por (Braidá Marré, y otros, 2014). Por lo tanto se cree que una mayor acumulación de Zn en la fase inicial / intermedia de la formación del fruto está relacionada con la fase de expansión rápida en la que hay un alargamiento celular intenso, un evento que depende de la auxina (Taiz y Zeiger, 2010) citado por (Braidá Marré, y otros, 2014).

Algunos relatos confirman la importancia del Zn en la producción de granos (Silva, 1979; Fávoro, 1992). Mello *et al.* (1999) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) verificaron que el café respondió a las aplicaciones de dosis crecientes de sulfato de zinc, por vía foliar en la producción y que el aumento de las dosis de Zn proporcionó mayor porcentaje de granos clasificados en las mayores criba (mallas). Los granos de café retenidos en mallas con mallas de mayor diámetro asociados a otros aspectos de buena calidad, generalmente presentan mayor valor en el mercado. La separación por el tamaño de los granos, por medio de la clasificación por mallas, proporciona mejor calidad del producto final, resultando más uniformidad en el tostado (Nasser & Chalfoun, 2000). Neves *et al.*, (2011) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) observaron que el suministro de Zn influyó positivamente la producción y calidad de los granos de café, caracterizado por el tamaño del grano, porcentaje de granos brocados, conductividad eléctrica y el potasio lixiviado de los granos.

(Woods Pedrosa, y otros, 2013) Encontraron que el Zn es un elemento de baja movilidad en el floema, por otra parte las variedades estudiadas se comportaron de forma diferente en la absorción de Zinc, encontrando que algunas plantas absorbieron más Zn que otras, lo cual puede estar relacionado con la demanda del nutriente a nivel celular, la afinidad del sistema de absorción, la compartimentación en raíces u otros órganos de la planta, la movilidad en vasos de xilema y floema y cambios en la rizosfera durante el crecimiento (Marschner, 1995) citado por (Woods Pedrosa, y otros, 2013).

Por otra parte el cobre beneficia las plantas por medio de su efecto como micronutriente, como fungistático y como tónico. Este micronutriente es esencial para las plantas por ser componente de muchas enzimas y proteínas y por estar involucrado en innumerables rutas metabólicas. Varias enzimas que contienen o son activadas por el Cu catalizan reacciones de óxido-reducción (Marschner, 2012) citado por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). Además el Cu puede ejercer efectos directos o indirectos sobre hongos, como efecto directo la influencia de este micronutriente está relacionada con su capacidad fungistática, desnaturalizando las proteínas del patógeno. Indirectamente su participación es importante en la síntesis de lignina, que actúa como barrera a la penetración de microorganismos (Pasin *et al.*, 2002) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). De esta forma el uso del cobre mejora el desarrollo y la productividad de los cafetales y beneficia además la calidad de los granos de café.

Las deficiencias de B, Cu y Zn se observan frecuentemente en los cultivos de café (Farnezi; Silva; Guimarães, 2009; Lana *et al.*, 2010; Martínez *et al.*, 2004) citados por (Poltronieri, Prieto Martínez, Clemente, & Ferreira, 2016). La corrección de estas es hecha por medio de fertilizantes suministrados vía suelo o vía aspersión foliar, Sin embargo el Zn y el Cu aplicados

en suelos arcillosos pueden quedar fuertemente adsorbidos en la fracción coloidal o en la materia orgánica del suelo, dificultando la absorción por la planta (Lopes *et al.*, 2014; Martínez; Motto, 2000; Oliveira *et al.*, 2010) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016). Por otro lado debido a la baja movilidad del B, Cu y Zn en el floema hay comprometimiento de la eficacia de las fertilizaciones foliares, dado que hojas crecidas después de las fertilizaciones pueden presentar síntomas de deficiencia (Mantovani; Calonego; Foloni, 2013; Sartori *et al.*, 2008) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016). Por lo tanto son necesarias como mínimo tres aplicaciones al año (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

### **3. Programa De Fertilizacion En Café Con Elementos Menores Diseñado Para Brasil:**

(Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993) Recomiendan tomar muestras foliares para su análisis y de esta forma realizar una correcta nutrición del cafetal, porque la composición de las hojas es modificada por la deficiencia o la toxicidad antes de que el síntoma aparezca, el análisis foliar proporciona un diagnostico precoz y el análisis de suelo da una indicación temprana de las deficiencias o excesos que puedan ocurrir permitiendo un tratamiento preventivo, estos autores recomiendan interpretar los contenidos foliares con la siguiente tabla:

Tabla 5. Interpretación de los contenidos foliares

Interpretación de los contenidos foliares*			
Elemento	Deficiente	Adecuado	Excesivo
Ppm			
Boro (B)	<20	59-80	>90
Cobre (Cu)	<5	8-16	>25
Hierro (Fe)	<50	150-300	>400
Manganeso (Mn)	<40	120-210	>300
Molibdeno (Mo)	<0.1	0.15-0.2	>0.3
Zinc (Zn)	<4	8-16	>30

\*3° y 4° pares de hojas de ramas productivas muestreadas en el verano (febrero / marzo).

Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

Tabla 6. Relación entre los nutrientes foliares considerados adecuados

Relación entre los nutrientes foliares considerados adecuados*			
Relación	Rango	Relación	Rango
N/B	400-457	Ca/Mn	66-75
N/Cu	2000-3375	B/Zn	5.0-7.3
P/Cu	125-187	Cu/Zn	1
P/Zn	125-187	Mn/Fe	0.73-0.85

3° y 4° pares de hojas de ramas productivas, muestreados en el verano (febrero / marzo).

Valores calculados

Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

En cuanto a la fertilización edáfica (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993) recomiendan:

*Tabla 7. Fertilización edáfica*

Fertilización correctiva			
Elemento	Nivel	Rango	dosis
			Kg/ha
Boro	Bajo	< 0,3	3
	Medio	0.3-0.6	2
	Adecuado	0.7-1	1
		>1	0
Cobre	Bajo	<0.5	3
	Medio	0.5-1	2
		>1.5	0
Manganeso	Bajo	<5	15
	Medio	5-10	10
	Adecuado	10-15	5
		<2	6
Zinc	Bajo	<2	6
	Medio	2-4	4
	Adecuado	5-6	2
		>6	0

*Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*

(Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993) Diseñaron un programa de fertilización que varía dependiendo de la cantidad de sacos que se desean producir, las cantidades están diseñadas por módulos, cada módulo es para producir 10 sacos de café, a continuación se explican los módulos:

*Tabla 8. Módulos de fertilización*

PRODUCCION	MODULO
0 a 20 sacos	2
Menos de 60 sacos	4
Entre 60 y 80 sacos	6
Más de 80 sacos	8

*Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*

Las dosis modulares varían con la densidad de siembra, es decir cuanto mayor sea el número de hoyos por hectárea disminuir la dosis de los elementos necesarios para 10 sacos, se pueden realizar de 3 a 4 abonadas en donde dos son variables en función al análisis foliar y de la reevaluación de la cosecha, para los elementos menores es una fija y la otra variable (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993), como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 9. Módulo para elementos menores

