



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

Aguacate, un alimento con impacto ambiental:
Análisis de la dinámica de nutrientes (N y P)
en suelos de tipo andosol

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

ARIANA GARCÍA GALVÁN

DIRECTORA DE TESIS: DRA. YUNUEN TAPIA TORRES

MORELIA, MICHOACÁN

DICIEMBRE DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

Aguacate, un alimento con impacto ambiental:
Análisis de la dinámica de nutrientes (N y P)
en suelos de tipo andosol

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

ARIANA GARCÍA GALVÁN

DIRECTORA DE TESIS: DRA. YUNJEN TAPIA TORRES

MORELIA, MICHOACÁN

DICIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 11** del **Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **23 de noviembre del 2020**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Ariana García Galván** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **416070565**, con el trabajo titulado: **"Aguacate, un alimento con impacto ambiental: Análisis de la dinámico de nutrientes (N y P) en suelos de tipo andosol"**, bajo la dirección como **tutor** de la Dra. Yunuen Tapia Torres.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant

Vocal: Dr. Ignacio Torres García

Secretario: Dra. Yunuen Tapia Torres

Suplente: Dr. Pablo Fabián Jaramillo López

Suplente: Mtra. Pamela Chávez Ortiz

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 02 de junio de 2021.

DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614

www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos Institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Licenciatura en Ciencias Ambientales, por brindarme invaluable conocimientos, por permitirme conocer a personas increíbles (maestrxs, compañerxs y amigas) que me han inspirado a lo largo de la licenciatura y por darme las herramientas para desenvolverme en el campo del conocimiento que he elegido.

A los proyectos:

Uso sostenible de los fertilizantes fosfatados como mecanismo para el mantenimiento a largo plazo de la fertilidad de suelos (PAPIIT-UNAM-IA206219);

Impactos y consecuencias del desarrollo de la franja aguacatera sobre aspectos hidrológicos, funcionales, genéticos y de biodiversidad en ecosistemas templados de México” (CONACyT-2017);

Aplicación del Conocimiento Ecológico para Favorecer la Sustentabilidad del Cultivo de Aguacate en el Estado de Michoacán Aspectos de Suelo, Hidrológicos e Interacciones Bióticas", (PFCTI/ICTI/2019/A/315)

Por el presupuesto otorgado para la realización de este trabajo de tesis.

A la Dra. Yunuen Tapia Torres por aceptarme como una integrante más del laboratorio, por aceptar ser la directora de este trabajo de tesis y por orientarme durante todo este tiempo.

A los miembros del jurado Dr. Carlos Antonio Anaya Merchant, Dr. Ignacio Torres García Dr. Pablo Fabián Jaramillo López y Mtra. Pamela Chávez Ortíz por aceptar revisar mi trabajo.

A los propietarios de las huertas de aguacate, que permitieron realizar en sus cultivos el muestreo de suelo para el presente trabajo.

Al Dr. Antonio González y Dr. Carlos Antonio Merchant por acompañarnos a Sofía, Kenia y a mí en las salidas a campo y ayudarnos realizar los muestreos de suelo.

Al Dr. Carlos Anaya y Mtro. Alberto Morón por su valiosa ayuda en los análisis de laboratorio. Gracias por compartir su tiempo y conocimientos y tener paciencia cuando las cosas no salían como debían.

A la Mtra. Pamela Chávez por su ayuda en el experimento de oclusión, por su tiempo y disposición para explicarme el procedimiento y cálculos.

Al personal del Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos, del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM por su apoyo en la realización de los análisis de nutrientes

Al Laboratorio de Microbiómica de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, por permitirme realizar en este espacio el experimento de oclusión.

Agradecimientos Personales

A ti Yun, porque desde un inicio, al ver tu pasión por la ciencia del suelo, me has transmitido las enormes ganas de aportar también mi granito de arena al estudio de ese maravilloso mundo que es el suelo. Por estar ahí para apoyarme en lo académico y en lo personal. No pude haber encontrado mejor tutora. Gracias infinitas por todo, te quiero mucho.

A mis compañeros de laboratorio (Microbiómica) Sofí, Kenia, Bren, Chio, Beto, Pam Javi; gracias por la convivencia a lo largo de estos años, sin duda ya están en mi corazón.

A mis amigas, mejor dicho, hermanas que encontré en el camino: Tania, Sofí, Vianey y Lau; gracias chiquis por siempre estar ahí cuando las he necesitado, por las risas, los enojos, etc; gracias por todas las aventuras y desventuras a lo largo de estos años.

De manera especial agradezco a mis papás, porque siempre han estado ahí para mí, para darme todo su apoyo, por guiarme en esta vida, por haberme dado todo lo necesario para poder llegar hasta este punto de mi vida. Siempre estaré agradecida con ustedes. Los amo papá y mamá.

A mis hermanos Paco, May y Luís porque ustedes también siempre han estado apoyándome en todo, ya sea con algún consejo, algún gesto o simplemente con el hecho saber que siempre estarán ahí cuando lo necesite.

A Larry, por haber sido un excelente compañerito para terminar de escribir este trabajo, siempre estuviste ahí para hacer más felices mis días a pesar de todo. Te extraño.

