



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL
DEL AGUACATEO EN
TEJUPILCO, ESTADO DE MÉXICO**

RONALDO GONZÁLEZ VENCES

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada "Diagnóstico nutrimental del aguacatero en Tejupilco, Estado de México", realizada por el alumno Ronaldo González Vences, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



DRA. LIBIA IRIS TREJO TÉLLEZ

ASESOR



DR. LENOM CAJUSTE BONTEMPS

ASESOR



DR. JULIO SANCHEZ ESCUDERO

Montecillo, Texcoco, Estado de México. Agosto de 2021

DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL DEL AGUACATE EN TEJUPILCO, ESTADO DE MÉXICO

Ronaldo González Vences, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

México es el principal productor de aguacate, aportando el 31% de la oferta mundial, lo que deja ingresos al país por más de 2 mil millones de dólares anuales. El aumento en la producción nacional es resultado de una mayor superficie cultivada, pero sin aumentos significativos en los rendimientos del país. En el Estado de México se cultivan alrededor de 10 mil hectáreas de aguacate, sin embargo, el 77% de los productores no cuenta con asesoría técnica especializada que les brinde información sobre nutrición de cultivos; esto repercute en el volumen y calidad de su producción. El objetivo de esta investigación fue realizar el diagnóstico nutrimental de un cultivo de aguacate en Tejupilco, Estado de México, a través del Diagnóstico Nutrimental Compuesto (CND, por sus siglas en inglés: Compositional Nutrient Diagnosis), y generar recomendaciones de fertilización específicas para la zona de estudio, para lo cual se realizaron análisis foliares y de suelo. Cada nutrimento determinado en el análisis foliar (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu y B) se comparó con su concentración óptima de acuerdo con la literatura. El CND arrojó índices de deficiencia o exceso relativos que determinaron el orden de limitación nutrimental. Zn, B, S y K resultaron deficientes en todas las zonas muestreadas; P, Mn y Cu fueron deficientes solamente en algunas zonas. N, Ca, Mg y Fe no figuraron en el orden de limitación nutrimental. Se formularon recomendaciones para atender cada uno de las deficiencias nutrimentales y el problema de sodicidad que reveló el análisis de suelo. Este es el primer trabajo en que se utiliza el CND para valorar la situación nutricional del cultivo de aguacate.

Palabras clave: análisis foliar, análisis de la fertilidad de suelo, Diagnóstico Nutrimental Compuesto (CND), *Persea americana* Mill., rangos de suficiencia nutrimental.

NUTRIMENTAL DIANOSIS OF AVOCADO IN TEJUPILCO, STATE OF MEXICO

Ronaldo González Vences, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2021

Mexico is the main avocado producer, contributing with 31% of the world supply, which leaves the country with more than 2 billion dollars a year in income. The increase in national production is the result of a larger cultivated area, but without significant increases in the country's yields. In the State of Mexico, around 10 thousand hectares of avocado trees are cultivated, however, 77% of the producers do not have specialized technical advice that provides them with information on crop nutrition; this affects the volume and quality of their production. The objective of this research was to perform the nutritional diagnosis of an avocado crop in Tejupilco, State of Mexico, through the Compositional Nutrient Diagnosis (CND), and generate specific fertilization recommendations for the area, for which foliar and soil analyzes were carried out. Each nutrient determined in the foliar analysis (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu and B) was compared with its optimal concentration according to the literature. The CND yielded relative deficiency or excess indices that determined the order of nutritional limitation. Zn, B, S and K were deficient in all sampled areas, P, Mn and Cu were deficient only in some areas. N, Ca, Mg and Fe did not appear in the order of nutritional limitation. Recommendations were formulated to address each of the nutritional deficiencies and the problem of sodicity revealed by the soil analysis. This is the first work in which the CND is used to assess the nutritional situation of the avocado crop.

Keywords: foliar analysis, soil fertility analysis, Compound Nutrient Diagnosis (CND), *Persea americana* Mill, nutrient sufficiency ranges.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado a mis padres, que me incitaron a estudiar un postgrado... y qué mejor elección que la Nutrición Vegetal.

Agradezco sobremanera a la Dra. Libia por su consejo y apoyo, pero sobre todo por su amigable y siempre positiva actitud. Usted inspira confianza a donde quiera que va. ¡Muchas gracias!

A mis asesores, por su valioso tiempo prestado y consejo para mejorar este trabajo. Mi respeto y admiración a ustedes.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para permitirme desarrollar mi idea y estudiar esta Maestría. ¡Gracias!

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Descripción del cultivo de aguacate.	4
2.2. Fenología del aguacatero en el Estado de México.	5
2.3. Nutrición mineral en la calidad de fruta.	7
2.4. Situación del cultivo de aguacate en el Estado de México.	13
2.5. Diagnóstico nutrimental foliar.	15
2.6. Diagnóstico de la fertilidad del suelo.	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Descripción de la región aguacatera de Tejupilco.	21
3.2. Sitio de estudio y manejo del huerto.	22
3.3. Diagnóstico nutrimental del suelo.	24
3.4. Diagnóstico nutrimental foliar.	26
3.5. Recomendación de fertilización.	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1. Diagnóstico nutrimental del suelo.	35
4.2. Diagnóstico nutrimental foliar.	37
4.3. Orden de limitación nutrimental.	38
4.4. Recomendaciones de fertilización.	45

V. CONCLUSIONES	53
VI. LITERATURA CONSULTADA	55

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Niveles de suficiencia foliar en el cultivo de aguacate.	27
Cuadro 2. Referencia de suficiencia nutrimental foliar para el cultivo de aguacate.	28
Cuadro 3. Extracción nutrimental del cultivo de aguacate.	29
Cuadro 4. Promedios de extracción nutrimental.	30
Cuadro 5. Tabla interpretativa para valores I_{zi} .	34
Cuadro 6. Resultados del análisis de suelo.	36
Cuadro 7. Resultados del análisis químico foliar.	37
Cuadro 8. Índices de limitación nutrimental I_{zi} .	39
Cuadro 9. Orden de limitación nutrimental de cada zona de muestreo foliar.	40
Cuadro 10. Estimación de yeso a aplicar en el huerto de estudio para reducir el porcentaje de sodio intercambiable.	50

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fases fenológicas del aguacatero en el Estado de México.	6
Figura 2. Composición química del aguacate.	8
Figura 3. Pardeamiento de pulpa por exceso de N.	9
Figura 4. Daño por frío en el fruto.	10
Figura 5. Pardeamiento vascular en frutos.	11
Figura 6. Pardeamiento de pulpa por deficiencia de Ca.	11
Figura 7. Comparación del tamaño y forma de frutos.	12
Figura 8. Síntoma de deficiencia de boro en fruto.	13
Figura 9. Climograma de la comunidad de Tenería, Tejupilco, Estado de México.	21
Figura 10. Rendimiento observado en la zona de estudio en Tejupilco, Estado de México.	22
Figura 11. Síntomas visibles de deficiencia nutrimental en la zona de estudio.	23
Figura 12. Delimitación de las unidades de muestreo de suelo y ubicación de los sitios de muestreo.	24
Figura 13. Unidades de muestreo de tejido foliar.	31
Figura 14. Relación de los índices CND para P y Mn en aguacatero establecido en Tejupilco, Estado de México.	42
Figura 15. Relación de los índices CND para P y Fe en aguacatero establecido en Tejupilco, Estado de México.	43

I. INTRODUCCIÓN

El aguacate (*Persea americana* Mill) es una especie vegetal perteneciente a la familia Lauraceae. Autóctono de las regiones tropicales de América con tres puntos de origen reconocidos: Antillano, Guatemalteco y Mexicano (Vivero, 2019). Es la cuarta fruta tropical más producida en el mundo (7.3 millones de toneladas), solo por debajo del mango, piña y papaya, frutas con alta popularidad y demanda en países como India y Brasil. México ocupa el merecido primer puesto en producción con 2.3 millones de toneladas, lo que representa el 31% de la oferta total. En segundo lugar, se encuentra República Dominicana con 661 mil toneladas, seguido por Perú con 535 mil (FAO, 2020).

El cultivo de aguacate alrededor del mundo ha mostrado una tendencia creciente en la superficie cultivada. En 2009, se reportó una superficie de 427 mil hectáreas, de la cual, más de una cuarta parte se ubicó en México. Diez años después se observó una superficie de 749 mil hectáreas, lo que significa un aumento en la oferta mundial del 87% (FAO, 2020).

La popularidad del aguacate en estos últimos años se debe a la gran cantidad de propiedades nutraceuticas que se le atribuyen, entre ellas su alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, en su mayoría ácido oleico, de tocoferoles, de antioxidantes (ácido ascórbico, niacina, riboflavina, piridoxina y β -carotenos) y de fibra. Asimismo, contiene una gran variedad de nutrimentos como K y Mg, además de vitaminas A, C, E, y K. El consumo recurrente del aguacate se ha asociado con la reducción en el riesgo de enfermedades cardiovasculares, la inhibición de la proliferación de células cancerígenas, control glucémico en personas con diabetes y actividad antimicrobiana (Pérez, 2005; Dotti, 2012; Vivero, 2019).

Por otra parte, el aguacate es uno de los productos que más economía aporta a México, incluso provee por encima de los hidrocarburos en términos netos. Mientras que, el comercio exterior del petróleo y sus derivados le dejó a México en 2016 un déficit de 13 mil 163 millones de dólares, el denominado “oro verde” reportó un superávit de dos mil 227 millones de dólares. Asimismo, en 2016, se alcanzó el récord en las exportaciones del fruto tanto en ingresos como en volumen, al colocarse 1,022 millones de toneladas

en 31 países, siendo Estados Unidos de América donde se concentró el 77% del total (Torres, 2017).

En nuestro país, el estado de Michoacán aporta tres de cada cuatro aguacates que se producen sobre suelo mexicano. En segundo lugar, se encuentra Jalisco con el 10% y en tercer lugar el Estado de México con el 5% (SIAP, 2020). La producción nacional se ha duplicado en los últimos diez años debido al aumento en la superficie dedicada a este cultivo. Sin embargo, no se ha observado un incremento significativo en el rendimiento en las regiones productoras del país.

En el Estado de México se cultivan cerca de 10 mil hectáreas de aguacate y es Coatepec Harinas el municipio más importante en esta materia. En el distrito productor de Tejupilco, el cultivo del aguacatero es un tema reciente y la mayoría de los huertos establecidos no superan los 15 años de edad. Aun así, este distrito produce 20 mil toneladas anuales con rendimientos que oscilan las 9 t ha⁻¹, lo que genera unos 290 millones de pesos (SIAP, 2020).

El rendimiento de los cultivos está basado inicialmente en la disponibilidad de nutrimentos en el suelo. Los suelos varían enormemente en una serie de propiedades que de una u otra forma afectan el desarrollo y rendimiento del cultivo. Propiedades como tipo de suelo, contenido de materia orgánica, agua y propiedades físicas, etc., afectan la disponibilidad de elementos, mientras que el genoma de la planta, microorganismos, temperatura, agua y pH del suelo afectan la absorción de nutrimentos. La adecuada nutrición mineral de un cultivo está influenciada por el conocimiento de los requerimientos de la planta y por la cantidad e intensidad de nutrimentos del suelo en donde se tiene el cultivo. Cuando el suelo no puede suministrar adecuadamente los nutrimentos para un desarrollo normal de las plantas, se hace necesario su adición en las cantidades y formas apropiadas (Meléndez y Molina, 2002).

El propósito de cualquier programa de nutrición vegetal es suministrar los nutrimentos que son absorbidos por la planta, en la dosis y momento oportuno para optimizar su utilización. El aguacate, como cualquier otra planta, requiere elementos esenciales, es decir, aquellos que no deben faltar para el funcionamiento fisiológico y el desarrollo completo del ciclo vegetativo (Martínez, 2014).

A medida que crecen las plantas de aguacate, los suelos bajan sus contenidos nutrimentales, por lo que se necesita reponer los nutrientes para que no se presenten deficiencias. Se debe tomar en cuenta que, en México, las recomendaciones de fertilización del aguacatero generadas para una región específica, con frecuencia son extrapoladas de otras regiones productoras con condiciones ambientales y edáficas muy contrastantes, sin considerar las variaciones en la fertilidad de los suelos ni la condición nutrimental de los árboles ([Salazar-García et al., 2009](#)).

En el Estado de México, 52% de los productores cuentan con servicio de asesoría, del cual, 29% es gubernamental, la cual presenta el inconveniente de no ser especializada en la materia, los asesores son promotores de programas oficiales; mientras que, solamente el 23 % posee asistencia técnica particular. El 48% de los productores no cuenta con este servicio, lo que repercute en el volumen y calidad de producción y, obviamente, en el precio de venta, dado que enfrentan fuertes problemas en producción, fitosanidad e inocuidad alimentaria ([Rubí et al., 2013](#)).

El enfoque de la fertilización de sitio específico considera el tipo y cantidad de nutrientes necesarios en cada huerto por lo que su uso incrementa a corto plazo la producción y calidad del fruto, además de disminuir la contaminación ambiental por la excesiva aplicación de ciertos fertilizantes o abonos ([Santillán, 2014](#)).

La idea fundamental en que se basa la agricultura de precisión es que se deben aplicar los insumos en cantidades que se puedan aprovechar en su totalidad, y que cada área del lote exprese el máximo potencial económicamente posible. Así entonces, se ahorrarían insumos en las áreas de bajo rendimiento potencial sin disminuir el rendimiento (que era bajo), para trasladarlo a las áreas con mayor potencialidad, que si pueden aumentar la producción aprovechando los insumos correctamente ([Bragachini, 2020](#)).

En el contexto anterior, esta investigación tuvo por objetivo realizar el diagnóstico nutrimental del árboles de aguacate en un huerto de Tejupilco, Estado de México, empleando el diagnóstico nutrimental compuesto (CND, por sus siglas en inglés: Compositional Nutrient Diagnosis) y generar una recomendación de fertilización considerando la disponibilidad nutrimental del suelo.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción del cultivo del aguacatero

El aguacate (*Persea americana* Mill.) perteneciente a la familia Lauraceae es originario de México y Guatemala. Existen aproximadamente 400 variedades de aguacates, que difieren en la forma, color y peso del fruto y se clasifica en tres razas hortícolas (Mexicana, Guatemalteca y Antillana) ([Rebolledo, 2017](#)).

El árbol es perennifolio que supera los 12 m de altura y 14 m de diámetro de copa, debido a las condiciones selváticas de su punto de origen, donde se está en permanente competencia por luz y espacio. El cultivar Hass produce un fruto (baya) piriforme, de cáscara gruesa, algo rugosa y de color verde, que se torna negra a medida que madura ([Lemus, 2005](#)).

El aguacate cv. Hass, requiere temperaturas en un rango de 12 a 17 °C y de 28 a 33 °C para el amarre de frutos. Temperaturas mayores de 42 °C son desfavorables para el cultivo. El mayor amarre de frutos ocurre con temperaturas entre 20 y 25 °C. Los umbrales térmicos son 10 y 35 °C ([Anguiano, 2007](#)).

La humedad ambiental influye en la calidad del fruto y en la sanidad de la parte aérea del árbol. Humedades altas inducen a la proliferación de enfermedades foliares, tallos y frutos. La humedad ambiental óptima es aquella que no supera el 60%. El requerimiento de agua en el periodo de estiaje varía de acuerdo con la ubicación de las plantaciones en cuanto a clima y altitud, determinándose que los huertos ubicados en climas tropicales y altitudes entre 1,200 y 1,600 m necesitan 530.1 mm de precipitación; mientras que, a altitudes entre 1,600 y 1,800 m requiere una lámina de 458.8 mm. En climas templados y altitudes de 1,900 a 2,300 m requieren 389.4 mm de precipitación pluvial ([Dorado, 2017](#)).

La principal limitante del suelo para el aguacatero es la presencia de textura arcillosa y mal drenaje, debido a la gran sensibilidad de esta especie a la asfixia radicular. El mejor suelo para este cultivo es aquel de textura ligera con un gran porcentaje de macroporos,

característica de una buena estructura, dado principalmente por su contenido de materia orgánica (Lemus, 2005).

El aguacatero se desarrolla de manera adecuada en suelos con pH tendiente a la neutralidad, en suelos con pH de 5.5 a 8.0, con una baja salinidad y libre de la presencia de cloruros (Anguiano, 2007).

2.2 Fenología del aguacatero en el Estado de México

Los árboles de aguacate muestran diversas fases de desarrollo o fases fenológicas conforme pasan las estaciones del año, por ejemplo: iniciación y diferenciación floral, flujos de crecimiento vegetativo, amarre y caída de fruto, crecimiento y maduración de fruto, crecimiento de raíces, abscisión de hojas, etc. Los modelos o diagramas fenológicos ayudan a entender el comportamiento fenológico del aguacate, ya que en éstos se describen los diferentes eventos que ocurren en el árbol durante el año (Rocha, 2011).