Módulo para B, Cu, Fe, Mn Mo y Zn.		
Características	Ago/sep Fija	Dic/ene variable
<b>Kg/ha</b>		
<b>B mg/dm<sup>3</sup></b>		
<0.4	0.4	0.4
0.4-0.8	0.25	0.25
>8	0	0
<b>Cu mg/dm<sup>3</sup></b>		
<1	0.75	0.75
1-2	0.5	0.5
>2	0	0
<b>Fe mg/dm<sup>3</sup></b>		
<20	2	2
21-40	1.5	1.5
>40	0	0
<b>Mn mg/dm<sup>3</sup></b>		
<10	2	2
10-15	1	1
>15	0	0
<b>Mo mg/dm<sup>3</sup></b>		
<0.05	0.04	0.04
0.05-0.15	0.02	0.02

>0.15	0	0
<b>Zn mg/dm<sup>3</sup></b>		
<2	0.75	0.75
2-4	0.5	0.5
>4	0	0

B en HCl 0,05 N o Mehlich 1. Cu, Fe, Mn, Zn en Mehlich 1. Mo en oxalato.

*Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*

*Tabla 10. Dosis maxima por módulo*

Dosis máxima por módulo, dependiendo de la densidad de plantación.			
Elemento	≤5000	5000 a 10000	>10000
Kg/modulo			
B	1	0.8	0.7
Cu	2	1.5	1
Fe	5	4	3
Mn	5	4	2
Mo	0.1	0.08	0.07
Zn	2	1.5	1

*Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*

En la siguiente tabla se encuentran las recomendaciones para ajustar la dosis de acuerdo con el análisis foliar después de la segunda fertilización.

Tabla 11. Ajuste en la dosis de acuerdo con el análisis foliar

Ajustes en las dosis de acuerdo con el análisis de las hojas después del segundo parcelamiento (Nov./Jan.).		
Elemento	Contenido Foliar	Ajuste
Mg/kg		
B	<50	2-3 aplicaciones foliares
Cu	<10	2-3 aplicaciones foliares
Fe	<75	2-3 aplicaciones foliares
Mn	<100	2-3 aplicaciones foliares
Mo	<0.5	2-3 aplicaciones foliares
Zn*	<10	2-3 aplicaciones foliares
	<20	2-3 aplicaciones foliares

\*Años de alta y baja, respectivamente.

Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)

Tabla 12. Fuentes de micronutrientes para ser aplicados vía foliar

Micronutrientes vía foliar	
Elemento	Producto y concentración (%)
B	Ácido Bórico 0.3
Cu	Sulfato 0.3
Fe	Sulfato 0.5
Mn	Sulfato 1.0
Mo	Molibdato 0.01

Zn	Sulfato 0.6
B + Zn	Ácido Bórico 0.3 + Sulfato de zinc 0.6 + Cloruro de potasio 0.25
Mn + Zn	Sulfato de manganeso 0.6 + Sulfato de zinc 0.6 + Cloruro de potasio 0.25
B + Cu + Zn	Ácido bórico 0.3 + Sulfato de cobre 0.3 + Sulfato de zinc 0.6 + cloruro de potasio 0.25
B + Cu + Mn + Zn	Ácido bórico 0.3 + Sulfato de cobre 0.3 + Sulfato de manganeso 0.6 + sulfato de zinc 0.6 + cloruro de potasio 0.25

Los sulfatos pueden ser sustituidos por cloruros, nitratos, quelados, generalmente en menor concentración y sin adición de KCl. Aplicaciones de alto volumen, en general dos a tres veces, en el período de Set./Out. a Mar./Abr.

*Fuente: (Malavolta, Rocha Fernandez, Casale, & Peres Romero, 1993)*

*Tabla 13. Resumen de estándares de micronutrientes*

### Estándares de Micronutrientes foliares – Varias fuentes

Hojas de la 3ª a 4ª pareja en ramas de activo crecimiento o en producción

	Materia seca (ppm)					
	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Cenicafe – 2002	40 – 60	16 – 20	90 – 140	150 – 220	Na	15 – 30
Malavolta – 1993	59 – 80	8 – 16	150 – 300	120 – 210	0.15 – 0.2	8 – 16
Matiello et al – 2005	40 – 80	10 – 50	70 – 200	50 – 200	Na	10 – 20
Plant Analysis Manual – 1991	40 – 75	10 – 25	70 – 125	50 – 200	0.1 – 0.5	12 – 30
Reuter & Robinson – 1997	40 – 100	16 – 20	70 – 200	50 – 100	Na	15 – 30
Wilson – 1999 – Arabica	40 – 90	7 – 20	70 – 200	50 – 100	0.8	15 – 30
Wilson – 1999 – Robusta	35 - 90	20 - 40	70 - 200	30 - 70	0.5	15 - 30

*Fuente: (Yara, sf)*

(Yara, sf) Proporciona un cuadro resumen de siete publicaciones sobre estándares de micronutrientes foliares y los resume en la siguiente tabla.

#### 4. Interacción Zinc Y Fosforo

La deficiencia de zinc puede afectar la productividad de los cultivos al interferir con el crecimiento y desarrollo de las plantas (Epstein; Bloom, 2006) citados por (Woods Pedrosa, y otros, 2013).

(Braida Marré, y otros, 2014) Sugieren que debe investigarse con más detalle la fertilización con zinc debido al antagonismo entre el P y Zn (Dechen y Nachtigall , 2006) citado por (Braida Marré, y otros, 2014).

(Anjos Reis & Martinez, 2002) Reportan que Los problemas en la nutrición con el zinc se han observado como resultado del aumento de la fertilización fosfatada, haciendo que la interacción Zn x P sea objeto de varios estudios (Bingham, 1963; Igue & Bornesmiza, 1967; Olsen, 1972; Pasricha *et al.*, 1987; Souza & Ferreira, 1991) citados por (Anjos Reis & Martinez, 2002). Altas dosis de fósforo parecen disminuir la concentración de zinc en la parte aérea, además de que aplicaciones de zinc afectan la concentración de fósforo en los tejidos foliares (Marques, 1990) citado por (Anjos Reis & Martinez, 2002). Los mecanismos que regulan la interacción entre Zn y P son todavía controvertidos. Bingham (1963) citado por (Anjos Reis & Martinez, 2002) concluye que la interacción entre el zinc y el fósforo era un problema de suelo y no está conectada a la fisiología de las plantas, Sin embargo Igue & Bornemisza (1967) citados por (Anjos Reis & Martinez, 2002) concluyeron que el antagonismo ocurría en la raíz; Olsen (1972) citado por (Anjos Reis & Martinez, 2002) por su parte destacó como posibles mecanismos para explicar las relaciones antagónicas: interacción P x Zn en el suelo, reducción de la tasa de translocación de Zn de las raíces a la parte aérea simple efecto de dilución sobre la concentración de zinc en la parte aérea debido al crecimiento en respuesta al fósforo y desórdenes metabólicos

en las células vegetales relacionadas con el desequilibrio entre zinc y fósforo interfiriendo en la función metabólica del zinc en ciertos sitios celulares.