RESUMEN

A nivel mundial México es el principal productor de aguacate, los estados con mayor producción son Michoacán, Jalisco y Edo. de México, conformando más del 90% del volumen de la producción total. De estos, Michoacán es líder nacional en la producción de aguacate con 1 565 896 ton en una superficie de 166 000 ha. En Michoacán la expansión de este cultivo ha provocado efectos negativos al ecosistema, principalmente por el uso de agroquímicos y por el incremento en las tasas de cambio de uso de suelo (CUS), de forestal a agrícola, para la producción de aguacate. Sin embargo, el efecto del CUS sobre los procesos biogeoquímicos del suelo y sobre la microbiota del suelo ha sido poco estudiado. Por lo que el objetivo general fue evaluar el efecto del CUS y el tipo de manejo agrícola sobre la disponibilidad de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P) en huertos de aguacate con suelo de tipo Andosol.

Este trabajo se conformó por dos capítulos: capítulo 1, el objetivo fue identificar a través de una búsqueda bibliográfica, las publicaciones científicas relacionadas al cultivo de aguacate en Michoacán, particularmente aquellas publicaciones que analizaran los efectos del cultivo de aguacate en el suelo y sus procesos biogeoquímicos y a la salud humana. En total se encontraron 78 publicaciones relacionadas al cultivo de aguacate en Michoacán. Sin embargo, únicamente se encontraron 3 publicaciones científicas referentes al suelo y los procesos biogeoquímicos.

Capítulo dos, el objetivo fue evaluar, de manera experimental, el efecto del CUS y tipo de manejo agrícola sobre la dinámica del C, N y P y el efecto del CUS en el proceso de oclusión de P, en suelos de tipo andosol. El muestreo de suelo se realizó en 2 sitios, cada uno conformado por una huerta de aguacate y un fragmento de bosque adyacente, los sitios son Huitzicho (manejo agrícola semi convencional) localizado en Uruapan, Michoacán y Cedritos 2 (manejo agrícola orgánico) en Acuitzio, Michoacán. Se realizaron análisis fisicoquímicos (pH y % humedad) y biogeoquímicos para determinar la concentración de los nutrientes C, N y P en sus formas totales (CT, NT y PT), orgánicos disueltos (COD, NOD y POD), disponibles: amonio, nitrato y ortofosfato (NH_4^+ , NO_3^- y PO_4^{3-}) e inmovilizados en biomasa microbiana (CMIC, NMIC y PMIC). Los resultados mostraron que en Huitzicho el porcentaje de humedad fue mayor en el bosque; el pH en el bosque fue más ácido y en la huerta fue más alcalino; las formas disponibles de NO_3^- y PO_4^{3-} fueron mayores en la huerta y el PMIC fue mayor en la huerta. En Cedritos 2, el pH en el bosque fue más alcalino y en la huerta fue más ácido; el NOD fue mayor en el bosque; en los nutrientes disponibles el NH_4^+ fue mayor en el bosque y el PO_4^{3-} fue mayor en la huerta; la concentración de CMIC y NMIC fueron mayores en el bosque. Entre las huertas con distinto manejo agrícola, el NOD fue mayor en la huerta Huitzicho y el POD fue mayor en la huerta Cedritos 2; los nutrientes disponibles fueron mayores en la huerta Huitzicho. El proceso de oclusión no se vio afectado por el cambio de uso de suelo, pero sí por el tipo de manejo.

Estos resultados permiten entender el efecto del CUS, de forestal a agrícola, y las prácticas de manejo en los cultivos de aguacate sobre la dinámica de nutrientes, así como la oclusión de P. Sin embargo, es necesario realizar más estudios que fortalezcan estos resultados y con ello generar estrategias para el uso sustentable del suelo, así como fomentar prácticas agrícolas que favorezcan la salud ambiental.

ABSTRACT

Worldwide, Mexico is the main avocado producer, the states with the highest production are Michoacan, Jalisco, and Edo. of Mexico, making up more than 90% of the total production volume. Of these, Michoacán is the national leader in avocado production with 1,565,896 tons in an area of 166,000 ha. In Michoacan, the expansion of this crop has caused negative effects on the ecosystem, mainly due to the use of agrochemicals and the increase in land use change rates (LUC), from forestry to agricultural, for avocado production. However, the effect of LUC on soil biogeochemical processes and soil microbiota has been little studied. Therefore, the general objective was to evaluate the effect of LUC and the type of agricultural management on the availability of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in avocado orchards with Andosol-type soil.

This work consisted of two chapters: Chapter 1, the objective was to identify through a bibliographic search, the scientific publications related to the avocado crop in Michoacán, particularly those publications that analyze the effects of avocado crop on the soil and its biogeochemical processes and human health. In total, 78 publications were found related to avocado crop in Michoacan. However, only 3 scientific publications referring to soil and biogeochemical processes were found.