En el Estado de México, se observan dos flujos vegetativos y dos flujos de floración en el año siguiendo un carácter cíclico (**Figura 1**); primero inicia el flujo floral, se detiene y enseguida en el ápice de la inflorescencia indeterminada sobreviene un flujo vegetativo. El primer flujo vegetativo sucede en invierno (febrero) y el segundo en verano (julio). Respecto a la floración, se presentan dos flujos florales. La primera antesis de la floración sucede en invierno (floración normal), en los meses enero, febrero y marzo producto de las yemas florales formadas en los flujos vegetativos del verano anterior. La cosecha de esta floración se lleva a cabo en los meses de noviembre y diciembre, requiriéndose alrededor de 10 meses para el desarrollo del fruto. La segunda antesis de la floración (loca o aventurera) sucede en agosto y septiembre, producto de las yemas florales formadas en el flujo vegetativo iniciado en invierno. La cosecha de esta floración se lleva a cabo en el mes de julio (Reyes-Alemán *et al.*, 2017).

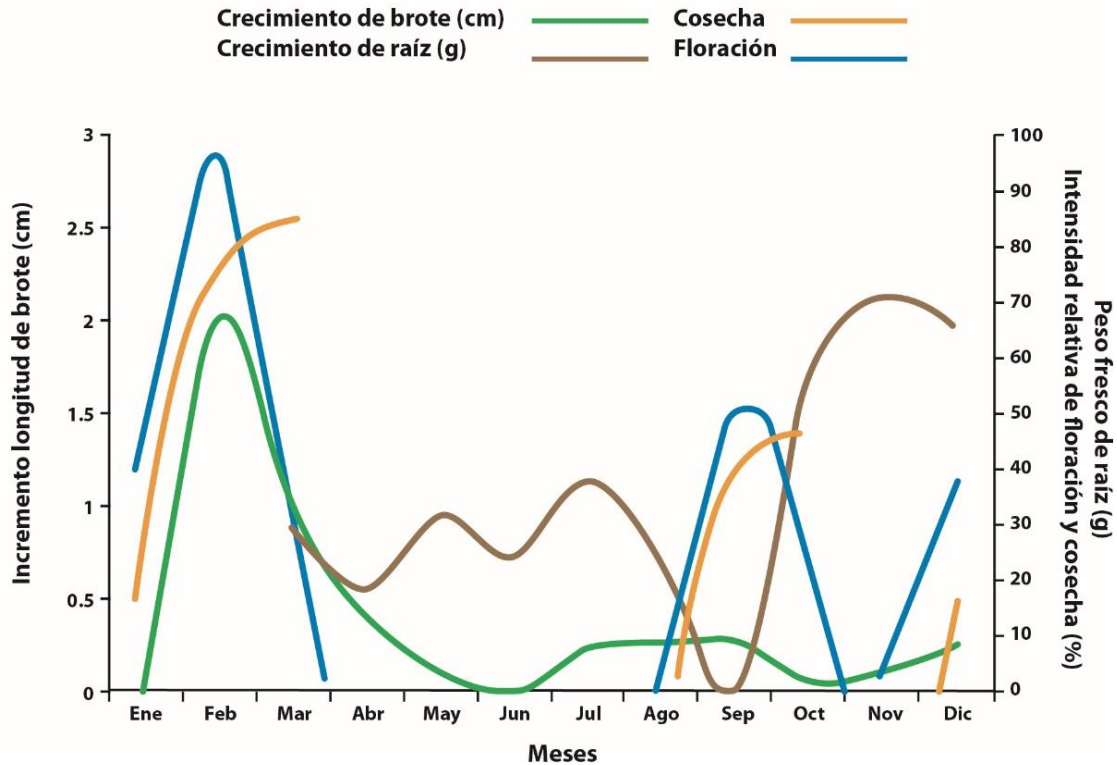


Figura 1. Fases fenológicas del aguacatero en el Estado de México (Reyes-Alemán et al., 2017).

El aguacatero presenta una floración muy peculiar. Esta especie es autocompatible, pero manifiesta una dicogamia sincronizada o diantesis; es decir, la maduración de los órganos sexuales femenino y masculino de la flor hermafrodita ocurre en distinto momento, haciéndolo en primer lugar en los órganos femeninos. Basándose en su comportamiento floral, los cultivares se clasifican en dos grupos: A y B, que complementan sus ciclos florales. Los cultivares del grupo A se comportan como femeninos por la mañana y como masculinos durante la tarde del día siguiente. Los cultivares tipo B presentan un ciclo floral complementario. En determinados ambientes, la interplantación de cultivares A y B maximiza la polinización y contribuye a un aumento de los rendimientos (Cabezas, 2003).

2.3 Nutrición mineral en la calidad de fruta

La influencia de los elementos esenciales o nutrimentos en el crecimiento y desarrollo de los árboles de aguacatero, así como daños fisiológicos y síntomas visuales causado por su deficiencia han sido descritos por diversos autores ([Lahav y Kadman, 1980](#); [Quintana, 2006](#); [Salazar-García *et al.*, 2014a](#); [Rebolledo, 2017](#); [Novoa *et al.*, 2018](#); [Hurtado *et al.*, 2019](#); [Selladurai y Awachare, 2019](#)).

Se consideran 17 elementos esenciales para el crecimiento y producción de todas las especies cultivadas, incluido el aguacate. Los tres con mayor requerimiento por parte de la biomasa (raíces, tronco, ramas, hojas y fruta) son carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), los cuales representan alrededor del 90% de la materia seca del árbol. El C es suministrado por la atmósfera y es transformado en carbohidratos a través del proceso fotosintético, mientras que, el H y el O son proporcionados por el agua ([Rebolledo, 2017](#)).

La composición mineral en las plantas superiores representa entre el 2 y 10%, de los cuales se distinguen los de mayor requerimiento, denominados macronutrimentos, donde se encuentra el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Los micronutrimentos son requeridos en menor proporción, y estos son hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), Boro (B), cloro (Cl), molibdeno (Mo) y níquel (Ni) ([Alcántar *et al.*, 2016](#)). La necesidad de agregar vía fertilización alguno de los 14 nutrimentos surge debido a que el suministro que recibe del suelo es insuficiente para el requerimiento de la planta ([Martínez, 2014](#)).

Durante su evolución, el aguacatero desarrolló diferentes estrategias de adaptación. Una de ellas es producir varios flujos de crecimiento vegetativo. El fruto del aguacatero es muy demandante de energía y tiene una gran dependencia de las reservas del árbol. Esto hace que su estrategia sea de alta eficiencia para producir, almacenar, conservar y reciclar carbohidratos, así como reservas minerales, haciéndolo parecer como un árbol cuya producción es barata en cuanto al gasto de nutrimentos ([Salazar-García, 2019](#)). [Ferreyra y Defilippi \(2012\)](#) indican que el aguacatero se caracteriza por presentar en general una baja demanda nutrimental.

La composición química típica de la materia seca de una hoja de esta especie puede ser 60% carbohidratos, 25% proteínas, 5% lípidos y 10% minerales, pero en el fruto, la pulpa representa el mayor porcentaje en peso seco total (**Figura 2**).

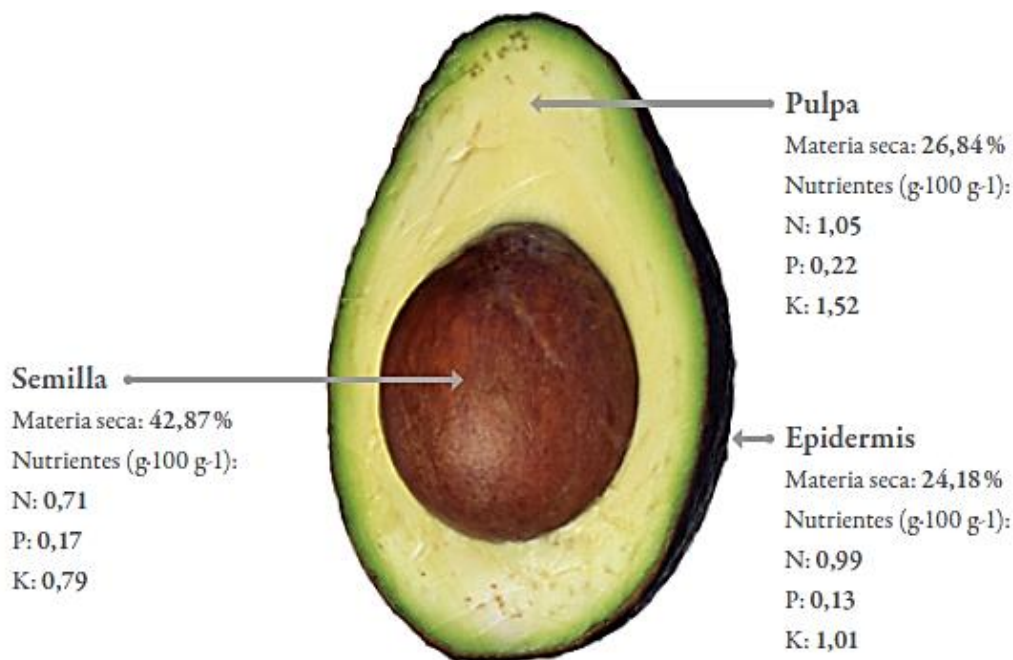


Figura 2. Composición química del aguacate (Rebolledo, 2017).

2.3.1 Nitrógeno

El aguacate no solo es rico en grasa y aceite, sino que también contiene una alta concentración de proteína en relación con otras frutas. Por tanto, el fruto representa una fuerte demanda de C y N. La cantidad de proteína en el fruto oscila de 5 a 7.5g, lo que representa más de 1g de N (Lemus, 2005; Rebolledo, 2017). El N es un constituyente base biomoléculas (aminoácidos, ácidos nucleicos, pigmentos fotosintéticos, nucleótidos, ATP, etc.), que están relacionadas con el vigor de la planta.

El N afecta el suministro y distribución de carbohidratos, muy importantes en términos de calidad de fruta, ya que no solo tienen rol en la respiración y producción de energía, sino que parecen tener un papel específico en la maduración del fruto, ya que la

mannoheptulosa, monosacárido de siete carbonos, presente en el fruto, es un poderoso antioxidante y cuanto más alto sea su nivel, especialmente en la cosecha, mayor será la calidad de la fruta (Ferreyra y Defilippi, 2012).

Deficiencias de N en aguacatero pueden provocar aborto de frutos y reducción en su tamaño (Lemus, 2005); por el contrario, un alto contenido de N causa una disminución del contenido de Ca (**Figura 3**), lo que incrementa la sensibilidad a enfermedades en poscosecha, la susceptibilidad a daños mecánicos por el adelgazamiento de las paredes y una decoloración en la pulpa (Cerdas *et al.*, 2006).

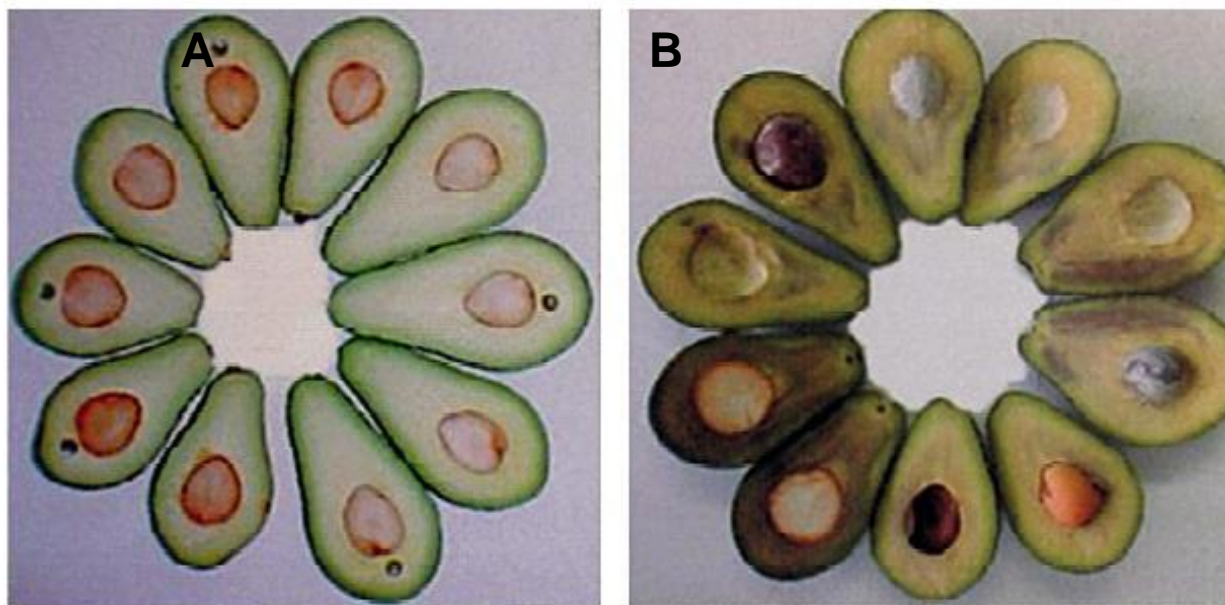


Figura 3. Pardeamiento de pulpa **A.** Frutos con niveles adecuados de N propician un buen contenido de Ca que evita el pardeamiento de la pulpa **B.** Frutos con exceso de N no contienen suficiente Ca y se propicia el pardeamiento.(Ferreyra y Defilippi, 2012).

2.3.2 Fósforo

A través de varias reacciones químicas, el P se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía, como la adenosina trifosfato (ATP) y el pirofosfato (PPi) (Rebolledo, 2017). Una deficiencia de P puede provocar una textura harinosa indeseable

en el fruto, sensibilidad a bajas temperaturas (**Figura 4**) y una reducción en el tamaño, lo que repercute en su calidad. Si aunado a esto hay deficiencia de Ca, se oscurece la pulpa y se acorta la vida de anaquel ([Cerdas et al., 2006](#)).



Figura 4. Daño por frío en el fruto ([Ferreyra y Defilippi, 2012](#)).

2.3.3 Potasio

Es el soluto orgánico más importante en la planta y principal catión dentro del xilema, que juega un rol esencial en la regulación estomática, en el transporte de azúcares y en la activación enzimática. A diferencia del N y P, el K no tiene funciones estructurales ([Rebolledo, 2017](#)). En árboles adultos, la deficiencia de K puede producir deformaciones en la cáscara del fruto y se le ha relacionado con la necrosis de los haces vasculares de éstos ([Martínez, 2014](#)) (**Figura 5**), de manera adicional, los frutos no toman buen sabor, ni color y no alcanzan un tamaño adecuado. Además hay una malformación de la semilla y se incrementa la susceptibilidad a enfermedades en poscosecha ([Cerdas et al., 2006](#)).

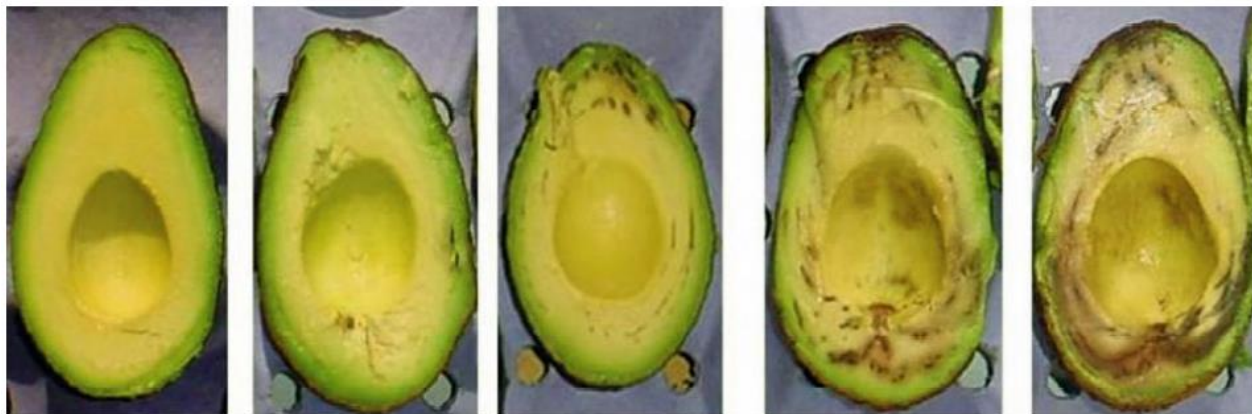


Figura 5. Pardeamiento vascular en frutos (Ferreyra y Defilippi, 2012).

2.3.4 Calcio

Es el nutrimento más frecuentemente relacionado con la vida útil de la fruta, calidad en poscosecha y desórdenes fisiológicos internos. Es un constituyente principal de membranas celulares por lo que juega un rol esencial para asegurar la integridad, estabilidad y funcionamiento fisiológico de la célula y el fruto (Martínez, 2014). La deficiencia de Ca está relacionada con el ablandamiento prematuro del fruto, además del pardeamiento y pudrición de la pulpa (Figura 6; Cerdas *et al.*, 2006).