Los cambios en la morfología y la eficiencia nutricional de la planta sobre la interacción entre el zinc y el fósforo pueden contribuir al aumento de capacidad de producción de materia seca con los nutrientes disponibles y por lo tanto aumentar la producción (Anjos Reis & Martinez, 2002).

Para (Anjos Reis & Martinez, 2002) las dosis de zinc influyen la producción de materia seca en la planta, con una dosis de  $2,3 \mu\text{mol L}^{-1}$  en la solución nutritiva, los autores evidenciaron una mayor exigencia de Zn por parte de la variedad Catuaí, pero respecto a la interacción con P en su investigación encontraron:

- Las diferentes concentraciones de Zn de la solución nutritiva no afectaron la eficiencia de absorción de fósforo.
- Las concentraciones de Zn empleadas no afectaron la eficiencia de translocación de P de los cultivares en estudio
- en el trabajo no se encontró interacción entre Zn y P en plantas cultivadas en solución nutritiva, sugiriendo nuevos estudios con mayores dosis de Zn en solución nutritiva, para averiguar, si esta interacción ocurre solamente en el suelo, en la planta o en ambas.

(Anjos Reis & Martinez, 2002).

Sin embargo (Tezotto, Laércio Favarin, Antunes Azevedo, Ferracciú Alleoni, & Mazzafera, 2011) cuando adicionaron 600 g de Zn por planta observaron que los niveles de P disminuyeron en aproximadamente un 50% en los 20 cm superiores probablemente por desplazamiento a capas de suelo más profundas.

## 5. Movilidad De Los Elementos Menores

Algunos nutrientes se movilizan dentro de la planta desde la raíz hasta la zona en crecimiento. La movilidad puede ser alta, media o baja, y dependerá del tipo de planta y del estado fenológico en que se encuentre. Para condiciones óptimas los elementos móviles y no móviles son:

Tabla 14. Movilidad de elementos menores en el suelo

MOVILES	NO MOVILES
Cloro	Hierro
Molibdeno	Cobre
Zinc	Boro

Fuente: (Marschner 1995), Citado por (Barrera, Cruz, & Melgarejo, 2010, pág. 83)

La movilidad de los nutrientes en el suelo es importante porque permite planificar su disponibilidad para las plantas, este conocimiento influye en las decisiones de fertilización como

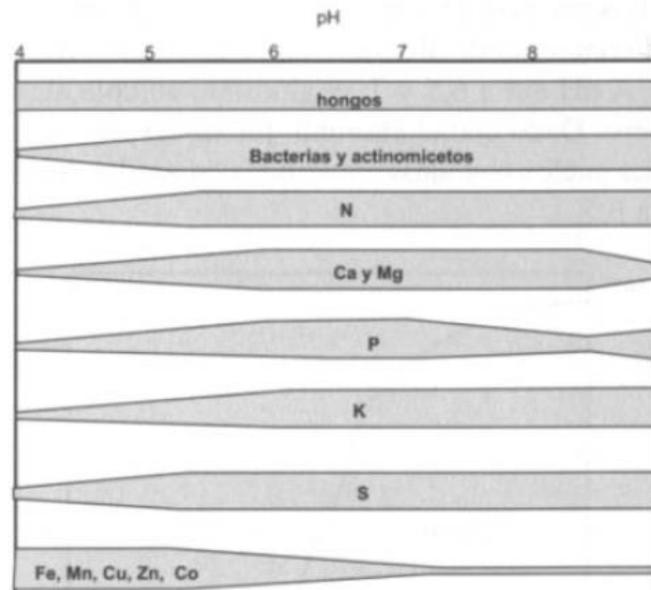


Figura 18. Relación entre el pH del suelo y la actividad de microorganismos y disponibilidad de nutrientes para las plantas, fuente: (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006)

dosis, frecuencia y tipo de fertilizante, así como del método de aplicación correcto. La movilidad de los nutrientes en el suelo en su forma iónica depende de su carga, y del pH, la temperatura y la humedad del suelo (Jones y Jacobsen 2001) citados por (Barrera, Cruz, & Melgarejo, 2010, pág. 83).

## **6. Aporte De Elementos Menores Por El Sombrío**

La presencia de una mayor capa de hojarasca en cafetales con sombrío de guamo trae consigo una serie de beneficios entre los que se encuentran: el mantillo que proporciona una mayor cantidad de nutrientes para las plantas, producto de la mineralización (descomposición) del material vegetal Suárez, Rodríguez, 1962 citados por (Cardona Calle & Sadeghian Kh., 2005) (Garcia Lopez, 2008)

la presencia de un estrato arbóreo superior aumenta la cantidad de nutrimentos que ingresan al sistema en el agua de lavado foliar, fundamentalmente potasio, con valores de 120 kg/ha/año en cafetales bajo guamo frente a 70 kg/ha/año en cafetales a plena exposición solar, Jaramillo R., A;2003 citado por (Cardona Calle & Sadeghian Kh., 2005)

(Cardona Calle & Sadeghian Kh., 2005) Encontraron que la hojarasca de los árboles de sombrío de guamo y café y café sin sombrío aporta al suelo elementos menores como el Hierro, Manganeso y zinc; las cantidades obtenidas variaron y se observan en la tabla No 15.

Tabla 15. Aporte de elementos menores del sombrío de guamo y café

Nutrimento	Chichina Caldas		El Cairo (Valle)	
	Cafetal bajo sombra (Kg/ha)	Cafetal a libre exposición (Kg/ha)	Cafetal bajo sombra (Kg/ha)	Cafetal a libre exposición (Kg/ha)
Hierro	1.27	1.18	1.24	0.71
Manganeso	0.99	0.94	2.34	1.16
Zinc	0.21	0.04	0.19	0.07

Fuente: (Cardona Calle & Sadeghian Kh., 2005)

## 7. La Materia Organica Y Los Micronutrientes

La materia orgánica del suelo sostiene a la comunidad microbiana, que promueve el proceso de mineralización (Lavelle, 1997) citado (Lopes do Carmo, Carvalho Nannetti, Machado Lacerda, Nogueira Nannetti, & Espírito Santo, 2012). Los micronutrientes metálicos como Mn, Cu, Fe y Zn se encuentran complejos a las estructuras orgánicas que son solubles y desempeñan un papel fundamental en la movilidad de estos elementos en el suelo (Zech *et al.* 1997) citados por (Lopes do Carmo, Carvalho Nannetti, Machado Lacerda, Nogueira Nannetti, & Espírito Santo, 2012). Una vez los nutrientes incorporados en los tejidos de los organismos de la comunidad del suelo esos no pueden ser fácilmente perdidos por la lixiviación o reacción con hierro y aluminio.