Chapter two, the objective was to evaluate, experimentally, the effect of LUC and type of agricultural management on the dynamics of C, N and P and the effect of LUC in the process of P occlusion, in andosol-type soils. Soil samples were collected in 2 sites, both with an avocado orchard and a fragment of adjacent forest, the sites were Huitzicho (semi conventional agricultural management) located in Uruapan, Michoacan and Cedritos 2 (organic agricultural management) in Acuitzio, Michoacan. Physicochemical (pH and% humidity) and biogeochemical analyzes were measured to determine the concentration of nutrients (C, N and P) in their total forms (TC, NT and TP), dissolved organic (DOC, DON and DOP), available: ammonium, nitrate and orthophosphate (NH_4^+ , NO_3^- and PO_4^{3-}) and immobilized in microbial biomass (CMIC, NMIC and PMIC). The results showed that in Huitzicho the percentage of humidity was higher in the forest; the Ph in the forest was more acidic and, in the orchard, it was more alkaline; the available forms of NO_3^- and PO_4^{3-} were higher in the garden and the PMIC was higher in the garden. In Cedritos 2, the pH in the forest was more alkaline and, in the orchard, it was more acidic; the NOD was higher in the forest; in the available nutrients the NH_4^+ was higher in the forest and the PO_4^{3-} was higher in the orchard; the concentration of CMIC and NMIC were higher in the forest. Among the orchards with different agricultural management, the DON was higher in the Huitzicho orchard, and the DOP was higher in the Cedritos 2 orchard; the available nutrients were higher in the Huitzicho orchard. The occlusion process was not affected by the change in land use, but by the type of management.

These results allow us to understand the effect of LUC, from forestry to agricultural, and management practices in avocado crops on nutrient dynamics, as well as P occlusion. However, more studies are needed to strengthen these results and generate strategies for the sustainable use of the soil, accompanied by the promotion of good agricultural practices to improve environmental health.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO 1. EFECTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE SOBRE LA SALUD AMBIENTAL Y SALUD HUMANA: UNA REVISION BIBLIOGRÁFICA	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.1 AGUACATE, ORIGEN Y DOMESTICACIÓN	3
1.1.2 AGUACATE EN MÉXICO Y FRANJA AGUACATERA	5
1.1.3 TIPOS DE MANEJO AGRÍCOLA EN EL CULTIVO DE AGUACATE	7
1.1.4 IMPACTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE EN LA FRANJA AGUACATERA.....	9
1.1.5 IMPACTOS AL SUELO, MANTOS ACUÍFEROS Y SALUD HUMANA DEL USO DE AGROQUÍMICOS UTILIZADOS EN CULTIVOS DE AGUACATE	11
1.1.6 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO (CUS) EN LA REGIÓN PRODUCTORA DE AGUACATE EN MICHOACÁN.....	12
1.2 MÉTODOS.....	15
1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
1.3.1 EFECTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE EN LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS DEL SUELO Y A LA SALUD HUMANA	21
1.4 CONSIDERACIONES FINALES	24
CAPÍTULO 2. DINÁMICA DE N Y P EN SUELOS DE CULTIVO DE AGUACATE	26
2.1 INTRODUCCIÓN.....	26
2.1.1 RELACIÓN PLANTA-SUELO Y CICLOS BIOGEOQUÍMICOS	26
2.1.2 CAMBIO DE USO DE SUELO Y DINÁMICA DE N Y P.....	28
2.1.3 OCLUSIÓN DE FÓSFORO.....	30
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	32
OBJETIVO GENERAL	32
OBJETIVOS PARTICULARES	32
2.2 MÉTODOS.....	33
2.2.1 SITIOS DE ESTUDIO	33
2.2.2 DISEÑO DE MUESTREO.....	35
2.2.3 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOGEOQUÍMICOS.....	36

2.3.1.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS.....	36
HUMEDAD Y PH.....	36
2.3.1.2 ANÁLISIS DE NUTRIENTES.....	36
NUTRIENTES TOTALES.....	36
NUTRIENTES DISUELTOS.....	37
NUTRIENTES DISPONIBLES.....	38
<i>Determinación de N disponible</i>	38
<i>Determinación de P disponible</i>	38
NUTRIENTES EN BIOMASA MICROBIANA.....	39
<i>Determinación de Carbono y Nitrógeno en Biomasa Microbiana</i>	39
<i>Determinación de Fósforo en Biomasa Microbiana</i>	39
2.2.4 EXPERIMENTO DE OCLUSIÓN DE P.....	40
2.2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
2.2.5.1 ANÁLISIS DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y BIOGEOQUÍMICAS	43
2.2.5.2 ANÁLISIS DE EXPERIMENTO DE OCLUSIÓN DE P	43
2.3 RESULTADOS	44
2.3.1 ANÁLISIS DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y BIOGEOQUÍMICAS	44
2.3.2 ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO DE OCLUSIÓN DE FÓSFORO	54
2.4 DISCUSIÓN.....	55
2.4.1 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA DINÁMICA DE N Y P EN EL SITIO HUITZICHO.....	55
2.4.2 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA DINÁMICA DE N Y P EN EL SITIO CEDRITOS 2.....	59
2.4.3 EFECTOS DEL TIPO DE MANEJO AGRÍCOLA EN LA DINÁMICA DE N Y P EN LAS HUERTAS DE AGUACATE HUITZICHO Y CEDRITOS 2	62
2.4.4 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL PROCESO DE OCLUSIÓN DE P EN EL SUELO	64
CONCLUSIONES GENERALES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS GENERALES.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

- Figura 1.1** Franja aguacatera en Michoacán, la cual se extiende en 67 municipios. Elaboración propia con base en el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) (SIAP, 2020). 7
- Figura 1.2** Número de publicaciones por año en el período de tiempo de 1970-2020. Los resultados corresponden a las 78 publicaciones científicas obtenidas de la consulta en las bases de WoS y Scopus con las palabras clave “Avocado AND Michoacan” limitados por país “Mexico”. 18
- Figura 1.3** Nube de palabras sobre los temas abordados en las disciplinas de Ciencias Agrícolas, Ciencias Ambientales y Biología. El tamaño de la palabra varía en función de cuantas veces es mencionada en los textos analizados. 19

CAPÍTULO 2.