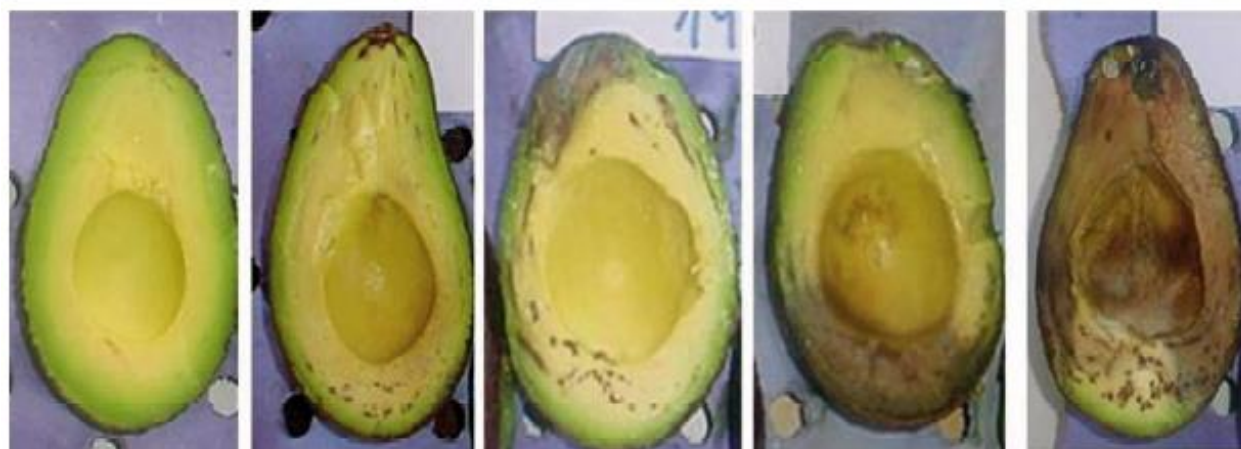


Figura 6. Pardeamiento de pulpa por deficiencia de Ca (Ferreyra & Defilippi, 2012).

2.3.5 Zinc

Es un activador de numerosas enzimas responsables de la síntesis de proteínas, además de ser necesario para la síntesis de clorofila y ácido indolacético, principal auxina de las plantas (Alcántar *et al.*, 2016). La deficiencia de Zn produce descensos de la producción, además de deformación en la fruta, la cual en estas condiciones es pequeña y redondeada con pérdidas del valor comercial como se observa en la **Figura 7** (Lemus, 2005).



Figura 7. Comparación del tamaño y forma de frutos. Fruto con nivel adecuado de Zn (izquierda) y con deficiencia de Zn (derecha) (Salazar-García *et al.*, 2014a).

2.3.6 Boro

La deficiencia de B se presenta como un problema de ocurrencia común en todas las áreas en que se cultiva aguacate, especialmente en zonas con suelos ácidos y alta precipitación (Lemus, 2005). Es un micronutriente cuya dosis se debe manejar cuidadosamente ya que el margen entre deficiencia y toxicidad es muy estrecho. Participa en el metabolismo y transporte de carbohidratos y en la síntesis de la pared

celular (Alcántar *et al.*, 2016) por lo que se le atribuye un rol en la vida de anaquel del fruto (Ferreyra y Defilippi, 2012).

Su deficiencia produce diferentes trastornos en el árbol, pero los más importantes afectan a la producción y calidad de la fruta, relacionados con el crecimiento del tubo polínico y cuajado de la fruta. Además, se producen frutos deformados en la parte de inserción del pedúnculo, aspecto corchoso o áreas necróticas que penetran la pulpa, y se reduce el calibre de la fruta hasta en un 15% como se observa en la **Figura 8** (Cerdas *et al.*, 2006; Rebolledo, 2017). También puede causar alternancia productiva (Salazar-García *et al.*, 2014a).



Figura 8. Síntoma de deficiencia de boro en fruto (Salazar-García *et al.*, 2014a).

2.4 Situación del cultivo de aguacate en el Estado de México

En el Estado de México, más del 90% de las plantaciones corresponden a la variedad Hass, 7% variedad Fuerte combinada con Hass y 3% con materiales criollos en combinación con Hass. Esta preferencia se basa en características de adaptabilidad, calidad del fruto y fácil comercialización por su alta aceptación en el mercado. Hay una tendencia al establecimiento de nuevas plantaciones en el Estado, lo que supone un riesgo potencial para los bosques y regiones montañosas debido a la deforestación y el cambio en el uso del suelo, además de otros problemas ambientales (Rubí *et al.*, 2013).

La mitad de los productores mexiquenses no cuenta con algún servicio de asistencia técnica para el manejo de sus cultivos, mientras que el 29% utiliza los servicios técnicos por parte de dependencias de gobierno, con el inconveniente de no ser especializada. Solamente el 23% cuenta con servicio técnico especializado en el cultivo de aguacate. Lo anterior repercute en el volumen y calidad de producción, así como también en el precio de venta, dado que la falta de un manejo adecuado trae problemas fitosanitarios y de inocuidad ([Rubí et al., 2013](#)).

Tradicionalmente los huertos de aguacate en México han utilizado poco fertilizante basándose en la idea preconcebida de que el aguacatero está adaptado a suelos de fertilidad media a baja. En la mayoría de los huertos, las dosis de fertilización utilizadas varían de 0 a 100 kg N ha⁻¹, y de 0 a 115 kg P₂O₅ y K₂O ha⁻¹ ([Salazar-García y Lazcano-Ferrat, 2001](#)). La recomendación de fertilización para las zonas aguacateras del Estado de México es (en kg ha⁻¹) 200-200-100 de N-P-K ([Villalba-Morales et al., 2015](#)).

En el Estado de México, el 74% de los productores realiza fertilizaciones químicas; sin embargo, el 56% fertiliza con fórmula maicera y el 18% aplica alguna otra fórmula, utilizando productos recomendados por distribuidores de insumos agropecuarios, sin conocer las necesidades particulares de las huertas. Aquí destaca el uso de una mezcla aguacatera proveniente del estado de Michoacán. Los resultados de [Rubí et al. \(2013\)](#) mostraron que más del 50% de los productores aplican fertilizante sin tener en cuenta los requerimientos de su plantación.

[Sangerman et al. \(2014\)](#) reportan que la fertilización del aguacatero en el Estado de México consta de 500 g de 18-46-00 por árbol, desde el trasplante hasta los dos años de edad. También se hace uso de estiércoles, triple 17 y sal con tierra. Del año en que inicia la producción y hasta los 15 años de edad, se aplican 6 kg de 18-46-00 por árbol.

[Salazar-García y Lazcano-Ferrat \(2001\)](#) indican que los huertos manejados científicamente pueden fácilmente producir rendimientos mayores a 25 t ha⁻¹ año⁻¹, minimizando al mismo tiempo el problema de alternancia.

2.5 Diagnóstico nutrimental foliar

2.5.1 Importancia y utilidad del diagnóstico nutrimental foliar

El análisis de tejido vegetal, usualmente conocido como análisis foliar, es una técnica de diagnóstico que permite utilizar la concentración mineral de las plantas como indicador de su situación nutrimental, asociada al logro de altos rendimientos y mejores características de calidad del producto cosechado, en relación con el grado de abastecimiento y disponibilidad nutrimental del sustrato, generalmente el suelo (Alcántar *et al.*, 2016). Dicho análisis constituye el producto de la integración de varios factores, tales como suelo, clima, edad, tipo de cultivo y manejo (Espinosa, 1994). El análisis foliar asume que la parte de la planta muestreada (generalmente la hoja) es el órgano que refleja el estado nutrimental de la planta. Además, se asume que existen relaciones estrechas entre: a) el suministro nutrimental del suelo y el rendimiento, b) el suministro nutrimental del suelo y la concentración foliar, y c) la concentración foliar y el rendimiento (Torri, 2005).

El análisis foliar tiene una gran importancia en el desarrollo de un programa anual de mantenimiento de la fertilización, ya que permite registrar estados incipientes de malnutrición. El hecho de que no aparezcan síntomas de deficiencia no significa que un suelo sea rico en determinado nutrimento. Muchas veces, la producción es limitada por la falta de un elemento en el suelo y la planta no muestra signos de carencia. A pesar de que la producción es afectada, el nivel del nutrimento no alcanza aún un valor suficientemente bajo para que la planta presente síntomas de su deficiencia. Es el estado conocido como “hambre oculta”, donde solamente un análisis foliar podrá identificar la deficiencia (Marín y Pérez, 1992).

Tradicionalmente se ha usado el análisis de suelo como el medio para obtener las recomendaciones de fertilización. Sin embargo, el uso exclusivo de este no se considera un enfoque satisfactorio, ya que los resultados por sí solos tienen poca utilidad porque son valores empíricos que pueden o no reflejar indirectamente la disponibilidad de un

nutrimento, mientras que el análisis foliar indica cuáles y cuánto de los nutrimentos han sido absorbidos por la planta (Marín y Pérez, 1992; Alcántar *et al.*, 2016).

El análisis foliar no excluye al análisis de suelo sino al contrario, ambos se complementan para una acertada solución del problema nutrimental. Se requiere una correcta interpretación del análisis foliar, así como el conocimiento de las características físicas y químicas del suelo para llegar a buenas recomendaciones sobre fertilización. Si el análisis foliar indicara un estado nutrimental adecuado y el rendimiento del cultivo fuera bajo, la causa no sería nutricional (Marín y Pérez, 1992).

2.5.2 Métodos de diagnóstico foliar

Lo que se persigue en un adecuado manejo nutrimental de huertos frutales es el aumento neto en los ingresos a través de una fertilización eficiente. La determinación de las necesidades nutrimentales de los frutales debe realizarse antes de establecer el potencial de rendimiento. Para esto, el análisis foliar ayuda en la identificación precisa de dichas necesidades, basado en la suposición de la relación positiva entre la dosis aplicada de algún nutrimento, la concentración foliar y el rendimiento (Etchevers, 1999; Savita *et al.*, 2016).

Los resultados de los análisis foliares pueden interpretarse con diversos enfoques. Para esto se han generado valores críticos o estándares, ya sea mediante modelos matemáticos o por examinación cualitativa de las respuestas a los fertilizantes (Salazar-García y Lazcano-Ferrat, 1999). Se han generado guías para determinar el estado nutrimental de algunos cultivos, entre ellos el aguacatero, tales como: valor crítico (Bates, 1971), intervalos de suficiencia (Embleton y Jones, 1966), índices de balance (Kenworthy, 1961) y DRIS (Walworth y Sumner, 1987). A continuación, se revisará el principio del método diagnóstico nutrimental compuesto (CND), que fue empleado en esta investigación.

2.5.2.1 Diagnóstico Nutricional Compuesto (CND)

El Diagnóstico Nutricional Compuesto (CND, por sus siglas en inglés), se fundamenta en el análisis de datos composicionales, el cual reconoce la dependencia entre nutrientes y resuelve el problema del sesgo producido por los componentes no determinados analíticamente, principalmente C, H y O, así como también las proporciones duales (bivariados) entre nutrientes o estudiados de forma aislada (univariados). El CND es una expansión multivariada del valor crítico y del sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS), porque toma en cuenta todas las relaciones posibles entre nutrientes, lo que mejora en el diagnóstico del estatus nutricional del tejido foliar ([Parent y Dafir, 1992](#)). El CND es considerado el mejor método para expresar el balance nutricional en tejido foliar ([Rozane et al., 2020](#)).

El análisis CND ha sido usado con éxito en México en cultivos de maíz ([Magallanes-Quintar et al., 2006](#)), nopal ([Blanco-Macías et al., 2006](#)), nogal ([García-Hernández et al., 2009](#)), pimiento ([Arroyo-Vargas et al., 2012](#)), chile ancho ([Ramírez-Chávez et al., 2016](#)) y chile jalapeño ([Ramírez-Ibarra et al., 2017](#)).

2.6 Diagnóstico de la fertilidad del suelo

2.6.1 Importancia y utilidad del diagnóstico nutricional del suelo

Se acepta que existen tres tipos de fertilidad del suelo: 1) la química, que determina su capacidad para abastecer en tiempo y forma los nutrientes que requiere un cultivo, 2) la física, que se refiere a los factores relacionados con la ubicación física de la solución del suelo, y 3) la biológica, que es la actividad de microorganismos. Un enfoque adecuado del diagnóstico debería incluir a los tres tipos de fertilidad ([Alcántar et al., 2016](#)).

El análisis de suelo es una herramienta de gran utilidad porque permite determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrientes en el suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la acidez

excesiva, la salinidad y las concentraciones tóxicas de algunos elementos, además de que permite determinar el grado de fertilidad del suelo. Aunque la fertilidad de un suelo sea adecuada, éste no necesariamente es productivo, debido a que existen otros factores que pueden limitar la producción. El análisis de suelo cumple dos funciones básicas: a) indica los niveles nutrimentales en el suelo y por lo tanto es útil para desarrollar un plan de fertilización, y b) sirve para monitorear en forma regular los cambios en la fertilidad del suelo que ocurren como consecuencia de la explotación agrícola ([Molina, 2002](#)).

2.6.2 Métodos de diagnóstico de la fertilidad del suelo

Aquí se privilegia la fertilidad química, la cual se basa en el diagnóstico del estado nutrimental de los suelos. Los análisis químicos son de dos tipos. Los primeros miden una característica que se asocia con la fertilidad de los suelos de manera indirecta ya que no miden la disponibilidad nutrimental, pero son indicadores de lo que se puede esperar con respecto a dicha disponibilidad, por ejemplo, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, acidez intercambiable, y capacidad de intercambio catiónico. Los segundos dan indicación sobre la disponibilidad nutrimental en el suelo, los cuales no son las verdaderas cantidades disponibles de un elemento, sino alguna fracción de ésta, como la soluble, intercambiable, extraíble, fijada o mineralizable. Para que los valores obtenidos en el laboratorio tengan significado agronómico (interpretación) se requiere de un necesario conocimiento de la teoría que soportan, además de establecer una correlación cuantitativa con variables de respuesta del cultivo, como rendimiento, calidad, producción de biomasa, etc. A esto se le conoce como calibración, la cual debe ser específica para el cultivo de interés, en una región determinada ([Etchevers, 1999](#); [Alcántar et al., 2016](#)).

Actualmente existen tablas de fertilidad, usadas para la interpretación de los análisis de suelos, las cuales contienen valores de referencia de los nutrimentos. El diseño de estas tablas se realiza con información derivada de investigaciones en calibración y correlación, y con experiencia acumulada por laboratorios y especialistas en el tema ([Molina, 2002](#); [NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)), y su interpretación es la siguiente:

- Si el contenido de un elemento es “bajo”, se espera respuesta a la aplicación de un fertilizante que contenga dicho elemento.
- Si el contenido es “medio”, se asume que la respuesta a la aplicación de un fertilizante que contenga dicho elemento no es significativa en un incremento en producción.
- Si el contenido es “alto” significa que no hay respuesta a la aplicación del fertilizante que contenga este elemento.

2.6.2.1 Fertilización de sitio específico

En México, las recomendaciones de fertilización empleadas en las distintas regiones productoras de aguacatero son muy generales y tienden a ser usadas en grandes superficies productoras sin considerar las variaciones en la fertilidad de los suelos ni la condición nutrimental de los árboles. Esto ocasiona que frecuentemente se apliquen menos nutrimentos de los necesarios para alcanzar la máxima producción de los huertos o que se incurra en la sobre fertilización, propiciando desbalances nutrimentales que además de limitar la productividad, contaminan los mantos acuíferos, especialmente con nutrimentos lixiviabiles como el nitrógeno ([Salazar-García et al., 2009](#)).

La fertilización de sitio específico permite maximizar la producción, tamaño y calidad del fruto ya que considera el estatus nutrimental del suelo y del árbol, una meta de rendimiento y la eficiencia en la aplicación del fertilizante ([Salazar-García et al., 2009](#)).

La aplicación de fertilizantes debe realizarse considerando las necesidades del árbol, las características físicas y químicas del suelo, las condiciones de cultivo y la fenología del árbol. Esto implica que, en cada región, cada huerto debe tener su programa de fertilización. El enfoque de fertilización de sitio específico considera el tipo y cantidad de nutrimentos necesarios en cada huerto por lo que su uso incrementa a corto plazo la producción y calidad del fruto, además de disminuir la contaminación ambiental por la excesiva aplicación de ciertos fertilizantes ([Salazar-García et al., 2014b](#)).

La fertilización de sitio específico puede incrementar y mantener los rendimientos mediante la optimización del balance entre el suministro y la demanda nutrimental y el

uso eficiente de los materiales fertilizantes, lo que reduce, en el caso del nitrógeno, las emisiones de óxido nitroso (N_2O) y pérdidas por volatilización y lixiviación ([Richards et al., 2015](#)).