Entre los beneficios pertinentes al ciclaje de nutrientes y el sostenimiento de materia orgánica (Young, 1989) citado por (Lopes do Carmo, Carvalho Nannetti, Machado Lacerda, Nogueira Nannetti, & Espírito Santo, 2012) esta: el bombeo de nutrientes del subsuelo por las raíces profundas de las especies perennes, la reducción en las pérdidas por lixiviación a través de la

captura de nutrientes móviles por los sistemas radiculares bien desarrollados de las especies perennes y el aumento de la protección del suelo contra la erosión.

Pavan *et al.*, (1997) citado por (Lopes do Carmo, Carvalho Nannetti, Machado Lacerda, Nogueira Nannetti, & Espírito Santo, 2012) observaron que en el café la acumulación de materia orgánica del suelo denso reduce las pérdidas de aniones orgánicos y promueve el mayor consumo de H.

De acuerdo con Marzadori *et al.* (1991) citado por (Lopes do Carmo, Carvalho Nannetti, Machado Lacerda, Nogueira Nannetti, & Espírito Santo, 2012), la materia orgánica desempeña un importante papel en la disponibilidad de B por minimizar la lixiviación de ese elemento y mantenerlo en la forma relativamente disponible.

En el estudio realizado por (Lopes do Carmo, Carvalho Nannetti, Machado Lacerda, Nogueira Nannetti, & Espírito Santo, 2012) se encontró que después del proceso de descomposición son liberados micronutrientes al suelo y posteriormente la absorción por las plantas, lo que indica eficiencia en ciclo de nutrientes y por ende la sostenibilidad del sistema agroforestal. Los resultados del estudio mostraron que el manejo bajo sistema agroforestal cultivado con café proporcionó, en general contenidos adecuados de micronutrientes en el suelo y en tejido foliar, capaces de sostener los cafetos en producción, con excepción del zinc en hoja que se presentó bajo, debiendo ser suplementado con fertilización foliar conteniendo ese elemento.

## **8. Agricultura De Precisión**

(Cirilo Carvalho, Moreira da Silva, Araújo e Silva Ferraz, Castro Figueiredo, & Barreto Cunha, 2017) Analizaron el manejo nutricional de un cultivo de café con agricultura de precisión y

manejo convencional encontrando que la agricultura de precisión permitió conocer a más detalle la variación en los contenidos de micronutrientes, en donde con un manejo convencional puede estar excediendo los contenidos adecuados para el cultivo lo que puede conllevar a una toxicidad.

## **9. La Injertacion Y La Absorcion De Elementos Menores**

La injertación de café en Colombia no se ha aplicado sin embargo en Brasil se ha llevado a cabo investigaciones en donde se cree que, además de conferir resistencia a los fitonematoides la utilización del porta-injerto en la caficultura puede mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes (Favarin *et al.*, 2007) citado por (Dominghetti Ferreira, y otros, 2013), dando mayor adaptabilidad a las condiciones adversas de suelo y áreas con precipitación pluviométrica por un sistema radicular más desarrollado y eficiente, aumentando con ello el potencial productivo de la planta injertada.

Según (Dominghetti Ferreira, y otros, 2013) La técnica de injertación no perjudica la translocación de nutrientes. Para Marschner (1995) citado por (Dominghetti Ferreira, y otros, 2013) las diferencias genotípicas en la eficiencia nutricional pueden estar relacionadas con la demanda celular de nutrientes, compartimentalización, utilización en la parte aérea, en el transporte a corta y larga distancia, en la afinidad del sistema de absorción concentración mínima y modificaciones en la rizosfera.

(Dominghetti Ferreira, y otros, 2013) Observaron en las interacciones, que para los micronutrientes boro, hierro y manganeso, las plantas injertadas presentaron una eficiencia de uso igual o superior a la de las no injertadas.

## 10. Elementos Menores Y Calidad De La Bebida

### 10.1 Boro.

En la deficiencia de B, ocurre la acumulación de fenoles, lo que se relaciona con el papel del boro en la formación de complejos cis-diol con ciertos azúcares y fenoles (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). En estas condiciones el flujo de sustrato se cambia de puesto al ciclo pentosa fosfato, lo que aumenta la biosíntesis de fenoles. En respuesta a la acumulación de fenoles la actividad de la polifenoloxidasas (PPO) aumenta en tejidos deficientes en B (Lewis, 1980; Loomis & Durst, 1991; Marschner, 2012) citados por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014), lo que junto con el exceso de fenoles provoca la destrucción de la membrana celular y consecuentemente, la muerte del tejido vegetal (Marschner, 2012) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). La polifenoloxidasas es una enzima que según varios autores se muestra directamente relacionada con la calidad de la bebida del café (Amorim & Silva, 1968; Amorim, 1978; Carvalho *et al.*, 1994; Leite, 1991; Pereira, 1997) citados por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). Estos autores verificaron que ocurre un aumento significativo de la actividad de la polifenoloxidasas a medida que el café se presenta con mejor calidad y que las variaciones de la actividad enzimática de la polifenoloxidasas permiten separar las clases de bebida.

Clemente (2014) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) estudió el efecto de B en la producción de compuestos bioactivos en granos de café crudos, en el experimento llevado a cabo en un cultivo de *C. arabica*, CV rojo

Catuái IAC 99 se observó un efecto positivo de este nutriente en los niveles de cafeína, trigonelina, sacarosa, glucosa y actividad de la PPO, se verificó que tanto la falta como el exceso de B redujeron la síntesis de cafeína y trigonelina, se observó, además que las concentraciones foliares de B asociadas a un buen crecimiento y producción, están por debajo de las que maximizan la actividad de la PPO, característica que ha sido fuertemente asociada a la calidad de la bebida.

## **10.2 Cobre.**

Lacerda (2014) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) realizó un experimento en invernadero con sistema de hidroponía, con arena como sustrato para verificar el efecto de dosis crecientes de Cu (0,4 0,2 1,6 0,8; y 3.2  $\mu\text{mol}$  L<sup>-1</sup>) en la concentración de compuestos relacionados con la calidad granos de café crudos. Después de tres años de conducción el autor verificó que las dosis de Cu influenciaron positivamente la producción de granos, actividad de la PPO, y los niveles de sacarosa y, negativamente, las concentraciones de fenoles totales, 5-CQA y 4-CQA. Las variables actividad de la enzima PPO, producción de granos y concentración de sacarosa aumentaron con las dosis de Cu hasta alcanzar un punto de máximo, decreciendo a continuación. Por el contrario fenoles totales, 4- CQA y 5-CQA decrecieron hasta un punto de mínimo con posterior incremento con las dosis de Cu. El 3- CQA al contrario de lo esperado, aumentó con las dosis de Cu hasta alcanzar el punto de máximo declinando a continuación. El punto de máximo estimado para la concentración de 3-CQA fue muy cercano al punto de máxima de la actividad de la PPO, sugiriendo un efecto positivo del 3- CQA en la calidad. Es probable que la acumulación de 3-CQA limite las concentraciones de 4-CQA y principalmente del 5-CQA, principal sustrato para la PPO y fuertemente asociado a la pérdida de la calidad de la bebida. Cafeína, trigonelina,

potasio lixiviado y análisis sensorial no presentaron variaciones significativas con las dosis de Cu.