- Figura 2.1** Mapa de los sitios de estudio: Huerta Huitzicho, Uruapan y Huerta Cedritos 2, Acuitzio, ambos ubicados en el estado de Michoacán de Ocampo. 33
- Figura 2.2** Diseño de muestreo para la caracterización del sitio de estudio. El diseño se replicó en cada sitio de estudio. 35
- Figura 2.3** Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas del Bosque del sitio Huitzicho. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; **CT**: Carbono Total; **NT**: Nitrógeno Total; **PT**: Fósforo Total; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NH4Disp**: Amonio Disponible; **PO4Disp**: Fósforo disponible en forma de ortofosfato; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$). 50
- Figura 2.4** Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas de la Huerta del sitio Huitzicho. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; **CT**: Carbono Total; **NT**: Nitrógeno Total; **PT**: Fósforo Total; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NH4Disp**: Amonio Disponible; **NO3Disp**: Nitrato Disponible; **PO4Disp**: Fósforo disponible en forma de ortofosfato; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$). 51
- Figura 2.5** Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas de Bosque del sitio Cedritos 2. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NH4Disp**: Amonio Disponible; **NO3Disp**: Nitrato Disponible; **PO4Disp**: Fósforo disponible en forma de ortofosfato; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$). 52
- Figura 2.6** Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas de la Huerta del sitio Cedritos 2. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NO3Disp**: Nitrato Disponible; **PO4Disp**: Ortofosfato disponible; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$). 53
- Figura 2.7** Fertilización vs oclusión ($ugP\ g^{-1}$) en los sitios de estudio Huitzicho y Cedritos 2. En tonos verde y azul están representados el sitio Huitzicho y en tonos marrón el sitio Cedritos 2. Las líneas continuas corresponden a los bosques y las líneas punteadas a las huertas. 54

Figura 2. 8 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del Bosque Huitzicho, Uruapan en mayo de 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.	58
Figura 2.9 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del bosque Cedritos 2, Acuitzio en septiembre 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece..	58
Figura 2.10 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del bosque Cedritos 2, Acuitzio en septiembre 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.	61
Figura 2.11 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del bosque Cedritos 2, Acuitzio en septiembre 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.	61

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1.

Tabla 1.1 Categorías de clasificación de los 78 resultados sin repeticiones obtenidos de la búsqueda bibliográfica: “Avocado AND Michoacan” limitada a México, en el período de tiempo de 1970-2020 en las bases de datos de WoS y Scopus. Las coincidencias en los temas/ramas/técnicas de investigación se comparten en entre distintas disciplinas, ya que se encontraron trabajos que coincidieron en más de una de una disciplina.	16
Tabla 1.2 Resultados obtenidos sobre el suelo y procesos biogeoquímicos, en la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos de Web of Science y Scopus sobre el estudio del cultivo de aguacate en Michoacán.	23

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1 Sitios de estudio. Se muestran las coordenadas geográficas de cada sitio, municipio, tipo de suelo y tipo de práctica agrícola.....	35
Tabla 2.2 Tratamiento de fertilización con fósforo a los cuales fueron sometidas las muestras de suelo de los sitios de estudio. BH: Bosque Huitzicho; HH: Huerta Huitzicho; BC: Bosque Cedritos 2; HC: Huerta Cedritos 2.....	41
Tabla 2.3 Diseño experimental para el experimento de oclusión de fósforo. BH: Bosque Huitzicho; HH: Huerta Huitzicho; BC: Bosque Cedritos 2; HC: Huerta Cedritos 2	42
Tabla 2.4 Variables biogeoquímicas con media y error estándar (del promedio) y, significancia de las diferencias entre las variables biogeoquímicas de cada parcela de muestreo en los sitios de estudio. CT: Carbono Total; NT: Nitrógeno Total; PT: Fósforo Total; COD: Carbono Orgánico Disuelto; NOD: Nitrógeno Orgánico Disuelto; POD: Fósforo Orgánico Disuelto; NH4 +Disp: Amonio Disponible; NO3⁻ Disp: Nitrato Disponibles; PO4 3 – Disp: Ortofosfato Disponible; CMIC: Carbono en Biomasa Microbiana; NMIC: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; PMIC: Fósforo en Biomasa Microbiana.....	46
Tabla 2.5 Variables biogeoquímicas con media y error estándar (del promedio) y, significancia de las diferencias entre el tipo de manejo de las parcelas: la huerta convencional Huitzicho y la huerta orgánica	