[Salazar-García y Lazcano-Ferrat \(2003\)](#) observaron un reverdecimiento de la parte aérea de los árboles cinco meses después de iniciada su práctica de fertilización de sitio específico, seguida de la presencia de más brotes y un retardo en la defoliación de invierno. Se consideró que el rendimiento de fruta del huerto experimental dos años antes de iniciar el estudio era de 8 a 10 t ha⁻¹, posteriormente se observó un gran incremento promedio que llegó a más de 32 t ha⁻¹.

La fertilización de sitio específico permite maximizar la producción, tamaño y calidad del fruto ya que considera el estatus nutrimental del suelo y del árbol, así como una meta de rendimiento ([Salazar-García et al., 2009](#)).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de la región aguacatera de Tejupilco

La región aguacatera del municipio de Tejupilco se encuentra en la comunidad de Pueblo Nuevo Tenería (18.972778, -100.092500), el cual está a una altitud de 1765 m y cuenta con un clima subtropical con invierno seco y verano cálido (Cwa). La temperatura media anual es de 18.3 °C, mientras que la máxima y mínima son 25.5 °C y 11.0 °C, respectivamente. La precipitación anual es de 1,340 mm, con una marcada época lluviosa de junio a octubre (**Figura 9**).

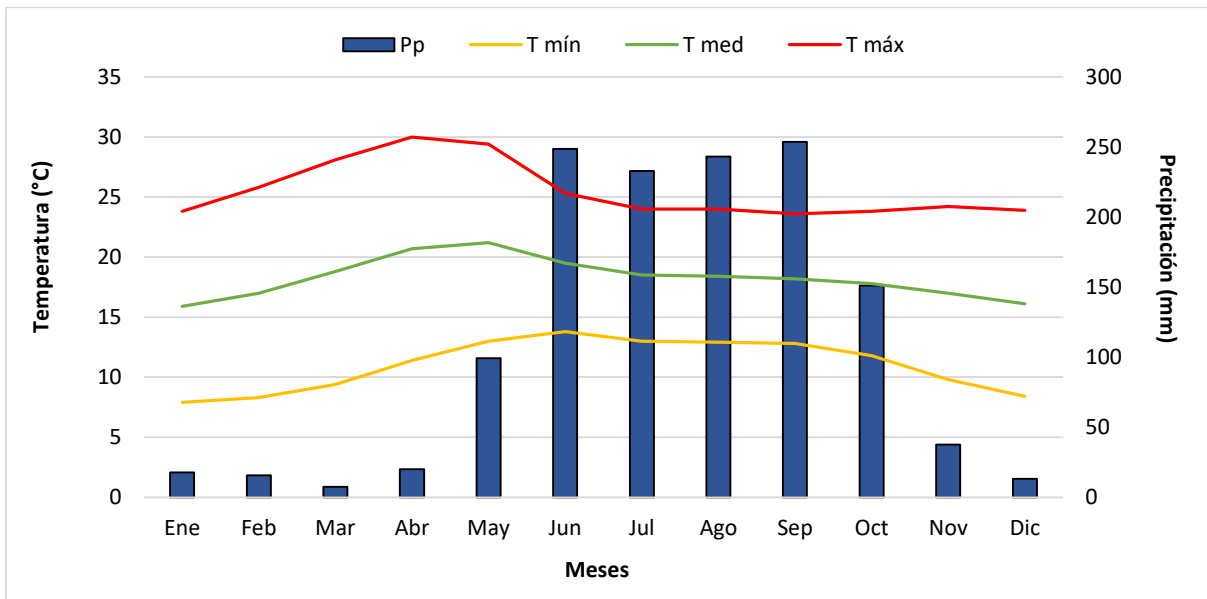


Figura 9. Climograma de la comunidad de Tenería, Tejupilco, Estado de México. Pp=Precipitación pluvial; T mín=Temperatura mínima; T med=Temperatura media; T máx=Temperatura máxima. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

El relieve es montañoso con vegetación dominante en pino y encino. La clase de suelos más dominante (conforme al sistema WRB en la región es el Acrisol, el cual se extiende a San Simón de Guerrero y Temascaltepec, municipios también productores de aguacate. Los suelos acrisoles se caracterizan por ser ácidos y jóvenes de color rojizo a amarillo. Se consideran de baja fertilidad porque poseen baja capacidad de intercambio

catiónico y baja saturación de bases. La pobreza de nutrientes, el riesgo de toxicidad por Al^{3+} , la fuerte adsorción de fosfato y la alta susceptibilidad a la erosión, son las principales restricciones a su uso. Aun así, es apropiado para el cultivo de especies como aguacate, guayaba, café y durazno, si se realiza un manejo adecuado de la fertilización y conservación (FAO, 2008; Sotelo, 2020).

3.2 Sitio de estudio y manejo del huerto

La investigación se realizó en un huerto comercial de tres hectáreas de superficie, con árboles de 11 años de edad, variedad Hass, injertados sobre aguacate criollo mexicano (*Persea americana* var. *drymifolia*), establecidos a 6 x 6 m, cultivados con riego y con lluvia anual de 1,340 mm, distribuida de junio a octubre, y suelos acrisoles. Dicha unidad se localiza en la zona baja de la comunidad de Pueblo Nuevo Tenería, municipio de Tejupilco, Estado de México (18.985000, -100.101667), a una altitud de 1,769 msnm.

El huerto es joven, por lo que se considera que aún no presenta una producción estable, teniendo rendimientos que no superan las 10 t ha^{-1} (Figura 10), presentando el fenómeno de alternancia productiva. Por años, se ha observado un gradiente de fertilidad que va en sentido de la pendiente (9%), siendo la parte Este la zona que presenta la mayor producción.

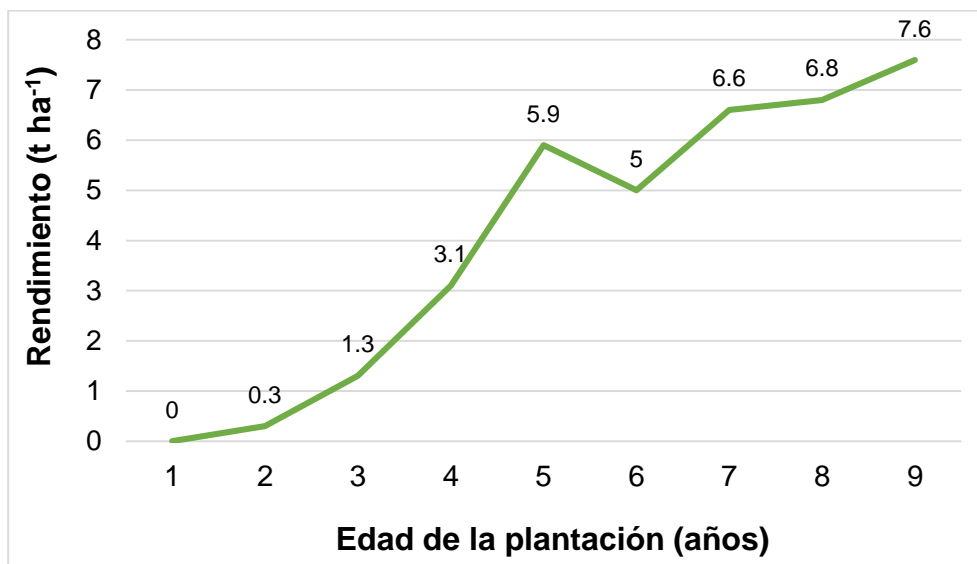


Figura 10. Rendimiento observado en la zona de estudio en Tejupilco, Estado de México.

El cultivo se lleva bajo un esquema de manejo integrado, donde intervienen conceptos tanto orgánicos como químicos, empezando por el control de plagas, que se lleva a cabo mediante la aspersión de preparados como el caldo sulfocálcico (a base de hidróxido de calcio y azufre agrícola) para el control de araña roja (*Oligonychus punicae*) y araña cristalina (*Oligonychus perseae*) y el caldo bordelés (a base de hidróxido de calcio y sulfato de cobre) contra roña del fruto (*Sphaceloma perseae*). El manejo del barrenador de las ramas (*Copturus aguacatae*) se basa en un control mecánico, que consiste en podar e incinerar las ramas que presenten daños del insecto. El crecimiento de la maleza también se controla de manera mecánica durante las lluvias y antes de las cosechas de julio y diciembre.

El aporte de materia orgánica ha sido una práctica importante, pues año con año se aplica o bien estiércol bovino o caprino, o compost de champiñón, alrededor de 60 kg árbol⁻¹ año⁻¹. Desde el 2017 no se ha aplicado ningún fertilizante químico al suelo y el suministro nutrimental se realiza principalmente por vía foliar, aplicando sales minerales en solución diluida, sin perseguir un objetivo específico, lo que se ve reflejado en síntomas visuales de deficiencia nutrimental, como se observa en la **Figura 11**.

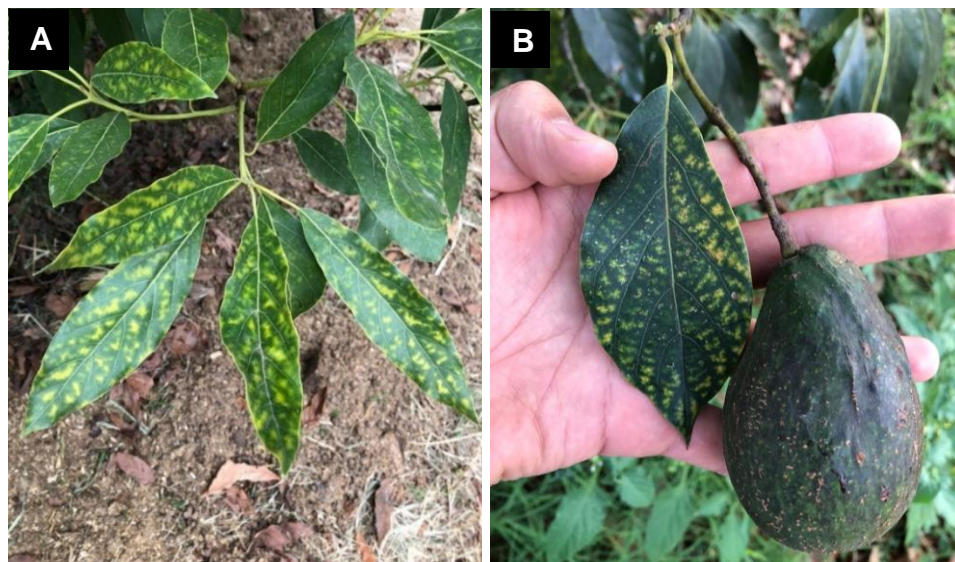


Figura 11. Síntomas visibles de deficiencia nutrimental en la zona de estudio. **A.** Hojas con moteado clorótico. **B.** Hoja con moteado clorótico y fruto con malformación.

3.3 Diagnóstico nutrimental del suelo

3.3.1 Delimitación de las unidades y sitios de muestreo del suelo

Se realizó la división de unidades de muestreo dentro del huerto, considerando características de productividad similares y en sentido transverso a la pendiente (poniente – oriente), con el objetivo de conocer la variación en la cantidad de nutrientes disponibles para el cultivo (**Figura 12**).

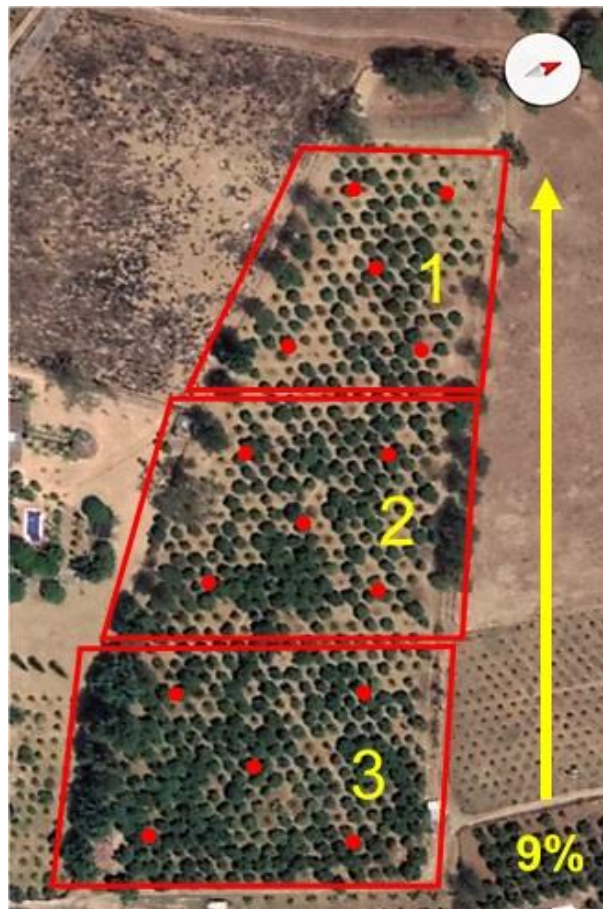


Figura 12. Delimitación de las unidades de muestreo de suelo y ubicación de los sitios de muestreo.

3.3.2 Método de muestreo

En cada unidad se eligieron cinco árboles equidistantes entre sí como puntos de muestreo, de los cuales se obtuvieron cuatro submuestras por punto, de acuerdo con cada punto cardinal, siguiendo la metodología descrita en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 ([NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)).

3.3.3 Análisis de suelos

La determinación del pH y la conductividad eléctrica del suelo se realizaron usando un medidor portátil de pH, conductividad y temperatura (Corning, modelo PC18, Puebla, México), en extracto de pasta saturada, siguiendo la metodología referida en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 ([NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)). Asimismo, la concentración de SO_4^{2-} se midió en el extracto de pasta saturada por turbidimetría, de acuerdo con lo indicado en la norma oficial antes citada.

La cuantificación de N inorgánico total, de P, de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) y de metales extractables (Fe, Cu, Zn y Mn) se realizaron con las metodologías micro Kjeldahl, Bray, de acetato de amonio y extracción con ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA), respectivamente, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 ([NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)).

El NO_3^- y el NH_4^+ se extrajeron usando una solución KCl 2 N y se cuantificaron mediante destilación por arrastre de vapor y titulación ([Bremner, 1965](#)).

La determinación del B soluble en agua caliente (relación suelo:agua 1:10, p:v) se realizó empleando un equipo de espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado antes indicado ([ALS Environmental Hawarden, 2019](#)).

La densidad aparente del suelo se estimó siguiendo el método de la parafina y la textura de suelo se determinó con el método de Bouyoucos ([NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)).

3.4 Diagnóstico nutrimental foliar

3.4.1 Niveles de suficiencia foliar

Se revisaron en la literatura las concentraciones foliares de nutrimentos, asociadas con un óptimo estado nutrimental del aguacatero y altos rendimientos. Los datos de concentraciones nutrimentales obtenidos se presentan en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Niveles de suficiencia foliar en el cultivo del aguacate.

Elemento	Concentración foliar										
N (%)	1.800	1.800	1.800	1.800	2.100	1.900	2.350	2.400	2.200	2.100	2.200
P (%)	0.165	0.165	0.165	0.165	0.175	0.175	0.14	0.165	0.195	0.165	0.195
K (%)	1.375	1.375	1.375	1.375	1.375	1.625	1.37	1.355	1.45	0.950	1.450
Ca (%)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.25	1.86	2.000	2.000	1.900	2.000
Mg (%)	0.525	0.525	0.525	0.525	0.525	0.575	0.58	0.525	0.525	0.690	0.525
S (%)	0.400	n. r.	0.400	0.400	0.400	0.525	0.400	0.445	0.400	n. r.	0.400
Fe (ppm)	125.000	125.000	125.000	125.000	125.000	120.000	91.000	125.000	125.000	99.000	125.000
Mn (ppm)	265.000	265.000	265.000	265.000	265.000	257.000	240.000	265.000	265.000	134.000	265.000
Zn (ppm)	90.000	75.000	90.000	90.000	90.000	n. r.	27.000	90.000	60.000	35.000	60.000
Cu (ppm)	10.000	10.000	27.000	10.000	10.000	9.000	10.000	10.000	10.000	19.000	10.000
B (ppm)	75.000	90.000	75.000	75.000	75.000	120.000	75.000	75.000	50.000	239.000	50.000
Referencia	Embleton y Jones (1964)	Embleton y Jones (1972)	Chapman (1973)	Lahav y Kadman (1980)	Goodall <i>et al.</i> (1981)	Rowley (1992)	Salazar- García y Lazcano- Ferrat (1999)	Salazar- García (2002)	Lemus (2005)	Maldonado <i>et al.</i> (2007)	Ruiz y Ferreira (2011)

n. r.=no reportado

Con los datos de suficiencia nutrimental investigados, se realizó un promedio por nutrimento y se obtuvo la desviación estándar para cada uno de ellos (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Referencia de suficiencia nutrimental foliar para el cultivo del aguacate.