Las dosis entre 1,45 y 2,59  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de Cu permitieron optimizar la producción y diversas características relacionadas con la calidad. En estas condiciones los contenidos de Cu en las hojas índice estuvieron entre 7,20 y 11,37  $\text{mg kg}^{-1}$ , es decir por debajo de la gama de nutrición adecuada propuesta por Martínez *et al.* (2003) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014), que se sitúa entre 13 y 29  $\text{mg kg}^{-1}$ . Cabe señalar que las franjas de suficiencias descritas por Martínez *et al.* (2003) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) fueron establecidas con base en cultivos productivos y plantas cultivadas a campo, posiblemente presenten Cu retenido en la cutícula o superficie foliar de difícil lavado lo que no ocurre en condiciones controladas de invernadero. Corroborando los resultados descritos anteriormente, en el experimento de campo, Clemente (2014) citado por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) obtuvo un efecto positivo de Cu en las concentraciones de cafeína, trigonelina, sacarosa, glucosa y PPO. Para el 3-CQA y 5-CQA, el efecto fue negativo, habiendo una clara relación inversa entre la actividad de la PPO y la concentración de 5- CQA.

### **10.3 Zinc.**

Los resultados de Martínez *et al.* (2013) citados por (Prieto Martínez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) indicaron que los granos de café suministrados con Zn presentaron mayores niveles de ácidos clorogénicos y mayor actividad antioxidante.

El efecto del Zn sobre los compuestos químicos relacionados con la calidad de la bebida en los granos crudos fue estudiado por Lacerda (2014) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014). El autor proporcionó dosis de Zn (0,2, 1,0, 2,0, 3,0 y 4,0  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) a plantas de café cultivadas por tres años en vasos de 20 L, conteniendo arena, irrigados con solución nutritiva en sistema hidropónico de goteo. Se observó una respuesta cuadrática creciente a las dosis de Zn para actividad de la PPO, índice de coloración, concentración de cafeína, trigonelina, sacarosa, arabinosis, manosa, ácido cítrico y ácido tartárico en los granos. Después de los puntos de máximo estimados que ocurrieron en los granos de plantas que presentaban contenidos de Zn entre 9,73 y 10,27  $\text{mg kg}^{-1}$  en las hojas índice, hubo disminución en la concentración de estos compuestos. La acidez titulable, pH, fenoles totales, 5-CQA, 4-CQA, potasio lixiviado y conductividad eléctrica presentaron respuesta cuadrática decreciente al Zn, con puntos de mínimo en granos de plantas que presentaban contenidos de Zn entre 9,73 y 9,90  $\text{mg kg}^{-1}$  en las hojas índice.

También en este caso, 3-CQA presentó respuesta inversa a las de 4-CQA y 5-CQA, con punto de máximo en concentración de Zn muy próxima a la que resultó en máxima actividad de la PPO. Es evidente que, en general las concentraciones de los compuestos relacionados positivamente con la calidad de la bebida fueron maximizadas y la de los negativamente relacionados con la calidad de la bebida fueron minimizadas cuando las plantas presentaban niveles foliares de Zn dentro del rango de nutrición adecuado propuesto por Martínez *et al.* (2003) citados por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014), entre 8 y 12  $\text{mg kg}^{-1}$ . Llama la atención, sin embargo que esas condiciones no fueron las que resultaron en una mayor producción de granos. La mayor producción de granos fue obtenida con la menor dosis de Zn empleada, de 0,2  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , mientras que los atributos positivamente relacionados

con la calidad fueron máximos y los negativamente relacionados con la calidad fueron mínimos, con dosis entre 1,3, y 2,2  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de Zn (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014).

Aunque no se observó diferencia estadística para el análisis sensorial se verificó que la menor dosis de Zn (0,2  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) resultó en una bebida dura, mientras que las dosis más altas resultaron en una bebida blanda. También en este caso, los resultados obtenidos en campo por Clemente (2014) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) con relación al efecto del Zn sobre las concentraciones de cafeína, trigonelina, sacarosa, glucosa, 5-CQA y fenoles totales confirman los de Lacerda (2014) citado por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014).

En cuanto a los micronutrientes, Pasin *et al.* (2002) citados por (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014) verificaron que las aplicaciones foliares de Cu, Zn, Mn y B directamente sobre los frutos durante su desarrollo redujeron significativamente el porcentaje promedio de incidencia de *Aspergillus ochraceus*, *Fusarium semitectum*, *Cladosporium cladosporioides*, sin afectar significativamente a la ocurrencia de *Penicillium variable* (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos bajo los efectos de B, Cu y Zn en la producción de compuestos relacionados con la calidad del café y, también su aparente papel en la reducción de infecciones por hongos toxicogénicos, el manejo de la nutrición con micronutrientes parece ser un una manera prometedora para lograr un mejor producto de calidad (Prieto Martinez, Clemente, Soares de Lacerda, Poltronieri Neves, & Woods Pedrosa, 2014).

## **11. Fertilización Con Tabletas En La Rama Ortotrópica**

En el intento por eludir los riesgos de la fertilización (edáfica y foliar) la inserción de pastillas en el tronco de las plantas con la finalidad de liberación de sustancias es interesante ya que el proceso de liberación de nutrientes es lento pudiendo ocurrir por varios años. Este método se utilizó en estudios de pequeña escala para resolver el problema de la absorción y / o la translocación de los nutrientes (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016). En el café ha sido verificada la viabilidad de la suplementación de Zn a través de la inserción de pastillas en barra ortotrópica y la respuesta en términos de productividad y calidad de los granos, siendo el método eficiente en el suministro de este elemento (Poltronieri; Martinez; Cecon, 2011) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016). También se verificaron similitudes en los contenidos de Zn en las hojas de plantas de café fertilizados foliarmente con sulfato de Zn y de aquellos con inserción de tabletas de sales de ese elemento en el tronco. Sin embargo los autores observaron que el suministro de Zn por las tabletas fue más regular durante el período experimental, en comparación con la aspersión foliar (Martinez; Poltronieri; Cecon, 2015) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

La inserción de tabletas en el tronco sería una opción de aprovisionamiento de esos elementos al café reduciendo la demanda por mano de obra ya que se presupone que el suministro de esos elementos por las tabletas atendería la demanda de la planta por más de dos ciclos de producción (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

(Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016) No encontraron diferencias entre la fertilización con la inserción de tabletas y la fertilización foliar siendo ambas eficientes.