Cedritos 2. **CT**: Carbono Total; **NT**: Nitrógeno Total; **PT**: Fósforo Total; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NH₄⁺Disp**: Amonio Disponible; **NO₃⁻Disp**: Nitrato Disponibles; **PO₄³⁻Disp**: Ortofosfato Disponible; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. 48

ABREVIATURAS:

CUS: Cambio de uso de suelo

MO: Materia Orgánica

C: Carbono

N: Nitrógeno

P: Fósforo

MO: Materia orgánica

CT: Carbono Total

NT: Nitrógeno Total

PT: Fósforo Total

COD: Carbono Orgánico Disuelto

NOD: Nitrógeno Orgánico Disuelto

POD: Fósforo Orgánico Disuelto

NH₄⁺ : Amonio Disponible

NO₃⁻ : Nitrato Disponible

PO₄³⁻ : Ortofosfato Disponible

CMIC: Carbono en Biomasa Microbiana

NMIC: Nitrógeno en Biomasa Microbiana

PMIC: Fósforo en Biomasa Microbiana

INTRODUCCIÓN GENERAL

El aguacate michoacano (*Persea americana* Mill.) ha tenido gran aceptación en el mercado internacional, por lo que Michoacán ha logrado posicionarse como el principal productor de aguacate a nivel nacional y mundial. Cada año, la mayor parte de la producción nacional de este fruto es exportada principalmente a Estados Unidos, Canadá y diversos países Asiáticos, mientras que el resto se destina al mercado nacional (SAGARPA, 2017). La producción y exportación del aguacate genera importantes ganancias económicas al país y al estado, además la generación de empleos en toda la cadena productiva conlleva una derrama económica considerable (Villanueva Tomas & Zepeda Anaya, 2016).

El auge de este cultivo en Michoacán se debe a que las condiciones agroclimáticas son favorables para su desarrollo. Actualmente la producción de aguacate se distribuye en la zona noreste, centro y sur del estado, toda esta extensa región productora se conoce como la franja aguacatera (SIAP, 2020).

Desde hace algunos años la demanda de aguacate ha incrementado a razón de sus propiedades benéficas para la salud y nutrición humana y por su adaptabilidad a distintas dietas (Ornela & Yahia, 2002). Sin embargo, la creciente demanda del aguacate conlleva una fuerte presión ecológica para los sitios donde se produce.

En Michoacán uno de los problemas ambientales asociados a este cultivo es la conversión de ecosistemas forestales a tierras agrícolas, afectando procesos ecosistémicos fundamentales como por ejemplo los ciclos biogeoquímicos asociados a la dinámica de nutrientes en el suelo (Kochtcheeva & Singh, 2002).

Por otro lado, en la franja aguacatera es generalizado el uso de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades y fertilización. Usualmente la adición de agroquímicos se realiza con proporciones mayores a las requeridas por el cultivo, lo cual puede provocar impactos negativos al ecosistema por la contaminación química de cuerpos de agua y suelo por procesos de lixiviación, así como por de alterar la dinámica de nutrientes del ecosistema. Adicionalmente, el uso de agroquímicos también puede producir daños a la salud humana (Ruíz, 1999; Montiel-Aguirre *et al.*, 2007; Vidales-Fernández, 2009).

Sin embargo, para Michoacán hasta ahora, son pocos los trabajos que han analizado y expuesto los efectos del cambio de uso de suelo de bosques a cultivos de aguacate sobre el suelo y el ecosistema en general. Ante este panorama es evidente la necesidad de contar con información que permita hacer de la industria del aguacate, un sistema productivo sustentable. Por lo anterior, el objetivo general de esta tesis es aportar información sobre el estudio de la biogeoquímica y dinámica de nutrientes asociada al cambio de uso de suelo y manejo en el cultivo de aguacate. Para cumplir este objetivo, el trabajo se divide en dos capítulos:

- CAPITULO 1 “EFECTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE SOBRE LA SALUD AMBIENTAL Y SALUD HUMANA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA” busca identificar a través de una revisión bibliográfica las publicaciones científicas en torno al cultivo de aguacate en Michoacán y, de manera particular, identificar aquellas publicaciones científicas que analizan los efectos del cultivo de aguacate en el suelo y sus procesos biogeoquímicos, así como a la salud humana en el estado de Michoacán, para generar propuestas de líneas de investigación y estrategias de acción para reducir los efectos ambientales del cultivo de aguacate en el estado;

- CAPITULO 2 “DINÁMICA DE N Y P EN SUELOS DE CULTIVO DE AGUACATE” tiene como objetivo general, evaluar el efecto del cambio de uso de suelo y el tipo de manejo agrícola sobre la disponibilidad de nitrógeno y fósforo. Dos de los elementos fundamentales para el crecimiento vegetal, en huertos de aguacate con suelo de tipo andosol en Michoacán. Este capítulo nos permitió aportar en el conocimiento de la dinámica de nutrientes en el suelo de huertos de aguacate y en fragmentos forestales aledaños a las huertas. La información aquí presentada abona en el conocimiento de la línea base sobre la biogeoquímica asociada al cambio de uso de suelo por el cultivo de aguacate en Michoacán.