Elemento	Unidad de concentración	Promedio	Desviación estándar
N	%	2.04	0.23
P		0.17	0.01
K		1.37	0.15
Ca		2.00	0.09
Mg		0.54	0.05
S		0.41	0.04
Fe	ppm	119.00	12.00
Mn		250.00	39.00
Zn		70.00	24.00
Cu		12.00	5.00
B		90.00	52.00

3.4.2 Datos de extracción nutrimental en función del rendimiento

En la literatura se investigaron las cantidades de nutrimentos que deben ser removidas del suelo por los árboles para obtener una determinada producción (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Extracción nutrimental del cultivo de aguacate.

Elemento	g-100 kg	kg-t	kg-t	kg-10 t	kg-20 t
N	257.0	3.1520	2.73000	11.30	51.50
P	103.0	0.7360	0.72000	1.70	20.60
K	469.0	3.5300	4.00000	19.50	93.80
Ca	8.4	0.5470	0.23000	2.10	1.70
Mg	29.5	0.4740	0.46000	5.00	5.90
S	34.5	0.1830	n. r.	8.00	6.90
Fe	0.6	0.0074	0.00937	0.09	0.12
Mn	0.1	0.0020	0.00154	0.02	0.02
Zn	0.4	0.0045	0.00406	0.04	0.08
Cu	0.2	0.0030	0.00246	0.01	0.04
B	0.4	0.0037	0.00547	0.04	0.08
Referencia	Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2001)	Avilán <i>et al.</i> (1986)	Maldonado <i>et al.</i> (2007)	Lahav y Kadman (1980)	Salazar-García y Lazcano-Ferrat (2001)

n. r.=no reportado

En seguida se realizó un promedio de cada nutrimento para conocer las cantidades necesarias para el cultivo si se desea alcanzar la meta de rendimiento (**Cuadro 4**). Debido a que el huerto tuvo un rendimiento de 8 t ha⁻¹ la temporada anterior al estudio (julio-diciembre 2018), se decidió seleccionar la meta de rendimiento de 10 t ha⁻¹.

Cuadro 4. Promedios de extracción nutrimental.

Elemento	kg-t	kg-5 t	kg-10 t	kg-15 t	kg-20 t
N	2.395	11.977	23.955	35.932	47.910
P	0.664	3.320	6.640	9.960	13.280
K	3.542	17.712	35.425	53.137	70.850
Ca	0.456	2.283	4.567	6.851	9.135
Mg	0.432	2.161	4.322	6.483	8.645
S	0.442	2.213	4.426	6.640	8.853
Fe	0.007	0.039	0.079	0.119	0.158
Mn	0.001	0.008	0.016	0.024	0.032
Zn	0.004	0.020	0.041	0.062	0.082
Cu	0.002	0.010	0.021	0.031	0.042
B	0.004	0.021	0.042	0.064	0.085

3.4.3 Diagnóstico nutrimental foliar

3.4.3.1 Delimitación de las unidades de muestreo foliar y ubicación de los sitios de muestreo

Se definieron y delimitaron tres unidades de muestreo de suelo referidas en el apartado 3.3.1 e ilustradas en la **Figura 10**, las cuales fueron subdivididas en sentido norte – sur, para el muestreo vegetal, resultando en nueve unidades de muestreo (**Figura 13**), siguiendo el protocolo descrito por [Campos y Calderón \(2015\)](#).



Figura 13. Unidades de muestreo de tejido foliar.

3.4.3.2 Métodos de muestreo

Las muestras foliares se tomaron en el mes de agosto 2020, correspondiente a hojas (lámina foliar y pecíolo), maduras, pero no senescentes, de brotes terminales sin fructificar provenientes del flujo de primavera, sanas (sin daños físicos, químicos ni afectados por plagas o enfermedades), de siete meses de edad y orientadas en los cuatro puntos cardinales ([Maldonado, 2002](#)).

3.4.3.3 Análisis de concentración de nutrimentos en hojas

Las nueve muestras compuestas se colocaron en bolsas de papel para su conservación, previo a su preparación y análisis.

En el laboratorio, las muestras fueron lavadas con agua destilada, posteriormente se secaron durante 48 h en una estufa de aire forzado (Riossa, modelo HCF-125; Guadalajara, México), a una temperatura de 70 °C. Posteriormente, se molieron a un tamaño de partícula de 2 mm empleando un molino de material vegetal Wiley.

La concentración foliar de N se realizó mediante el método semi micro Kjeldahl, en el extracto resultante de la digestión húmeda de tejido seco y molido, usando una solución al 3.3 % de $C_7H_6O_3$ en H_2SO_4 concentrado (Alcántar y Sandoval, 1999).

Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, y B se midieron mediante espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado (ICP-AES 725-ES, Agilent, Santa Clara, CA, USA), en el extracto proveniente de digestión de material seco de hoja con $HNO_3:HClO_4$ (2:1, v:v).

3.4.3.4 Diagnóstico Nutricional Compuesto (CND)

En el Diagnóstico Nutricional Compuesto (CND) se considera que la composición del tejido vegetal forma un arreglo (S^D), D dimensional de nutrientes; es decir, el tejido está compuesto de d nutrientes más un valor de relleno X_D que representa los nutrientes no determinados (Parent y Dafir, 1992; Khiari *et al.*, 2001; Blanco-Macías *et al.*, 2006; Arroyo-Vargas *et al.*, 2012).

$$S^D = [(N, P, K, \dots, X_D) : N > 0, P > 0, K > 0, \dots, X_D > 0 ; \quad [1]$$

$$N + P + K + \dots + X_D = 1]$$

Donde 1 representa la concentración total de elementos en base materia seca (100 %); N, P, K, ..., son las proporciones de nutrientes y X_D es el nutriente de relleno, estimado al considerar el 100 % y la suma de las d proporciones de nutrientes como sigue:

$$X_D = 1 - (N + P + K + \dots) \quad [2]$$

Esas proporciones se hacen invariantes en escala (proporciones centradas) después de que se dividen por la media geométrica g :

$$g = (N * P * K * \dots * X_D)^{1/D} \quad [3]$$

Después, se determinan los valores Z_i (variable sin unidades), calculando los logaritmos de las proporciones centradas de cada nutriente:

$$Z_N = \log\left(\frac{N}{g}\right); Z_P = \log\left(\frac{P}{g}\right); Z_K = \log\left(\frac{K}{g}\right); Z_{X_D} = \log\left(\frac{X_D}{g}\right) \quad [4]$$

De manera que:

$$Z_N + Z_P + Z_K + \dots + Z_{X_D} = 0 \quad [5]$$

En seguida, se restan las expresiones z_i de la norma a las Z_i de la muestra foliar y se divide por la desviación estándar (S) para obtener los índices I_{z_i} .

$$I_{z_i} = \frac{Z_i - z_i}{S} \quad [6]$$

Por último, se compara la media geométrica de la muestra con la media geométrica de referencia, para interpretar los valores I_{z_i} y obtener el orden de limitación nutrimental, de acuerdo con la tabla interpretativa (**Cuadro 5**).

Cuadro 5. Tabla interpretativa para valores I_{zi} .

Igualdad o desigualdad	Valores I_{zi}		
	$X_i < x_i$	$X_i = x_i$	$X_i > x_i$
$g(X) < g(x)$	a	>0	>0
$g(X) = g(x)$	<0	0	>0
$g(X) > g(x)$	<0	<0	a

$I_{zi} < 0$: deficiencia nutrimental relativa, $I_{zi} = 0$: balance nutrimental. $I_{zi} > 0$: Exceso nutrimental relativo. X_i , x_i y $g(X)$, $g(x)$; nivel del nutriente X_i y la media geométrica del arreglo composicional para la muestra independiente y la referencia, respectivamente. La tendencia por “a” depende la magnitud de la desigualdad (Parent y Dafir, 1992).

3.5 Recomendación de fertilización

Con los datos de extracción nutrimental (**Cuadro 4**), se realizaron los cálculos necesarios para establecer una recomendación de fertilización para una meta de rendimiento de 10 t ha⁻¹, tomando en cuenta lo recomendado en la literatura, el orden de limitación nutrimental generado por el análisis CND, la capacidad de suministro nutrimental del suelo y la eficiencia en el uso de fertilizantes químicos (Mortvedt, 1994; Baligar *et al.*, 2001; Cassman *et al.*, 2002; Castro-Luna *et al.*, 2006; Stewart, 2007).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diagnóstico nutrimental del suelo

Los resultados de los análisis indican que el suelo en el que está establecido el huerto tiene textura franca, un pH moderadamente ácido y un nivel medio de materia orgánica (**Cuadro 6**).

La determinación de conductividad eléctrica indicó efectos despreciables de salinidad del suelo, con valores menores a 1 dS m^{-1} (**Cuadro 6**); dicha condición es adecuada para el desarrollo del aguacatero debido su alta sensibilidad a la salinidad ([Coria, 2008](#); [Castro et al., 2015](#)).

En cuanto a los nutrimentos analizados, tanto el N inorgánico (NH_4^+ y NO_3^-) como el N total resultaron muy altos, este último como resultado de las reservas de N presentes en la materia orgánica, ya que alrededor del 90% del N total del suelo se encuentra en formas orgánicas complejas. Los demás macronutrimentos (P, Ca, Mg y S), presentaron un nivel bajo, excepto el K del cual se registraron altas concentraciones en suelo.

Los micronutrimentos Fe, Mn, y Cu presentaron niveles adecuados; el Zn registró un nivel marginal; por otra parte, el B tuvo un nivel clasificado como muy bajo (**Cuadro 6**; [NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)).

El Na^+ intercambiable mostró concentraciones en suelo comparables con las de K^+ intercambiable en las zonas 1 y 2. En este contexto, los suelos sódicos son clasificados utilizando como parámetros la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). La RAS está basado en la concentración de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; mientras que, el PSI es la proporción de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ocupada por el Na^+ , y es expresado como porcentaje. Para que un suelo se considere sódico, debe tener un $\text{PSI} > 15$ o una $\text{RAS} > 13$ ([Alcántar et al., 2016](#)). En este estudio la zona 1 presentó un $\text{PSI} = 21.62$ y la zona 2 un $\text{PSI} = 26.82$, indicando un problema de sodicidad del suelo.

Cuadro 6. Resultados del análisis de suelo.

Determinación	Número de unidad de muestreo de suelo		
	1	2	3
pH	5.84	5.73	5.68
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.29	0.24	0.35
Materia orgánica (%)	6.50	7.78	8.62
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	26.60	42.00	65.80
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	28.35	26.60	29.40
N total (%)	0.28	0.26	0.29
P (mg kg ⁻¹)	2.69	3.13	3.53
K (cmol _c kg ⁻¹)	1.04	1.10	1.32
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	2.01	2.13	2.17
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0.70	0.58	0.63
Na (cmol _c kg ⁻¹)	1.03	1.40	0.55
Fe (mg kg ⁻¹)	13.17	10.60	12.12
Mn (mg kg ⁻¹)	2.46	3.07	4.49
Zn (mg kg ⁻¹)	0.54	0.70	0.79
Cu (mg kg ⁻¹)	0.79	1.06	0.74
B (mg kg ⁻¹)	0.04	0.02	0.03
SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	10.59	9.94	11.43
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.136	0.839	0.900
Arena (%)	36.56	40.56	42.56
Limo (%)	36.00	38.00	38.00
Arcilla (%)	27.44	21.44	19.44
Clase textural	Franco	Franco	Franco

4.2 Diagnóstico nutrimental foliar

Los resultados del análisis químico foliar se presentan en el **Cuadro 7**. De acuerdo con los valores de referencia nutrimental foliar (**Cuadro 1**), el N fue el único elemento en el análisis de tejido vegetal que superó su valor óptimo de referencia en las nueve subparcelas, indicativo de un buen suministro por parte del suelo. El P, Ca, Mg y S se encontraron por debajo del óptimo nutrimental en todas las subparcelas, concordando estos resultados con los bajos niveles de estos elementos en el suelo. Es destacable el hecho de que la concentración foliar de K también mostró niveles inferiores al óptimo, a pesar de que en el suelo se tuvieron niveles de K clasificados como altos ([NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)). Ninguno de los micronutrientes analizados (Fe, Mn, Zn, Cu, y B), alcanzó la concentración foliar óptima de referencia respectiva, aun cuando el Fe, Mn y Cu se encontraron en niveles adecuados en el suelo ([NOM-021-RECNAT-2000, 2002](#)).

Cuadro 7. Resultados del análisis químico foliar.

Elemento	Número de unidad de muestreo foliar								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N (%)	2.55	2.79	2.62	2.65	2.94	2.72	2.40	2.26	2.42
P (%)	0.08	0.09	0.08	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06
K (%)	0.42	0.49	0.46	0.39	0.35	0.33	0.36	0.34	0.31
Ca (%)	1.24	1.21	1.20	1.17	1.37	1.32	1.33	1.08	1.13
Mg (%)	0.48	0.46	0.46	0.35	0.45	0.43	0.37	0.33	0.37
S (%)	0.18	0.19	0.18	0.15	0.18	0.17	0.14	0.13	0.15
Fe (ppm)	69.00	79.00	79.00	80.00	84.00	73.00	82.00	73.00	82.00
Mn (ppm)	121.00	134.00	166.00	208.00	235.00	239.00	294.00	319.00	346.00
Zn (ppm)	12.00	14.00	14.00	14.00	15.00	13.00	15.00	14.00	14.00
Cu (ppm)	6.00	7.00	7.00	6.00	7.00	5.00	6.00	5.00	5.00
B (ppm)	21.00	22.00	23.00	18.00	19.00	17.00	16.00	16.00	16.00

4.3 Orden de limitación nutrimental

Las medias geométricas de las nueve muestras foliares analizadas, así como los valores I_{zi} (índices CND) son mostrados en el **Cuadro 8**. Todas las medias de las muestras resultaron menores a la media de referencia, por lo que la concentración de cada elemento que fue igual o mayor a su referencia, resultó en un exceso nutrimental relativo. En el caso contrario, se hizo uso de los índices para observar su magnitud y con base en eso decidir el orden de limitación (**Cuadro 9**).

Cuadro 8. Índices CND (I_{zi}) que señalan la magnitud de la limitación (valores con signo negativo) o de exceso (valores con signo positivo) nutrimental de cada muestra particular.

Elemento	Número de unidad de muestreo foliar								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N	1.67	1.71	1.61	1.76	1.76	1.78	1.55	1.59	1.62
P	0.58	0.84	-1.87	-4.86	-2.43	-3.81	-8.17	-7.25	-6.14
K	-1.35	-1.11	-1.31	-1.57	-2.09	-2.06	-1.79	-1.77	-2.12
Ca	0.87	0.45	0.44	0.66	0.91	1.13	1.16	0.60	0.57
Mg	4.69	3.73	3.72	2.14	3.34	3.64	2.47	2.18	2.58
S	-1.58	-1.78	-1.95	-3.45	-2.37	-2.17	-4.22	-3.93	-3.26
Fe	47.02	71.38	71.57	100.60	81.43	62.39	106.54	94.46	113.29
Mn	-6.14	-1.98	21.74	54.81	56.96	68.45	91.49	109.12	112.42
Zn	-187.95	-178.46	-176.78	-156.95	-167.78	-172.40	-156.51	-149.91	-159.43
Cu	57.50	83.73	39.35	60.77	101.49	-54.78	45.56	-110.81	-79.87
B	-65.32	-66.59	-61.11	-77.02	-80.37	-79.41	-84.27	-81.61	-85.71
Media geométrica	0.000858	0.000917	0.000913	0.000849	0.000941	0.000864	0.000861	0.0796	0.0839

Cuadro 9. Orden de limitación nutrimental de cada zona de muestreo foliar.

Zona	Orden de limitación
1	Zn > B > Mn > S > K
2	Zn > B > Mn > S > K
3	Zn > B > S > P > K
4	Zn > B > P > S > K
5	Zn > B > P > S > K
6	Zn > B > Cu > P > S > K
7	Zn > B > P > S > K
8	Zn > Cu > B > P > K
9	Zn > B > Cu > P > S > K

El primer lugar dentro del orden de limitación en todas las zonas estudiadas lo ocupó el Zn, y en segundo lugar el B (**Cuadro 9**). Las deficiencias de estos dos nutrimentos son comunes y han sido reportadas en muchas áreas subtropicales donde se cultiva aguacate de manera comercial (Crowley y Smith, 1996; Salazar-García *et al.*, 2014a).

El grado de limitación tan importante que presenta el Zn refleja su bajo nivel en el suelo (**Cuadro 6**), el cual puede ser explicado en primer lugar por la baja capacidad de intercambio catiónico del suelo, característica de suelos francos y arenosos (Rieuwerts, 1998). Se ha demostrado la gran afinidad que tiene el Zn por las arcillas (Andersson, 1979) pero la gran mayoría de las cargas negativas de sus superficies están ocupadas por las bases Ca^{2+} , K^+ , Na^+ y Mg^{2+} , además de otros cationes, por tanto, la cantidad de Zn adsorbida no es suficiente para abastecer los requerimientos del cultivo.