Las tabletas presentaron mayor eficiencia en el suministro de B en el periodo en que los frutos de café demandan gran cantidad de este nutriente y sostuvo niveles elevados en las hojas inclusive se presentaron niveles considerados tóxicos pero no se observó toxicidad en la hojas (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

Los nutrientes se mueven en la planta desde el punto de inserción hasta las hojas impulsados por la corriente transpiratoria (Fernández De Cordova; Gallego, 1997) citados por (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016) por lo tanto a menor disponibilidad de agua disminuye la liberación del nutriente por la tableta (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

En la especie *Coffea arabica* las inflorescencias ocurren en las ramas plagiotrópicas crecidas el año anterior, en cuanto a la evaluación de la productividad solo hasta el tercer año, ambos suministros, foliar y vía comprimidos, fueron eficientes en el suministro de B, Cu y Zn promoviendo mayores valores de productividad cuando se comparó con el testigo, evidenciando el éxito de los comprimidos en el suministro de estos micronutrientes (Poltronieri, Prieto Martinez, Clemente, & Ferreira, 2016).

## **12. Tolerancia A El Exceso Manganeso**

El rango crítico de concentración de manganeso en las hojas del cafeto varía entre 50 y 210 mg kg<sup>-1</sup> (Malavolta, 1993; Malavolta *et al.*, 1997; Mills & Jones Junior, 1996) citados por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007), pero también presenta variaciones en cuanto a regiones distintas, el nivel de productividad de los cultivos y la fertilización y encalado. Martínez *et al.* (2003) Citados por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007) verificaron bajos contenidos de manganeso en cultivos de alta productividad y exceso de metal en cultivos de baja productividad y atribuyeron ese resultado a la aplicación de cal en exceso en los cultivos de alta

productividad ya la acidez elevada del suelo en cultivos de baja productividad (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007).

La concentración crítica de deficiencia de manganeso es similar en la mayoría de las especies cultivadas y varía de 10 a 20 mg kg<sup>-1</sup> en hojas completamente expandidas (Marschner, 1995) citado por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007); sin embargo pocos trabajos reportan contenidos de toxicidad de manganeso. En el cultivo del café se sugirió que los contenidos superiores a 400 - 500 mg kg<sup>-1</sup> y 700 - 800 mg kg<sup>-1</sup> en el tercer par de hojas pueden causar toxicidad en los cultivares Bourbon y el Mundo Novo, respectivamente (IBC, 1974) citado por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007). Pavan & Bingham (1981) citados por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007) determinaron y caracterizaron la toxicidad del manganeso en plántulas de café Catuaí rojo de CV y encontraron síntomas de toxicidad relacionados con niveles foliares de 1200 mg kg<sup>-1</sup>, pero el crecimiento de plántulas fue restringido solamente cuando la concentración de manganeso en la hoja fue más que 1700 mg kg<sup>-1</sup> (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007).

Según Marschner (1995) citado por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007) el exceso de manganeso puede inducir la deficiencia de hierro y magnesio por la inhibición de la absorción o competencia a nivel celular y la deficiencia de calcio puede ocurrir debido al efecto indirecto en el transporte de éste a las hojas nuevas. El transporte de calcio está mediado por un co-transportador AIA (ácido indol acético) y a menudo los tejidos con alta concentración de manganeso presentan alta actividad de AIA oxidasa, que también pueden contribuir según Foy *et al* (1978) citados por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007), para la reducción crecimiento debido a la degradación de AIA en los tejidos de la planta (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007).

A nivel celular, la tolerancia de los tejidos al exceso de manganeso puede deberse a la acumulación del elemento en los vacuolas, paredes celulares o vesículas de Golgi (Lidon & Teixeira, 2000) citados por (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007). Por lo tanto se deduce que las concentraciones de manganeso en hojas maduras no permiten discriminar progenies más o menos tolerantes a la toxicidad del elemento (Zabini, Prieto Martinez, & Andrade Silva, 2007).

### **13. Translocacion De Boro**

El café está entre las especies más sensibles a la deficiencia de Boro, siendo muy sensible a la fertilización de Boro (Brown & Shelp, 1997) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007). En Brasil hubo un poco de controversia sobre el mejor modo de aplicar B a plantaciones de café. La fertilización foliar ha mostrado resultados positivos en muchos campos mientras que otras veces la aplicación del suelo es mejor y las aplicaciones de fertilizantes que aumentan el contenido de B en la hoja no siempre han dado como resultado un mayor rendimiento (Santinato *et al.*, 1991; Marubayashi *et al.* 1994; Barros *et al.*, 1996; Lima Filho y Malavolta, 1998) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007).

Como resultado del papel crítico de B en tejidos meristemáticos y reproductivos y su movilidad limitada en la mayoría de las especies, una fuente de B debe estar continuamente disponible durante toda la vida vegetal (Brown & Shelp, 1997) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007), Si el B se retira del medio nutritivo en una especie con movilidad de B limitada, incluso durante un período corto, se producirá una deficiencia y se reducirá el crecimiento (Dell & Huang, 1997) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007).

En la mayoría de las especies los contenidos de B en las plantas no puede ser remobilizado, como una consecuencia de su movilidad alto-xilema que tiende a resultar en un atrapamiento localizado al final de la corriente de transpiración (Oertli 1994) citado por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007) y porque está altamente complejado en la fracción de pectina del pared celular (Brown y Hu 1994; Matsunaga y Nagata 1995; Hu *et al.* 1996) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007). Recientemente, se han observado altos grados de movilidad B en algunas especies en las que los polioles son abundantes. Los complejos de B con polioles (alcoholes de azúcar) están presentes en un número diverso de especies (Brown y Hu 1998) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007) que dan como resultado un alto grado de movilidad del floema B en esas especies. Especies como ajo, apio, espárragos, coliflor, zanahoria, olivos, habas, guisantes y café, contienen manitol que es capaz de formar complejos de boro transportables de floema (Brown y Hu 1998) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007), sin embargo información sobre la distribución y la extensión para lo cual los polioles contribuyen específicamente al transporte de B y la tolerancia mejorada al suministro inadecuado de B en el suelo aún es insuficiente, eso también fue observado por los mismos autores que la movilidad del boro puede ser determinada por monitoreo del movimiento del boro marcado isotópicamente de las hojas al desarrollo de meristemas (Leite, Brown, & Rosolem, 2007).

La literatura sobre B en el café es relativamente abundante, sin embargo muchos aspectos aún son poco conocidos, incluyendo el grado de removilización de B en la planta y la importancia de esta removilización para el crecimiento y desarrollo de la planta en tiempos de bajo suministro de B en el suelo. En condiciones de Boro marginalmente adecuado, el ~55 % del boro contenido en las hojas de café se encontró en la fracción de la pared celular y el resto fue soluble (Bellato *et al.*, 2003) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007), esto implica que la fracción de boro en

las células de café que no está fuertemente complejada es relativamente alta y por lo tanto puede estar disponible para la removilización; De manera similar un estudio sobre la movilidad del boro en los árboles de café sugirió que el boro puede tener movilidad marginal ya que las concentraciones de boro fueron similares tanto en las hojas viejas como en las nuevas (Konsaeng et al., 2005) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007).