CAPÍTULO 1. EFECTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE SOBRE LA SALUD AMBIENTAL Y SALUD HUMANA: UNA REVISION BIBLIOGRÁFICA

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 AGUACATE, ORIGEN Y DOMESTICACIÓN

El aguacate es una especie vegetal de tronco grueso y hojas alargadas con varias ramificaciones que generan un follaje denso. Se estima que puede alcanzar hasta 20 mtrs de altura. El fruto es una drupa en forma de pera, de color verde claro a verde oscuro y de violeta a negro, cascara rugosa con una pulpa verde amarillenta y un hueso central muy grande. El peso puede variar de 150 a 350 gr (Pérez Álvarez et al., 2015).

Pertenece a la familia Lauraceae, conformada por al menos 92 géneros, entre ellos el género *Persea* Mill con alrededor de 85 especies distribuidas desde el sur de los Estados Unidos (*Persea borbonia* (L.) Spreng) hasta Chile (*Persea lingue* (Ruiz & Pav.) Nees), habiendo excepciones como *Persea indica* (L.) Spreng distribuida en España y posiblemente otras especies del sur de Asia que se piensa pertenecen a *Persea* (Sánchez Colín et al., 1998; Galindo-Tovar & Arzate-Fernández, 2010). Aunque la única especie de importancia económica en esta familia es *Persea americana* Mill (Pérez Álvarez et al., 2015).

Para esta especie (*Persea americana* Mill) se han descrito ocho variedades. Tres son reconocidas como variedades hortícolas: la guatemalteca (*Persea americana* var. *guatemalensis* (L.O.Williams) Scora), la antillana (*Persea americana* var. *americana* Mill) y la mexicana (*Persea americana* var. *drimyfolia* (Schltdl. & Cham.) S.F.Blake).

Estas tres variedades hortícolas son el resultado de un largo y complejo proceso de domesticación, el cual se sugiere ocurrió en el área geográfica conocida como Mesoamérica, específicamente en las partes altas del centro y este de lo que ahora es México y partes altas de Guatemala (Sánchez Colín et al., 1998). De acuerdo con Galindo Tovar et al, (2008) se pueden distinguir 4 fases el proceso de domesticación del aguacate:

1) Domesticación *in situ* a nivel de agroecosistema: los primeros pobladores de Mesoamérica recolectan los frutos de árboles de aguacate cercanos a los sitios donde se establecieron; posiblemente esto indujo a los primeros cambios morfológicos en el árbol.

2) Modificación no intencional del ambiente biofísico: cambios en el clima produjeron escases de aguacate, por lo que los pobladores ya familiarizados con el proceso de germinación de la semilla de aguacate comenzaron a sembrar las semillas de los mejores ejemplares como medida de conservación del aguacate.

3) Cultivo y selección intencional: los ejemplares con mejores características son llevados a hábitats más favorables; se incrementa la adaptación del árbol para usos específicos como culturales y religiosos.

4) Se cultiva bajo condiciones específicas que promueven su productividad, así como factores que estimulan su crecimiento y producción, de tal forma que se obtienen árboles con características genéticas diferentes a sus ancestros silvestres.

Como resultado de dicho proceso y aunado a evidencia basada en datos paleoecológicos, arqueológicos y etnohistóricos se sugiere que la variedad mexicana (*Persea americana* var. *drimifolia*) se originó en el área central de Veracruz, la variedad antillana (*Persea americana* var. *americana* Mill) en las tierras bajas Mayas de Yucatán y Belice y la guatemalteca (*Persea americana* var. *guatemalensis*) en las tierras altas de Guatemala (Galindo Tovar *et al.*, 2008).

Actualmente, a partir de la hibridación de estas tres variedades se han originado cultivares modernos del aguacate como el cultivar Hass, que por sus características es el más consumido y comercializado a nivel mundial. Sin embargo, existen otros cultivares como el Méndez, que tiene importancia económica en el país, ya que al tener un ciclo fonológico distinto al Hass, su cosecha anual se realiza entre los meses de junio y septiembre (periodo de poca disponibilidad del fruto Hass) por lo que suele alcanzar precios altos en el mercado (Herrera-González *et al.*, 2017; Salazar-García *et al.*, 2018).

1.1.2 AGUACATE EN MÉXICO Y FRANJA AGUACATERA

La variedad mexicana es también conocida como aguacate criollo, al ser una planta nativa que crece y es cultivada de manera natural, es decir sin ser producto de injerto o hibridación. Esta variedad incluye múltiples variedades nativas que son nombradas localmente (Álvarez Ojeda *et al.*, 2018). Algunos ejemplos de variedades de aguacates criollos son: Mantequilla, Criollo boleado negro, Campeón, Natalio, Marín, Melchor, Chino, El Redondo, El Negrito (Roldán-Estrada *et al.*, 1999; Campos Rojas *et al.*, 2011; Álvarez Ojeda *et al.*, 2018)

En México, el cultivo de aguacate ha estado presente desde tiempos precolombinos, pero no fue hasta 1927 cuando la Dirección General de Agricultura presentó el primer registro estadístico oficial de la producción y superficie ocupada por este cultivo con un total de 2910 ha y una producción de 270 303 ton conformadas principalmente por ejemplares criollos (Sánchez Colín *et al.*, 1998).