Otro factor para la deficiencia de Zn es alta presencia del ion NO_3^- que promueve su solubilidad y por tanto también su lixiviación (Alcántar *et al.*, 2016). Además, el Fe presente en el suelo pudiera estar agudizando la situación, puesto que Zn y Fe presentan una relación antagónica en su absorción por el cultivo (Sequi, 2004).

Al igual que con el Zn, la deficiencia B es resultado de su baja concentración en el suelo. Además, el contenido de materia orgánica juega un papel preponderante en la

disponibilidad de B, ya que los coloides húmicos tienen una alta afinidad por este micronutriente, lo que dificulta su liberación hacia la solución del suelo, que es de donde las plantas pueden absorberlo (Yermiyahu *et al.*, 2001; Ahmad *et al.*, 2012). En este estudio, se aprecia que la deficiencia relativa de B (valores I_{zi} más negativos) se incrementa a medida que también lo hace el contenido de materia orgánica.

Hay estudios que indican que la textura influye en la disponibilidad del B y que los suelos arcillosos tienen mucha más capacidad de adsorber B que los suelos francos y arenosos (Communar y Keren, 2006; Ahmad *et al.*, 2012). En este estudio no se observó relación entre el contenido de arcilla en el suelo y la disponibilidad del B.

De igual manera, Communar y Keren (2006) demostraron que el grado de adsorción de B en los suelos estudiados fue bastante dependiente del pH, incrementándose bruscamente a medida que el pH aumentaba de 7.0 a 9.2. Sin embargo, aquí no se encontró relación entre el pH del suelo y la disponibilidad del B.

El Mn ocupó el tercer lugar en limitación nutrimental solamente en las zonas 1 y 2, situación que puede deberse a la presencia de Mg, que presentó los niveles más elevados en toda la zona alta del huerto (zonas 1, 2 y 3). En general, la absorción de Mn se ve afectada por la presencia de Ca y Mg, debido a la similitud en sus propiedades químicas con estos elementos alcalinos (Mousavi *et al.*, 2011).

De igual manera, la alta presencia de Fe en el suelo puede estar interfiriendo en la absorción de Mn; este antagonismo ya ha sido documentado, y es debido a que la absorción de estos dos micronutrientes ocurre a través de transportadores de membrana comunes, como es el caso de la familia de transportadores de metales de transición de proteínas asociadas a macrófagos de resistencia natural (Nramp, del inglés: natural resistance macrophage-associated protein) (Rietra *et al.*, 2017).

Por otra parte, está documentado que la capacidad del suelo para retener iones de elementos de transición (como lo es el Mn) a determinado pH, es reforzada por la adsorción de fosfato sobre la superficie de los óxidos presentes; es decir, la adsorción de fosfato tiene un efecto positivo en la adsorción de cationes (Diaz-Barrientos *et al.*, 1990; Neilsen *et al.*, 1992). Por tanto, es posible que la presencia de P resulte en el

incremento en la adsorción de Mn, causando una reducción en su concentración en la solución del suelo y por tanto en su disponibilidad.

Algunos autores han reportado la interacción del P con Mn (Barben *et al.*, 2010); Nogueira *et al.* (2004) observaron que el aumento en la concentración de P en el cultivo de soya, redujo la acumulación de Mn e incluso mitigó los síntomas de toxicidad. En trigo, Neilsen *et al.* (1992) notaron que la concentración foliar de Mn fue reducida en suelos con mucho P. Por otro lado, en papa y tomate se ha observado una reducción en la concentración de P foliar, incrementando la concentración de Mn (Gunes *et al.*, 1998; Sarkar *et al.*, 2004). En este trabajo, se observa que, solamente en las zonas donde el P se encontró por encima del balance nutrimental (1 y 2), el Mn fue deficiente. Los datos indican una relación negativa entre estos elementos; así como la influencia del P en la absorción de Mn ($R^2 = 0.87$) (Figura 14).

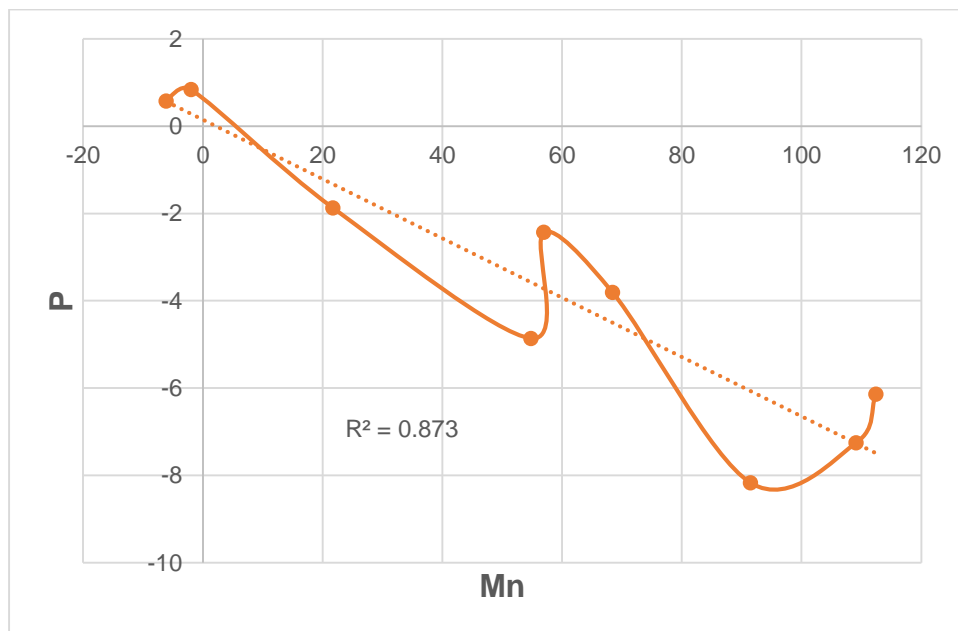


Figura 14. Relación de los índices CND para P y Mn en aguacatero establecido en Tejupilco, Estado de México.

Por su parte, la deficiencia relativa de P observada en las zonas 3-9, puede estar siendo provocada por los altos niveles de Fe en el suelo. La **Figura 15** señala una relación negativa entre los índices CND para P y Fe ($R^2 = 0.66$). En suelos ácidos, el proceso de fijación de P por Fe es como sigue: 1) el Fe altamente reactivo se hidroxila al encontrarse condiciones de humedad, 2) las condiciones ácidas del suelo provocan una protonación del hidroxilo, que le confiere propiedades de ácido de Lewis, 3) La protonación debilita el enlace Fe-OH y la electronegatividad del O es conferida al H, volviéndolo muy reactivo y fácilmente intercambiable con aniones orgánicos e inorgánicos en solución, 4) la protonación del hidroxilo puede desencadenar alguno de los dos procesos de adsorción de P: a) las superficies protonadas generan un campo eléctrico positivo que atrae iones fosfato; y b) el fosfato reemplaza los grupos hidroxilo protonados (Fink *et al.*, 2016). En este estudio el pH del suelo es considerado moderadamente ácido con valores oscilando entre 5.63 y 5.84 (**Cuadro 6**).

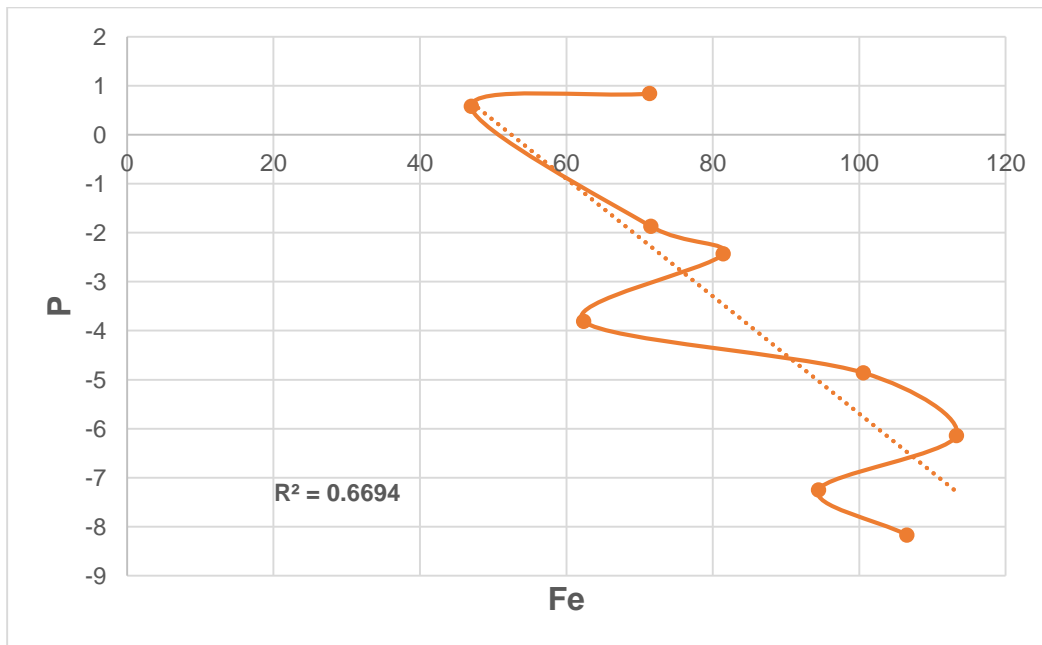


Figura 15. Relación de los índices CND para P y Fe en aguacatero establecido en Tejupilco, Estado de México.

Los índices correspondientes a S indicaron una deficiencia relativa en todas las zonas muestreadas. Si bien la aspersion de caldo sulfocálcico (polisulfuro de calcio) es una práctica importante en el huerto, la cantidad que se aplica es insignificante para abastecer el requerimiento del cultivo, ya que el objetivo no es la nutrición de S o de Ca por vía foliar, sino el control fitosanitario, además de que no se le ha dado importancia a la aplicación de S al suelo.

A pesar de la alta concentración de K^+ intercambiable en el suelo, los valores I_{zi} derivados del análisis foliar, lo posicionaron dentro de los elementos deficientes; aunque en el último lugar en el orden de limitación, apenas por debajo del balance nutrimental. Estos resultados pueden ser debidos a la inhibición en la absorción de K^+ causada por la alta concentración de Na^+ en el suelo; particularmente en los suelos de las zonas 1 y 2 la relación $K^+:Na^+$ en el complejo de intercambio fue de 1 y 0.79, respectivamente (**Cuadro 6**). [Alcántar et al. \(2016\)](#) señalan que los niveles de Na intercambiable son semejantes a aquellos de K intercambiable en suelos de regiones húmedas. Dada la similitud en las propiedades físicas y químicas entre el Na^+ y el K^+ , ambos compiten en el proceso de absorción, en particular a través de transportadores de potasio de alta afinidad (HKT) y canales de cationes no selectivos (NSCC); además, la depolarización de la membrana causada por el Na^+ dificulta la absorción de K^+ por parte de los canales rectificadores de influjo (KIR) y aumenta la fuga del K^+ celular al activarse los canales rectificadores de eflujo de K^+ (KOR) ([Villa et al., 2006](#); [Zhang et al., 2010](#); [Wakeel, 2013](#); [Rietra et al., 2017](#)).

En caso del Cu, éste se encontró insuficiente en las zonas 6, 8 y 9, e incluso desplazó al B como segundo elemento más limitante en la zona 8, hecho que puede estar siendo ocasionado por el contenido de materia orgánica, ya que la mayor parte del Cu se encuentra formando complejos muy estables con ella y solo una pequeña fracción se encuentra como Cu^{2+} intercambiable ([Alcántar et al., 2016](#)).

Los elementos que se encontraron en un estado de exceso relativo en todas las muestras fueron N, Ca, Mg y Fe. Era esperado que el N no fuera parte del grupo de elementos en deficiencia (orden de limitación), puesto que superó el valor de referencia en cada una

de las muestras. No así en el caso de Ca, Mg y Fe, pero debido a las relaciones multivariadas, se posicionaron como elementos no limitantes.

4.4 Recomendaciones de fertilización

En las estimaciones para la obtención de la cantidad total de fertilizante fuente de cada nutrimento deficiente, se tomaron en cuenta los siguientes datos:

- ✓ Área cubierta por el dosel = 19.63 m².
- ✓ Densidad de población = 294 árboles ha⁻¹.
- ✓ Área cultivada = 25,000 m².

4.4.1 Corrección de la deficiencia de Zn

La cantidad total de Zn requerida para lograr una cosecha abundante de frutos de calidad no representa un problema; la dificultad radica en garantizar que el árbol reciba la cantidad necesaria de este elemento para satisfacer sus requerimientos fisiológicos y producir cosechas redituables ([Salazar-García et al., 2014a](#)).

Una práctica común para corregir la deficiencia de micronutrientes es la fertilización por vía foliar. [Salazar-García \(2002\)](#) menciona que la deficiencia de Zn en aguacate “Hass” puede corregirse con aspersiones foliares de 2 g ZnSO₄ (36% Zn) L⁻¹. Sin embargo, otros trabajos indican que las aspersiones foliares de Zn no son efectivas en aguacatero debido a que las hojas maduras muestran una limitada capacidad para absorber y transportar las sales aplicadas por esta vía ([Salazar-García et al., 2014a](#)).

[Crowley y Smith \(1996\)](#) en un trabajo realizado en California, EE. UU., con suelos alcalinos, concluyeron que menos del 1% del Zn es absorbido después de una aplicación foliar, y de eso solamente entre el 5 y el 8% es traslocado. Asimismo concluyeron que, la aplicación de 3.2 kg ZnSO₄ (36% Zn) árbol⁻¹ año⁻¹ resultó ser el mejor método para elevar la concentración foliar hasta el óptimo nutrimental.

La aplicación al suelo de ZnSO₄ parece ser eficaz sólo cuando se usan grandes cantidades. [Calabrese \(1992\)](#) sugiere emplear al menos 2 kg ZnSO₄ (36% Zn) árbol⁻¹ año⁻¹. [Avilán et al. \(1986\)](#) y [Villaseñor \(1999\)](#) recomiendan 1.5 kg para árboles mayores

de cinco años. [Lahav y Whiley \(2002\)](#) indican que 200 kg ha⁻¹ son suficientes. Por su parte, [Abercrombie \(2009\)](#), recomienda aplicaciones entre 5 y 10 g ZnSO₄ m⁻², dispersado bajo la copa del árbol.

En un estudio realizado en Nayarit, México, con suelos francos y ácidos, [Salazar-García et al. \(2008\)](#) encontraron que las aspersiones foliares no incrementaron los niveles foliares de Zn al óptimo. Por otra parte, dos aplicaciones de 0.750 kg ZnSO₄ (36% Zn) árbol⁻¹ año⁻¹ (en total 540 g de Zn) resultaron en un incremento en el contenido foliar de Zn (24.9 ppm; clasificado como normal). Esta recomendación parece ser la más adecuada para corregir el problema de deficiencia de Zn.

Ya que todo el huerto en evaluación presentó el problema de deficiencia de Zn, el cálculo para obtener la cantidad de fertilizante a aplicar es el siguiente:

$$\frac{0.540 \text{ kg Zn árbol}^{-1}}{0.36} = 1.5 \text{ kg ZnSO}_4 \text{ árbol}^{-1}$$
$$1.5 \text{ kg ZnSO}_4 \times 294 \text{ árboles} = 441 \text{ kg ZnSO}_4 \text{ ha}^{-1}$$

4.4.2 Corrección de la deficiencia de B

Se ha mostrado que las aplicaciones foliares de B en la época de floración pueden ser benéficas para el amarre del fruto ([Jaganath y Lovatt, 1998](#)), lo que se refleja en incrementos en la producción de hasta 26% cuando se aplican en huertos sin deficiencia de este nutrimento ([Lovatt, 1998](#)). Sin embargo, se debe tener cuidado con las aplicaciones foliares de B ya que la brecha entre deficiencia y toxicidad es pequeña, además de que deben realizarse solamente durante los flujos florales, que es cuando se tiene la mayor capacidad de absorción de B ([Joubert, 2016](#)). [Bender \(2004\)](#) indica que una aspersión foliar de 2 g B árbol⁻¹ por medio de Solubor (20.5% B) al 0.1% de concentración, debería ser suficiente para cada árbol.

De manera similar al Zn, las aplicaciones de B al suelo suelen ser más efectivas que las aspersiones al follaje ([Salazar-García et al., 2014a](#)). En California, [Embleton y Jones \(1966\)](#) recomendaron 50 g B árbol⁻¹ a partir de Bórax (11% B); mientras que [Joubert](#)

(2016), recomienda aplicar 3 g B m⁻² mediante Boronat (30% B). En Hawai, la recomendación fue de 69 g B árbol⁻¹ (Miyasaka *et al.*, 1992); en Australia fue de 41 g B árbol⁻¹ (Smith *et al.*, 1997); y en Sudáfrica, la dosis recomendada fue de 31 g B árbol⁻¹, dividido en tres aplicaciones (Bard y Wolstenholme, 1998).