(Leite, Brown, & Rosolem, 2007) Encontraron que cuando omitieron el B en la solución nutritiva durante un periodo se observó una disminución en la acumulación de boro en las partes de la planta desarrolladas en periodos anteriores, lo que demuestra que el nutriente debe haber sido removilizado a las partes de crecimiento de las plantas. Cuando el boro es deficiente durante una etapa particular del desarrollo del órgano, existe un mayor potencial para la removilización de B de partes más antiguas de la planta, esta removilización del B se dirige preferentemente a nuevas hojas y frutos. Estos resultados concuerdan con la observación de Matoh *et al.* (1992) y Matoh (1997) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007), quienes sugirieron que el estado del B de las partes más viejas de la planta tiene un efecto importante sobre la capacidad de removilización del B (Leite, Brown, & Rosolem, 2007). En tejidos cultivados bajo la deficiencia de B la mayor parte del B es complejo o ligado a la pared de la célula y no puede ser redistribuido en la planta (Matoh *et al.* 1992) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007), sin embargo si las partes más viejas de la planta se desarrollaran en un período cuando la planta fue bien alimentada puede haber algún B que es libre de ser movilizado de nuevo (Matoh, 1997) citado por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007).

(Leite, Brown, & Rosolem, 2007) Observaron que la aplicación foliar de B incrementó los contenidos pero no en un grado equivalente a las aplicaciones en el suelo.

(Leite, Brown, & Rosolem, 2007) Encontraron evidencias de removilización del boro como las hojas que recibieron el nutriente varió de ~ 32% poco después de la aplicación a menos del 20% 7 meses después de la aplicación, también encontraron presencia de aproximadamente 5% de B en las hojas de las puntas de las ramas que no recibieron el fertilizante B. En general la mayor cantidad de B en las ramas se acumuló en las porciones distales y puntas cuyas hojas no habían recibido B.

Xie *et al.* (1992) citados por (Leite, Brown, & Rosolem, 2007) observaron que durante el crecimiento reproductivo el B se trasloca principalmente a frutos y hojas de nódulos que llevan frutos.

#### **14. Otras Consideraciones Sobre El Boro**

El boro está presente solo como un elemento traza en la atmósfera con una concentración máxima de 10 ng B / m<sup>3</sup>. El boro en la atmósfera se origina a partir de la desgasificación de los volcanes, la quema de productos agrícolas y los incendios forestales, las emisiones industriales, incluida la quema de combustible, y en menor grado la volatilización del boro oceánico (Fogg and Duce, 1985; Nishimura and Tanaka, 1972) citados por (Wieser, Iyer, Krouse, & Cantagallo, 2001)

El contenido total de boro de muchos suelos oscila entre 7 y 80 mg / g y el boro se concentra en minerales como la turmalina y en las arcillas, las lutitas y la materia orgánica (Evans y Sparks, 1983) citados por (Wieser, Iyer, Krouse, & Cantagallo, 2001). El boro unido a la turmalina no se lixivia fácilmente ya que se mantiene fuertemente en la estructura mineral (Gupta, 1968) citado por (Wieser, Iyer, Krouse, & Cantagallo, 2001). Por el contrario el B en la materia orgánica puede ser liberado más fácilmente por la actividad microbiana, Sin embargo esta versión

depende del contenido de humedad y el pH del suelo. Bajo condiciones de sequía la actividad microbiana en el suelo disminuye y el B permanece complejado y no disponible para la planta. A medida que el contenido de humedad del suelo aumenta la absorción de B por las plantas aumenta y se correlaciona positivamente con el pH del suelo (por encima de un pH de 6.3). Presumiblemente a medida que aumenta el pH la adsorción de B por arcillas reduce la cantidad disponible que puede lixiviarse fácilmente (Wieser, Iyer, Krouse, & Cantagallo, 2001).

El boro no se trasloca fácilmente una vez que se une al tejido vegetal (Wieser, Iyer, Krouse, & Cantagallo, 2001)

## Conclusiones

Los elementos menores cumplen funciones importantes para el correcto funcionamiento de la planta de café, por esta razón es importante su presencia y disponibilidad en el suelo para que la planta pueda absorberlo y lograr una mayor producción, incluyendo la calidad en la bebida.

A pesar de la poca información de extracción de elementos menores de café en Colombia se logra evidenciar que en los diferentes departamentos difieren las cantidades extraídas por cada 1000 kg de café almendra, por lo cual no se puede generalizar y realizar una sola recomendación.

En otros países han investigado sobre la absorción de elementos menores sobre todo en la etapa reproductiva, que es una época crítica ya que la planta extrae del suelo los nutrientes requeridos para el llenado del fruto y es en este tiempo en que el suelo debe suministrar los nutrientes para que la planta de café pueda en el momento oportuno suministrar el nutriente necesario y de esta forma lograr un fruto con atributos de calidad y buen peso.

Los suelos donde se desarrolla la producción de café en Colombia provienen de diferentes unidades y no todas contienen más del 12% de materia orgánica, por esta razón se hace necesario realizar investigación en las unidades de suelo que contienen menos del 12% de materia orgánica y conocer cuáles son las necesidades de elementos menores para el cultivo.

Las cantidades extraídas de nutrientes por la planta de café varía según el genotipo encontrando en *coffea arabica* diferentes cantidades extraídas, lo cual es otro factor que se desconoce sobre todo para las diferentes variedades cultivadas en Colombia como la variedad caturra, típica, Colombia, tabí, castillo (sus regionales) y Cenicafé 1, entre otras.

Llaman la atención la práctica de injertación, la agricultura de precisión y fertilización con tabletas ya que se desconoce en Colombia su aplicación y puede tener un efecto positivo para la productividad del café.

## Referencias

- Anjos Reis, R. D., & Martinez, H. E. (2002). Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. *Scientia Agricola*, 537-542.
- Azcón Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de Fisiologia Vegetal* (segunda ed.). España: McGraw-Hill.
- Barrera, J., Cruz, M., & Melgarejo, L. M. (2010). Nutricion Mineral. En L. M. Melgarejo, *Experimentos en fisiologia vegetal* (págs. 79-106). Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de [http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/laboratorios/fisiologiavegetal/documentos/Libro\\_experimentos\\_en\\_fisiologia\\_y\\_bioquimica\\_vegetal\\_\\_Reparado\\_.pdf](http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/laboratorios/fisiologiavegetal/documentos/Libro_experimentos_en_fisiologia_y_bioquimica_vegetal__Reparado_.pdf)
- Braida Marré, W., Partelli, F. L., Curitiba Espindula, M., Machado Dias, J. R., Gontijo, I., & Duarte Vieira, H. (2014). Micronutrient accumulation in conilon coffee berries with different maturation cycles. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 1456-1462.  
doi:10.1590/01000683rbc20140649
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Fangjie, Z. (2012). Function of Nutrients: Micronutrients. En P. Marschner, *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (págs. 191-248). Aledaida: Elsevier.
- Capa Mora, E. D. (2015). "Efecto de la fertilizacion orgánica y mineral en las propiedades del suelo, la emision de los principales gases de efecto invernadero y en las diferentes fases fenológicas del cultivo de café (*Coffea arabica* L.)". *Tesis Doctoral*. Madrid.