Desde entonces, la superficie y producción se ha incrementado constantemente, aunque el crecimiento no ha sido lineal, ya que algunos años han presentado baja producción del fruto. Por otro lado, las variedades que conforman el cultivo han cambiado con el paso del tiempo; en las décadas de los años 30 y 40 los aguacates criollos representaban gran parte de la superficie cosechada: estados como Michoacán, Puebla, México y Veracruz, contaban con la existencia de ejemplares criollos de gran calidad. En la década de los años 50 se inició la introducción de nuevos cultivares como el Fuerte, Bacon y Zutano (desarrollados a través de técnicas de injerto). La introducción del aguacate Hass no ocurrió hasta 1963 con los primeros viveros comerciales. En 1964 se establecieron los primeros huertos comerciales teniendo gran aceptación en el mercado nacional, esto provocó la sustitución de las variedades Fuerte y Criollas (Sánchez Colín *et al.*, 1998).

A nivel mundial, cerca de 60 países producen aguacate con más de 500 variedades, sin embargo, México produce tres de las más importantes: Hass, Criollo y Fuerte (SIAP, 2016). En suma, es el principal productor de este fruto con 2 029 886 ton, que son exportadas a gran parte del mundo: Estados Unidos, Canadá, Chile, Argentina, España, Portugal, Francia, Italia, Alemania, Japón, China, Corea del Sur, India, Australia, Tasmania, Nueva Zelanda, entre otros (SIAP, 2018).

La producción nacional de aguacate está liderada por los estados de Michoacán, Jalisco y Edo. de México, que en conjunto conforman más del 90% del volumen de producción total, el resto corresponde a los estados de Nayarit, Morelos, Guerrero, Puebla, Chiapas, Yucatán, y Oaxaca (SIAP, 2018).

Michoacán concentra el mayor volumen de producción con 1 565 896 ton anuales y una superficie de 166 000 ha, convirtiéndose en el estado líder de la producción nacional de aguacate (SAGARPA & SIAP, 2018; SIAP, 2018). El cultivo se establece principalmente en la zona centro del estado, así como la zona sur y noreste del estado; toda esa zona es conocida como la franja aguacatera, la cual está conformada por 67 municipios (Figura 1.1) (SIAP, 2020).