Salazar-García *et al.* (2014a) encontraron que la proporción de fruto en tamaños primera y súper extra se incrementó al siguiente año de haber realizado dos aspersiones de 0.5 g B L⁻¹; sin embargo, se obtuvieron niveles foliares por debajo del valor óptimo (28.3 ppm) y no se incrementó el rendimiento, lo que coincide con trabajo de Coetzer *et al.* (1993) y Lovatt (1998) en el sentido que las aspersiones con B al follaje sólo han aumentado el rendimiento en algunos huertos y en algunos años. Sus resultados indican que la fertilización por vía foliar de B no son efectivas para corregir la deficiencia a corto plazo y no son redituables. Por otro lado, dos aplicaciones anuales de 0.75 g B m⁻² (29.5 g Boronat árbol⁻¹ aplicación⁻¹) incrementaron la concentración foliar de B (34.9 ppm) hasta el cuarto año de tratamiento. Es decir, la deficiencia de B fue controlada cuatro años después de las primeras aplicaciones. Sin embargo, la producción de fruto aumentó dos años después en más de 40 kg árbol⁻¹, así como la proporción de fruto de primera, extra y súper extra.

En este estudio, la recomendación es aplicar 39 g B árbol⁻¹ (2 g B m⁻²), divididos en dos aplicaciones. Esta cantidad es intermedia entre lo dicho por Salazar-García *et al.* (2014a) y Joubert (2016). El cálculo para obtener la cantidad de fertilizante es la siguiente:

$$\frac{39 \text{ g B}}{0.30} = 130 \text{ g Boronat árbol}^{-1}$$

$$130 \text{ g Boronat} \times 294 \text{ árboles} = 38.22 \text{ kg Boronat ha}^{-1}$$

4.4.3 Corrección de la deficiencia de P

Los niveles de P en los árboles pueden mejorarse por dos métodos, el primero mediante la aplicación de 46 L de H₃PO₄ líquido por hectárea por medio del sistema de riego, seguido de una aplicación anual de 28 L ha⁻¹, y el segundo mediante la aplicación de fertilizante seco a una tasa de 1.13 kg P₂O₅ árbol⁻¹ durante tres años (Bender, 2004). De

acuerdo con [Avilán et al. \(1986\)](#), la fertilización fosfatada para árboles de 7 años de edad en adelante, debe rondar entre los 500 y 1500 g P₂O₅ árbol⁻¹ año⁻¹. [Abercrombie \(2009\)](#) recomienda corregir la deficiencia con aplicaciones de superfosfato simple (SFS, 10% P) a razón de 50 g m⁻² en el área de goteo, o bien de fosfato monoamónico (MAP, 27 %P), usando una dosis de 10-20 g m⁻².

Un rendimiento de 10 t ha⁻¹ necesita extraer del suelo 6.64 kg de P (**Cuadro 4**). [Stewart \(2007\)](#) indica una eficiencia de 15% en la utilización de fertilizantes fosforados. En este caso, se considera el uso de superfosfato triple (SFT) (00-46-00+14Ca, 20% P), como se observa a continuación:

$$6.64 \text{ kg P} = 15.21 \text{ kg P}_2\text{O}_5$$

$$\frac{15.21 \text{ kg P}_2\text{O}_5}{0.15} = 101.4 \text{ kg P}_2\text{O}_5$$

$$\frac{101.4 \text{ kg P}_2\text{O}_5}{0.46} = 220 \text{ kg SFT ha}^{-1}$$

Se espera la aplicación eleve concentración de P en el suelo a 10 ppm. La aplicación de 220 kg SFT adicionan 30 kg Ca ha⁻¹.

4.4.4 Corrección de la deficiencia de K

Se conoce poco sobre la deficiencia de K en aguacatero, por lo que es complicado recomendar un procedimiento de manejo. La concentración foliar de K puede ser incrementada mediante la aspersiones foliares de K₂SO₄ (00-00-52+18S; 43% K) al 3% de concentración, pero no debe reemplazar la fertilización al suelo, que debe rondar entre 150 y 300 kg K₂O ha⁻¹.

En California, EE. UU., se recomienda una aplicación de 1.8 a 3.6 kg K árbol⁻¹ ([Bender, 2004](#)), aunque también se ha hecho el uso de KNO₃ o K₂SO₄ a una dosis de 10 g m⁻² ([Joubert, 2016](#)). De acuerdo con [Avilán et al. \(1986\)](#), la fertilización potásica para árboles de 7 años de edad en adelante, debe rondar entre los 600 y 1400 g K₂O árbol⁻¹ año⁻¹.

En este estudio, la alta concentración de K observada en el suelo sugiere poca respuesta por parte del cultivo a la fertilización edáfica. Sin embargo, para aumentar la capacidad de absorción de K, es necesario combatir el problema de sodicidad el suelo y abatir los niveles de Na, para lo que se recomienda el uso de yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ya que proporciona Ca que puede intercambiarse con Na, conduciendo así a la floculación de las partículas del suelo y a un mejor desarrollo de la estructura general del suelo ([Chen y Dick, 2011](#)). En este sentido, el objetivo proyectado es obtener un $\text{PSI}=10$ en toda la zona de estudio; las estimaciones para lograrlo se presentan en los **Cuadro 10**.

Cuadro 10. Estimación de yeso a aplicar en el huerto de estudio para reducir el porcentaje de sodio intercambiable.

Zona de estudio	CIC (cmol _c kg ⁻¹)	PSI actual	PSI deseado	PSI a reducir	Na a abatir (cmol _c kg ⁻¹)	CaSO ₄ 2H ₂ O (mg cmol _c)	Yeso a aplicar (mg 100 g ⁻¹)
1	4.80	21	10	11	4.80 (0.11) = 0.52	86	44.72
2	5.24	26	10	16	5.24 (0.16) = 0.83	86	71.38
3	4.69	11	10	1	4.69 (0.01) = 0.04	86	3.44

Zona de estudio	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Peso del suelo a 30 cm de profundidad (t ha ⁻¹)	Cantidad de yeso a aplicar (kg ha ⁻¹)
1	1.136	3,408	1,524
2	0.839	4,200	2,997
3	0.900	4,200	144

CIC: Capacidad de intercambio catiónico; PSI: Porcentaje de sodio intercambiable.

4.4.5 Corrección de la deficiencia de Mn

De acuerdo con [Castellanos \(2000\)](#), los niveles de Mn en suelo observados en este estudio fueron clasificados como bajos, y a un pH del suelo menor a 6, se tendría que agregar al suelo una cantidad de 4.8 kg Mn ha⁻¹ a través de MnSO₄ (32% Mn), para corregir la deficiencia nutrimental.

El Mn es un elemento abundante en suelos agrícolas de pH ácido. Sin embargo, en casos de deficiencia, [Bender \(2004\)](#) señala que la deficiencia de Mn puede ser corregida mediante la aplicación de 320 a 640 g Mn árbol⁻¹ incorporados al suelo, debajo de la capa de materia orgánica. [Yamada \(2004\)](#) propone aplicaciones de 2 y hasta 6 kg Mn ha⁻¹, o aspersiones foliares de MnSO₄ (32 % Mn) al 0.5 %, que en este caso es conveniente debido a que el problema no es el contenido de Mn en el suelo sino su absorción por la raíz.

4.4.6 Corrección de la deficiencia de Cu

Por lo general, la aspersión de fungicidas cúpricos incluidos en el manejo fitosanitario es suficiente para cubrir las necesidades de Cu por el cultivo de aguacatero. Para aplicaciones al suelo se recomiendan 3 kg Cu ha⁻¹ mediante CuSO₄ (25% Cu), sin embargo, al haber un contenido de Cu adecuado en el suelo, es deseable el uso de aspersiones foliares a base de CuSO₄ (25% Cu) que no excedan el 0.1% de concentración porque puede causar quemaduras en la hoja. ([Bennet, 1993](#); [Bender, 2004](#); [Alcántar et al., 2016](#)).

4.4.7 Corrección de la deficiencia de S

La deficiencia de S no es algo común en huertos de aguacatero. Debido a su inclusión como anión SO₄²⁻ en diversas fuentes fertilizantes, no se le toma en consideración directamente en programas de fertilización, sino que su aplicación es un resultado derivado de la aplicación de otros nutrimentos ([Abercrombie, 2009](#)). Aplicaciones de 1 a 3 t ha⁻¹ de yeso agrícola (CaSO₄) han podido corregir la deficiencia de S exitosamente,

así como aplicaciones de 10 g K_2SO_4 m^{-2} (Joubert, 2016). En este estudio, las necesidades de S son cubiertas con el aporte de ZnSO_4 y CaSO_4 al suelo.

V. CONCLUSIONES

México ocupa el primer lugar en producción mundial de aguacate debido a la gran superficie cultivada, sin embargo, los rendimientos están muy por debajo del máximo potencial del cultivo debido al manejo ineficiente del cultivo, a la poca innovación agronómica y a la falta de programas de nutrición vegetal que consideren las condiciones específicas de cada región productiva.

En las nueve zonas en las que se dividió el huerto, se registraron deficiencias de Zn, B y K. El S y el P resultaron deficientes en ocho y siete zonas, respectivamente. Mientras que, Cu y Mn fueron deficientes en tres y dos zonas respectivamente.

El hecho de encontrarse el Zn en primer lugar de limitación nutrimental y el B en segundo, señala la poca importancia que se le da a estos micronutrientes en la nutrición de aguacatero. Una situación que sucede no sólo esta región sino en la mayoría de las regiones productoras de aguacate del país.

Por un lado, la baja disponibilidad de Zn se intensifica por altas concentraciones de NO_3^- y Fe; mientras que, en caso del B, la materia orgánica y el contenido de arcilla son los que agudizan su deficiencia. La dosis estimada para la corrección de la deficiencia de Zn y B es de 441 kg ZnSO_4 (36% Zn) ha^{-1} y 38.22 kg Boronat (30% B) ha^{-1} .

El suelo se diagnosticó con problemas de sodicidad, importante en el cultivo de aguacatero por ser una especie especialmente sensible a la presencia de Na, además de causar la deficiencia de K. Las cantidades de yeso para abatir los niveles de Na en las zonas 1, 2 y 3 se fijaron en 1,524 kg, 2,997 kg y 144 kg, respectivamente.

La deficiencia de S es resultado de un manejo agronómico en que se hace el uso de fuentes de S no disponibles al cultivo, como el azufre agrícola altamente insoluble y dependiente de la microbiología del suelo para su transformación. El yeso y el ZnSO_4 utilizados proveen de una cantidad de SO_4^{2-} suficiente para abastecer las necesidades del cultivo.

La deficiencia de P observada en este estudio es un reflejo del problema generalizado de fijación de P debido al establecimiento de aguacatero en suelos con alto contenido de

Fe, lo que reduce la eficiencia en la aplicación de fertilizantes fosforados. La dosis estimada para la corrección de la deficiencia de P es de 220 kg SFT ha⁻¹.

Los datos del análisis CND sugieren cierta influencia del P sobre la disponibilidad del Mn, documentándose por primera vez en el cultivo de aguacatero.

Usualmente se recurre a aspersiones foliares para atender deficiencias de micronutrientes, sin embargo, el aguacatero es una especie que ha sido clasificada como poco eficiente para absorber sustancias por esta vía. Solamente en el caso de Cu y Mn se recomendó el método de fertilización foliar como auxilio a la absorción radical. Las recomendaciones aquí propuestas son el resultado de varias investigaciones con resultados satisfactorios. Para la corrección de la deficiencia de Mn y Cu se recomendó la aspersión de MnSO₄ (32% Mn) al 0.5% y CuSO₄ (25% Cu) al 0.1%.

El aporte constante de materia orgánica mostró ser suficiente para abastecer de N al cultivo. Sin embargo, su uso continuo puede ocasionar problemas no sólo por el exceso de N, sino también por su influencia en la disponibilidad de micronutrientes.

Este es el primer trabajo en que se utiliza el método de Diagnóstico Nutricional Compuesto (CND) para valorar la situación nutricional del cultivo de aguacatero. Su despliegue permitió una mejor interpretación de los análisis foliares, puesto que todos los nutrientes evaluados, excepto el N, estuvieron por debajo de la norma, lo que supondría un problema mayor si consideramos cada nutriente independientemente. Con el CND, la concentración de cada nutriente particular influye en todas las otras, provocando una respuesta de deficiencia o exceso relativos, lo cual ayuda a determinar el enfoque de la corrección nutricional en el plan de fertilización, con el objetivo de que sea eficiente, aumente la productividad y disminuya costos.

VI. LITERATURA CONSULTADA

- Abercrombie, R. A. (2009). Fertilization. *In: De Villiers, E. A. and Joubert, P. H., The cultivation of avocado*, pp. 142-150.
- Ahmad, W., H., M., S., S., Niaz, A. and Saifullah. (2012). Boron deficiency in soils and crops: a review. *In: Crop Plant*, pp. 77-114.
- Alcántar, G. G. y Sandoval, V. M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C., 10: 156 p.
- Alcántar, G., Trejo-Téllez, L. I. y Gómez-Merino, F. C. (2016). Nutrición de Cultivos. Segunda edición. Guadalajara, Jalisco, México. Colegio de Postgraduados. Biblioteca Básica de Agricultura.
- ALS Environmental Hawarden. (2019). Determination of Hot Water Soluble Boron in Soils (10:1 Water:soil) by ICP OES. Obtenido de https://www.alsenvironmental.co.uk/media-uk/method_statements/hawarden/contaminated-land-inorganics/tm222---water-soluble-boron-wsb-in-soils-by-icp-oes-method-summary_10.pdf
- Andersson, A. (1979). Distribution of heavy metals as compared to some other elements between grain size fractions in soils. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 9: 7-13.
- Anguiano, C. (2007). Caracterización edafoclimática del área productora de aguacate de Michoacán, México. Viña del Mar, Chile.
- Arroyo-Vargas, L., Tirado-Torres, J. L., Volke-Haller, V. H. y Valdez-Cepeda, R. D. (2012). Normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto y correlaciones entre nutrimentos y rendimiento en pimiento. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16: 69-82.
- Avilán, L., Rengifo, C. y Leal, F. (1986). El cultivo del aguacate. Fundación Servicio para el Agricultor FUSAGRI, Caracas, Venezuela.
- Baligar, V. C., Fageria, N. K. and He, Z. L. (2001). Nutrient efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8): 921-950.
- Barben, S. A., Hopkins, B. G., Jolley, V. D., Webb, B. L. and Nichols, B. A. (2010). Phosphorus and manganese interactions and their relationships with zinc in chelator-buffered solution grow russet burbank potato. *Journal of Plant Nutrition*, 33(5): 752-769.
- Bard, Z. and Wolstenholme, B. (1998). Soil boron application for control of boron deficiency in the avocado in the Kwa-Zulu-Natal midlands. *South African Avocado Growers' Assn*, 21: 22-25.

- Bates, T. E. (1971). Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. *Soil Science*, 112(3): 116-130.
- Bender, G. (2004). Avocado Fertilization. *In: Bender, G., Avocado Production in California*, pp. 29-54.
- Bennet, W. F. (1993). Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. APS Press. St. Paul, Minnesota.
- Blanco-Macías, F., Lara-Herrera, A., Valdez-Cepeda, R. D., Cortés Bañuelos, J. O., Luna-Flores, M. y Salas-Luevano, M. A. (2006). Interacciones nutrimentales y normal de la técnica de nutrimentos compuesto en nopal. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(2): 165-175.
- Bragachini, M. (2020). Red Agricultura de Precisión. Obtenido de Tecnología de Aplicación Variable de Insumos (VRT): <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/dosis-variable/Tecnologia-De-Aplicacion-Variable.asp>
- Bremner, J. M. (1965). Inorganic Forms of Nitrogen. *In: Norman, A. G., Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, pp. 1179-1237.
- Cabezas, C. (2003). identificación y descripción de los estados fenológicos-tipo del aguacate. Universidad de Almería, Almería, España.
- Calabrese, F. (1992). El aguacate. Universidad del Palermo, Institute di Coltivazioni Arboree. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Campos, B. y Calderón, E. (2015). El análisis foliar para el diagnóstico nutritivo de plantaciones de aguacate. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Málaga.
- Cassman, K., Dobermann, A. and Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 31(2): 132-140.
- Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. y Aguilar, S. A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y agua (2 ed.). Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Guanajuato, México.
- Castro, M., Fassio, C., Cautin, R. y Ampuero, J. (2015). UCV7, portainjerto de aguacate tolerante a salinidad. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(1): 85-92.
- Castro-Luna, I., Gavi-Reyes, F., Peña-Cabriales, J. J., Nuñez-Escobar, R. y Etchevers-Barra, J. D. (2006). Eficiencia de recuperación de Ny K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana*, 24(2): 277-282.
- Cerdas, M., Montero, M. y Díaz, E. (2006). Manual de Manejo Pre y Poscosecha de Aguacate. San José, Costa Rica.