- Cardona Calle, D. A., & Sadeghian Kh., S. (2005). Aporte de material organico y nutrientes en cafetales al sol y bajo sombrio de guamo. *Cenicafe, avance tecnico No 334*.
- Cirilo Carvalho, L. C., Moreira da Silva, F., Araújo e Silva Ferraz, G., Castro Figueiredo, V., & Barreto Cunha, J. P. (2017). Comparação entre amostragem foliar convencional de precisão para análise de micronutrientes na cafeicultura. *Coffee Science*, 272-281.
- Dominghetti Ferreira, A., Rodriguez Carvalho, G., Rezende Abrahão, J. c., Machado Rezende , R., Elias Botelho, C., & Mendonça de Carvalho, A. (2013). Dinâmica dos micronutrientes em cafeeiros enxertados. *Ceres*, 262-269.
- Echeverry, D. M., Quiroga, I. A., Balaguera Lopez, H. E., & Magnitskiy, S. (2016). El estrés por boro afecta la fotosíntesis y el metabolismo de pigmentos en plantas. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 137-148. doi:Doi:  
<http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4189>
- FNC. (2017). *85 Congreso Nacional de Cafeteros*. Manizalez-Colombia. Recuperado el 31 de agosto de 2018, de  
[https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Periodico\\_CNC2017.pdf](https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Periodico_CNC2017.pdf)
- FNC y Cenicafe. (2013). *Manual Cafetero Colombiano, investigacion y tecnologia para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. II).
- Garcia Lopez, J. C. (2008). Produccion de la variedad Tabi con tres frecuencias de poda de Erythrina fusca como sombrio y tres niveles de fertilización. *Cenicafe*, 361-373.
- Gonzalez Osorio, H., Sadeghian Khalajabadi, S., & Jaramillo Robledo, A. (2014). Épocas recomendables para la fertilización de cafetales. *Cenicafe, avance tecnico No 442*.

- González Osorio, H., Sadeghian Khalajabadi, S., & Jaramillo Robledo, Á. (2014). Épocas recomendables para la fertilización de cafetales. *Cenicafe, Avance tecnico No 442*.
- Juárez Sanz, M., Sánchez Andreu, J., & Sánchez Sánche, A. (2006). Reaccion del suelo. pH. En M. Juarez Sanz , j. Sanchez Andreu, & A. Sanchez Sanchez, *Quimica del suelo y del medio ambiente* (págs. 357-391). TD, Textos Docentes Alicante, Spain: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Laviola, B. G., Prieto Martinez, H. E., Chamhum Salomão, L. C., Damião Cruz, C., Marcos Mendonça, S., & Silva Rosado, L. (2007). Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em duas altitudes de cultivo: micronutrientes. *Brasileira de Ciência do Solo*, 1439-1449.
- Leite, V. M., Brown, P. H., & Rosolem, C. A. (2007). Boron translocation in coffee trees. *Plant Soil*, 221-229. doi:10.1007/s11104-006-9154-8
- Lopes do Carmo, D., Carvalho Nannetti, D., Machado Lacerda, T., Nogueira Nannetti, A., & Espírito Santo, D. J. (2012). Micronutrientes em solo e folha de cafeeiro sob sistema agroflorestal no sul de minas gerais. *Coffee Science*, 76-83.
- Malavolta, E., Rocha Fernandez, D., Casale, H., & Peres Romero, J. (1993). Seja o doutor dp seu cafezal. *Arquivo do agronomo, informacoes agronomicas No 64*, 1-36.
- Poltronieri, Y., Prieto Martinez, H. E., Clemente, J. M., & Ferreira, A. d. (2016). Fornecimento De Boro, Cobre E Zinco Ao Cafeeiro Via Inserção De Comprimidos No Ramo Ortotrópico. *Coffee Science*, 521-529.

- Prieto Martinez, H. E., Clemente, J. M., Soares de Lacerda, J., Poltronieri Neves, Y., & Woods Pedrosa, A. (2014). Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. *Ceres*, 838-848. doi:10.1590/0034-737X201461000009
- Ramirez , F., Bertsch, F., & Mora, L. (2002). Consumo de nutrientes de los frutos y bandolas de café caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Turrialba, Costa Rica. *Agronomia Costarricense*, 33-42.
- Rodriguez S, M., & Flórez R, V. J. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. *Nociones Basicas del Ferti-riego*, 25-36.
- Sadeghian Khalajabadi, S. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*, Boletín Técnico 32. Chinchiná: Cenicafe.
- Sadeghian Khalajabadi, S. (2010). Fertilización: una práctica que determina la producción de los cafetales. *Cenicafe, avance tecnico No 391*.
- Sadeghian Khalajabadi, S., & Gonzalez Osorio, H. (2012). *Alternativas Generales De Fertilización Para Cafetales En La Etapa De Levante*. Manizalez: Cenicafe.
- Sadeghian Khalajabadi, S., & Salamanca Jimenez, A. (2015). Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Cenicafe*, 73-87.
- Sadeghian Khalajabadi, S., Beatriz Mejía , M., & Hernán González , O. (2013). Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en los frutos de café. *Cenicafe-avance tecnico No 429*.
- Sadeghian Khalajabadi, S., Mejía Muñoz, B., & Arcila Pulgarin, J. (2006). Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera Colombiana. *Cenicafe*, 251-261.

Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (2000). *Fisiologia Vegetal*. España: Paraninfo.

Tezotto, T., Laércio Favarin, J., Antunes Azevedo, R., Ferracciú Alleoni, L. R., & Mazzafera, P. (2011). Coffee is highly tolerant to cadmium, nickel and zinc: Plant and soil nutritional status, metal distribution and bean yield. *Field Crops Research*, 25-34.  
doi:10.1016/j.fcr.2011.08.012

Wieser, M. E., Iyer, S. S., Krouse, H. R., & Cantagallo, M. I. (2001). Variations in the boron isotope composition of *Coffea arabica* beans. *Applied Geochemistry*, 317-322.

Woods Pedrosa, A., Prieto Martinez, H. E., Damião Cruz, C., Murillo DaMatta, F., Clemente, J. M., & Neto, A. P. (2013). Characterizing zinc use efficiency in varieties of Arabica coffee. *Acta Scientiarum*, 343-348.

Yara. (sf). *Análisis de suelo y follaje*. Obtenido de <https://www.yara.com.co/nutricion-vegetal/cafe/analisis-de-suelo-y-follaje/>

Zabini, A. V., Prieto Martinez, H. E., & Andrade Silva, C. (2007). Tolerância De Progênes De Cafeeiros (*Coffea Arabica* L.) Ao Excesso De Manganês Em Solução Nutritiva. *Coffee Science*, 87-96.