- Chapman, H. D. (1973). Diagnostic criteria for plants and soils. Division of Agricultural Sciences, University of California, Berkeley.
- Chen, L. and Dick, W. (2011). Gypsum as an agricultural amendment. General use guidelines. The Ohio State University.
- Coetzer, L. A., Robbertse, P. J. and Janse Van Vuuren, B. P. (1993). The role of boron in avocados. Theory, practice, and reality. South African Avocado Growers' Association, 16: 2-4.
- Communar, G. and Keren, R. (2006). Rate-Limited Boron Transport in Soils: The Effect of Soil Texture and Solution pH. Soil Science Society of America Journal, 70(3): 882-892.
- Coria, V. M. (2008). Tecnología para la producción de aguacate en México. INIFAP, Uruapan, Michoacán, México.
- Crowley, D. E. and Smith, W. (1996). Zinc fertilization of avocado trees. HortScience, 31(2): 224-229.
- Diaz-Barrientos, E., Madrid, L., Contreras, M. C. and Morillo, E. (1990). Simultaneous adsorption of zinc and phosphate on synthetic lepidocrocite. Australian Journal of Soil Research, 28(4): 549-557.
- Dorado, D. (2017). Requerimientos hídricos del cultivo de aguacate (*Persea americana*) variedad Hass en zonas productoras de Colombia. Colombia: Corpoica.
- Dotti, E. (2012). Physical and chemical characterization of the pulp of different varieties of avocado targeting oil extraction potential. Ciencia e Tecnología de Alimentos, 32(2): 274-280.
- Embleton, T. W. and Jones, W. W. (1964). Avocado nutrition in California. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 77: 401-405.
- Embleton, T. W. and Jones, W. W. (1966). Avocado and mango nutrition. *In*: Childers, N. Fruit nutrition, Horticultural Publications. New Brunswick, NJ, USA. pp. 51-76.
- Embleton, T. W. and Jones, W. W. (1972). Development of nitrogen fertilizer programs for California avocados. Avocado Society Yearbook, 56: 90-96.
- Espinosa, J. (1994). Análisis foliar: fundamentos y métodos de evaluación. Instituto de la Potasa y el Fósforo, Informaciones Agronómicas, Quito, Ecuador.
- Etchevers, J. D. (1999). Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutricional de los cultivos. Terra Latinoamericana, 17(3): 209-219.
- FAO. (2008). Base referencial mundial del recurso suelo. Roma, Italia.
- FAO. (2020). FAOSTAT - Producción Agrícola, Área Cultivada. Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/>

- Ferreya, R. y Defilippi, B. (2012). Factores de precosecha que afectan la poscosecha de palta Hass. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. La Cruz, Chile.
- Fink, J. R., Vasconcellos, A., Tiecher, T. and Barrón, V. (2016). Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. *Ciência e Agrotecnologia*, 40(4):369-379.
- García-Hernández, J. L., Orona-Castillo, L., González-Cervantes, G., Valdez-Cepeda, R. D., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguez, E. y Segura-Castruita, M. A. (2009). Interacciones nutrimentales y normas de diagnóstico de nutrimentos compuesto en nogal pecanero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2): 141-147.
- Goodall, G. E., Embleton, T. W. and Platt, R. G. (1981). Avocado fertilization. Lft. 2024. Univ. of Calif. Div. Agr. Sci., Oakland, Calif.
- Gunes, A., Alpaslan, M. and Inal, A. (1998). Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants. *Journal of Plant Nutrition*, 20(10): 2035-2047.
- Hurtado, S., Díaz, H. N., Fischer, G., Miranda, D. y Melgarejo, L. M. (2019). Sintomatología de deficiencias de algunos nutrientes minerales en plantas de aguacate en estado vegetativo. *In: Melgarejo, L. M., Gulupa, curuba, aguacate y tomate de árbol. Innovaciones*, pp. 119-132.
- Jaganath, I. B. and Lovatt, C. J. (1998). Efficacy studies on prebloom canopy applications of boron and/or urea to 'Hass' avocados in California. *Proc. World Avocado Congress III, Tel Aviv, Israel*.
- Joubert, E. (2016). Avocado fertilizing principles. Recuperado el 2020 de Oct de 25, de <http://redsunhort.co.za/wp-content/uploads/DOWNLOADS/Avo-general-norms-and-fertigation-guidelines.pdf>
- Kenworthy, A. L. (1961). Leaf analysis as an aid in fertilizing orchards. *In: Walsh, L. M. and Beaton, J. D. Soil testing and plant analysis Soil Sci. Soc. Madison, WI., pp. 381-392.*
- Khiari, L., Parent, L. E. and Tremblay, N. (2001). Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal*, 93: 802-808.
- Lahav, E. and Kadman, A. (1980). Avocado Fertilization. Worblaufen-Bern, Switzerland: International Potash Institute.
- Lahav, E. and Whiley, A. W. (2002). Irrigation and mineral nutrition. *In: Whiley, A. W., Schaffer, B. and Wolstenholme (eds). The Avocado: Botany, Production and Uses, CAB International. Boston, MA. pp. 259-297.*
- Lemus, G., Ferreyra, R., Gii, P., Maldonado, P., Toledo, C., Barrera, C. y Celedon de A., M. (2005). *El Cultivo del Palto*. La Cruz, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

- Lovatt, C.J. (1998). Management of foliar fertilization. First National Symposium on Crop Nutrition, September 21-23. Querétaro, México.
- Magallanes-Quintar, R., Valdez-Cepeda, R. D., Olivares-Sáenz, E., Pérez-Veyna, O., García-Hernández, J. L. and López-Martínez, J. D. (2006). Compositional nutrient diagnosis in maize grown in a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, 29(11): 2019-2033.
- Maldonado, R. (2002). Diagnóstico Nutricional para la Producción de Aguacate. Fundación Produce Michoacán, A. C., Morelia, Michoacán, México. 74 p.
- Maldonado, R., Álvarez, M. E., Almaguer, G., Barrientos, A. F. y García, R. (2007). Estándares nutrimentales para aguacatero 'Hass'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1): 103-108.
- Marín, M., y Pérez, R. (1992). Importancia del análisis foliar en la evaluación de la fertilidad de suelos en Venezuela. *Revista de Agronomía LUZ*, 9: 1-15.
- Martínez C., J. P., Muenza Z., V. y Ruiz S., R. (2014). Nutrición y fertilidad en paltos, 283. INIA. La Cruz, Chile.
- Meléndez, G. y Molina, E. (2002). Fertilización foliar: Principios y aplicaciones. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. Obtenido de <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilizaci%C3%B3n%20Foliar.pdf>
- Miyasaka, S. C., McDonald, T. G., Graser, E. A. and Campbell, I. S. (1992). Boron fertilization of 'Sharwil' avocados in Kona, Hawaii. *Proc. Second World Avocado Congress*.
- Molina, E. (2002). Análisis de suelos y su interpretación. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. Obtenido de <http://www.infoagro.go.cr/Info regiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/SUELOS-AMINOGROWanalisisinterpretacion.pdf>
- Mortvedt, J. J. (1994). Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers. *Fertilizer Research*, 38(3): 213-221.
- Mousavi, S. R., Shahsavari, M. and Rezaei, M. (2011). A general overview on manganese (Mn) importance for crops production. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9): 1799-1803.
- Neilsen, D., Neilsen, G. H., Sinclair, A. H. and Linehan, D. J. (1992). Soil phosphorus status, pH and the manganese nutrition of wheat. *Plant and Soil*, 145(1): 45-50.
- Nogueira, M. A., Magalhaes, G. C. and Cardoso, E. J. (2004). Manganese toxicity in mycorrhizal and phosphorus-fertilized soybean plants. *Journal of Plant Nutrition*, 27(1): 141-156.

- NOM-021-RECNAT-2000. (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT, Diario Oficial. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Novoa, M. A., Miranda, D. M. y Melgarejo, L. M. (2018). Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2): 293-307.
- Parent, L. and Dafir, M. (1992). Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Horticultural Science*, 117(2): 239-242.
- Pérez, R. (2005). El aceite de aguacate y sus propiedades nutricionales. *e-Gnosis*, 3(10): 1-11.
- Quintana, N. (2006). Fertilización en el cultivo del aguacate. *XOBA*, 2(3): 125-128.
- Ramírez-Chávez, R. I., López-Martínez, J. D., Troyo-Diéquez, E., Gallego-Robles, M. A., Vázquez Vázquez, C., Ramírez, J. A. y García-Hernández, J. L. (2016). Determinación preliminar de normas e interacciones nutrimentales en chile ancho en la Comarca Lagunera. *Nova Scientia*, 8(2): 198-218.
- Ramírez-Ibarra, J. A., Troyo-Dieguez, E., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Gallegos-Robles, M. A., Vázquez-Vázquez, C. y García-Hernández, J. L. (2017). Diagnóstico de nutrimento compuesto e interacciones nutrimentales en chile Jalapeño en suelos semiáridos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, (11): 233-242.
- Rebolledo, A. (2017). Criterios para la definición de planes de fertilización en el cultivo de aguacate Hass con un enfoque tecnificado. CORPOICA. Moquera, Colombia.
- Reyes-Alemán, J. C., Monteagudo-Rodríguez, O., Valdez-Pérez, M. E., Mejía-Carranza, J., Espíndola-Barquera, M. y Urbina-Sánchez, E. (2017). Modelo fenológico para el aguacate "Hass" en el Estado de México. Ciudad Guzmán.
- Richards, M., Butterbach-Bahl, K., Jat, M. L. and Ortiz-Monasterio, I. (2015). Site-Specific Nutrient Management: Implementation guidance for policymakers and investors. *Climate-smart agriculture*.
- Rietra, R. P., Heinen, M., Dimkpa, C. O. and Bindraban, P. S. (2017). Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 48(16): 1895-1920.
- Rieuwerts, J. S., Thornton, I., Farago, M. E. and Ashmore, M. R. (1998) Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metal. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 10(2): 61-75.

- Rocha, J. (2011). Fenología del aguacate Hass en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3): 303-316.
- Rowley, D. F. (1992). Soil fertility and the mineral nutrition of avocado. California Avocado Development Organization. California Avocado Society.
- Rozane, D. E., Vahl, B., Bastos, G. W., Haitzmann, E. M., Trentin, E., Marchezan, C., Stefanello da Silva, L. O., Tassinari, A., Dotto, L., Nunes de Oliveira, F., Natale, W., Baldi, E., Toselli, M. and Brunetto, G. (2020). Compositional Nutrient Diagnosis (CND) Applied to Grapevines Grown in Subtropical Climate Region. *Horticulturae*, 6(56): 1-13.
- Rubí, M., Franco, A., Rebollar, S., Bobadilla, E., Martínez, I. y Siles, Y. (2013). Situación actual del cultivo de aguacate en el Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(1): 93-101.
- Ruiz, R., & Ferreyra, R. (2011). Requerimiento nutricional y efecto de la nutrición sobre desórdenes y condición de paltas. Quillota. Obtenido de <http://avocadosource.com>
- Salazar-García, S. (2002). Nutrición del aguacate, principios y aplicaciones. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias e Instituto de la Potasa y el Fósforo. Querétaro, México.
- Salazar-García, S. (2019). Fenología y nutrición del aguacate en clima cálido. INIFAP-Campo Experimental Santiago Ixcuintla, Santiago Ixcuintla, Nayarit. Obtenido de <http://docplayer.es/184563091-Fenologia-y-nutricion-del-aguacate-en-clima-calido-avocado-phenology-and-nutrition-in-warm-climate.html>
- Salazar-García, S., Cossio-Vargas, L. E. y González-Durán, I. J. (2008). Corrección de la deficiencia crónica de zinc en aguacate 'Hass'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2):153-159.
- Salazar-García, S., Cossio-Vargas, L. E. y González-Durán, J. L. (2009). La fertilización de sitio específico mejoró la productividad del aguacate 'Hass' en huertos sin riego. *Agricultura Técnica en México*, 35(1), 436-445.
- Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E., Gutiérrez-Martínez, P. y Medina-Torres, R. (2014a). Fertilización con zinc y boro en huertos de aguacate Hass sin riego en Nayarit. Santiago Ixcuintla, Nayarit, Santiago Ixcuintla, Nayarit, México: INIFAP-CIPRAC.
- Salazar-García, S. y Lazcano-Ferrat, I. (1999). Diagnóstico nutrimental del aguacate 'Hass' bajo condiciones de temporal. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5:173-184.
- Salazar-García, S. y Lazcano-Ferrat, I. (2001). Identifying Fruit Mineral Removal Differences in Four Avocado Cultivars. *Better Crops international*, 15(1): 28-31.
- Salazar-García, S. y Lazcano-Ferrat, I. (2003). Site specific fertilization increased yield and fruit size in 'Hass' avocado. *Better Crops International*, 17(1): 12-15.

- Salazar-García, S., Santillán-Valladolid, G., Hernández-Valdés, E. F., Medina-Torres, R., Ibarra-Estrada, M. E. y Gómez-Aguilar, R. (2014b). Efecto a corto plazo de la fertilización de sitio específico en mangos 'Kent' y 'Tommy Atkins' cultivados sin riego. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 645-659.
- Sangerman, D., Laqué-Saavedra, B. S., Omaña-Silvestre, M., Shwenstesius de Ridenrman, R. y Bravo-Navarro, A. (2014). Tipología del productores de aguacate en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(6), 1081-1095.
- Santillán, G. (2014). Efecto a corto plazo de la fertilización de sitio específico en mangos 'Kent' y 'Tommy Atkins' cultivados sin riego. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 645-659.
- Sarkar, D., Pandey, S. K., Sud, K. C. and Chanemougasoundharam, A. (2004). *In vitro* characterization of manganese toxicity in relation to phosphorus nutrition in potato. *Plant Science*, 167(5), 977-986.
- Savita, R. K., Ngangom, B., Thoithoi, M., Mishra, G., Rawat, D. and Srivastava, P. C. (2016). Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) approach on Nutritional Diagnosis in Fruit crops- A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 8(4), 2337-2345.
- Selladurai, R. and Awachare, C. M. (2019). Nutrient management fos avocado (*Persea americana miller*). *Journal of Plant Nutrition*, 1-10.
- Sequi, P. (2004). Los microelementos en la nutrición vegetal (Vol. 43). Italia: VALAGRO SpA. Obtenido de <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Losmicroelementosenlanutricionvegetal.pdf>
- SIAP. (07 de Julio de 2020). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Smith, T. E., Hofman, P. J., Stephenson, R. A., Asher, C. J. and Hetherington, S. E. (1997). Improving boron nutrition imporves 'Hass' avocado fruit size and quality. *Proceedings from Conference '97: Searching for Quality*. pp. 131-137.
- Sotelo, E. (2020). Actualización de la cartografía edafológica del Estado de México: una herramienta para la planeación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1775-1788.
- Stewart, W. (Octubre de 2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. International Plant Nutrition Institute, Quito, Ecuador.
- Torres, Y. (06 de Marzo de 2017). Aguacates ya dejan más dinero a México que los hidrocarburos. EL FINANCIERO. Obtenido de <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/aguacates-ya-dejan-mas-que-los-hidrocarburos>

- Torri, S. (2005). Análisis foliar. Universidad de Buenos Aires, Departamento de Recurso Naturales y Ambiente. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Silvana-Torri/publication/305849363_Analisis_foliar/links/57a378f208ae455e85306f89/Analisis-foliar.pdf
- Villa, M., Catalán, E. A., Inzunza, M. A. y Ulery, A. (2006). Absorción y traslocación de sodio y cloro en plantas de Chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1), 79-88.
- Villalba-Morales, A., Damián-Nava, A., González-Hernández, V. A., Talavera-Mendoza, O., Hernández-Castro, E., Palemón-Alberto, F., Díaz-Villaseñor, G. y Sotelo-Nava, H. (2015). Nutrición química y orgánica en aguacate Hass en filo de Caballos, Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(11), 2169-2176.
- Villaseñor, D. J. (1999). Fertilización y fenología del aguacate. *Plantaciones modernas*, 4(3), 16-17.
- Vivero, A. (2019). Palta: compuestos bioactivos y sus potenciales beneficios en salud. *Revista Chilena de Nutrición*, 46(4), 491-498.
- Wakeel, A. (2013). Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline-sodic conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3), 344-354.
- Walworth, J. L. and Sumner, M. E. (1987). The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Advances in Soil Science*, 6, 149-188.
- Yamada, T. (Dic de 2004). Deficiencias de micronutrientes, ocurrencia, detección y corrección. *Informaciones Agronómicas* (24), 23.
- Yermiyahu, U., Keren, R. and Chen, Y. (2001). Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1436.
- Zhang, J., Flowers, T. J. and Wang, S. (2010). Mechanisms of sodium uptake by roots of higher plants. *Plant and Soil*, 326, 45-60.