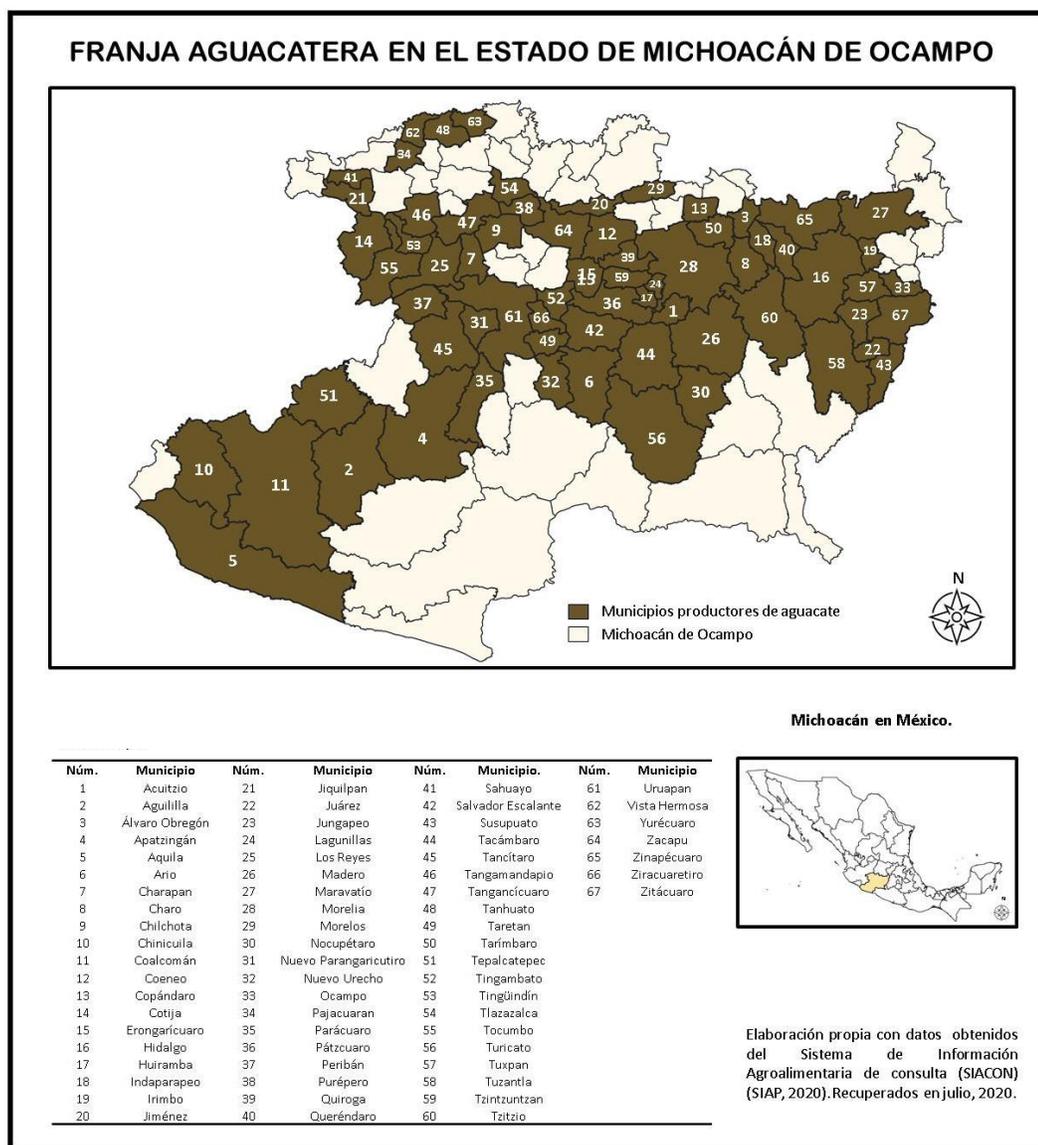


Figura 1.1 Franja aguacatera en Michoacán, la cual se extiende en 67 municipios. Elaboración propia con base en el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) (SIAP, 2020).

1.1.3 TIPOS DE MANEJO AGRÍCOLA EN LA FRANJA AGUACATERA

En la región aguacatera de Michoacán existen varios de tipos de manejo, en general se puede categorizar en 2 tipos dependiendo de los insumos utilizados: agricultura orgánica y la convencional (Gavito Pardo *et al.*, 2011).

La agricultura orgánica, de acuerdo con la FAO y OMS (2001), se puede definir como un sistema holístico de gestión de la producción que fomenta y mejora la salud del agroecosistema, enfocándose principalmente en la biodiversidad, los ciclos y la actividad

biológica del suelo; promueve el uso de insumos naturales en contraposición al uso de materiales sintéticos. Además, emplea una gran variedad de opciones tecnológicas para reducir y recuperar los costos de producción; intensifican las interacciones biológicas y procesos naturales que benefician a lo largo del proceso productivo (Yee Wha *et al.*, 2003).

En Michoacán, el modelo de producción orgánica de aguacate comenzó en 1996, año de certificación de la primera huerta de aguacate orgánico en el estado, desde entonces este modelo ha crecido de forma exponencial, especialmente en los últimos años por la concientización de los productores y por alto impacto ecológico resultante de la agricultura convencional (Villafán Vidales, 2006). Actualmente, la producción orgánica de aguacate en el estado genera la producción de aguacates de buena calidad y libre de tóxicos, a través de la aplicación de conocimientos empíricos y científicos.

Por otro lado, el modelo de producción agrícola convencional se caracteriza por aplicar técnicas del modelo de producción de la revolución verde, basado en una alta productividad del sistema por medio del uso de paquete tecnológicos conformados por insumos artificiales como fertilizantes, plaguicidas y herbicidas sintéticos (Gavito Pardo *et al.*, 2011). Este modelo es el modelo de producción agrícola mayormente utilizado en el cultivo de aguacate en Michoacán (Villafán Vidales, 2006).

En la agroindustria del aguacate se utilizan diferentes paquetes tecnológicos, existe gran heterogeneidad en los paquetes usados por los productores, esto porque depende en gran medida del asesoramiento (técnico agrícola o proveedor de insumos) que reciban los productores (FIRA, 2007).

Sin embargo, se han diseñado algunos paquetes tecnológicos (Tapia Vargas *et al.*, 2005; Morales García *et al.*, 2018) donde, de manera general, se describen factores como el tipo de clima y suelo apropiados para el cultivo de aguacate, así como técnicas de fertilización y manejo de plagas y enfermedades. A continuación, se describen las técnicas referentes a la fertilización y control de plagas y enfermedades mencionadas en dichos paquetes tecnológicos:

Fertilización

La fertilización es específica de cada sitio, dependerá de los resultados de contenido de nutrientes en el suelo y análisis foliar (permite conocer los nutrientes removidos por el fruto cosechado). A partir de estos resultados se calcula la cantidad de cada nutriente (macro y micro) que requiere el huerto.

En huertos de temporal se recomienda realizar la fertilización durante el periodo de lluvias. En huertos de riego o fertirriego los nutrientes deberán suministrarse en pequeñas dosis mensualmente.

Control de plagas y enfermedades

Al ser un cultivo regido por la SENASICA se debe utilizar un listado de plaguicidas autorizados por el control de plagas y enfermedades. La aplicación de plaguicidas debe ser calendarizada y mensual.

Control de malezas

Puede realizarse de manera mecánica, control de altura o por control químico, aplicando productos como el Transcuat o Glifosato cuando la hierba alcance aproximadamente 20 cm de altura.

En este sentido, para el presente trabajo se utilizó una categoría más en lo referente al manejo agrícola del cultivo del aguacate, el manejo semiconvencional, el cual comparte técnicas tanto del manejo orgánico como del convencional tanto en la fertilización, control de plagas y control de malezas.

1.1.4 IMPACTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE EN LA FRANJA AGUACATERA

El cultivo de aguacate ha generado impactos positivos y negativos en Michoacán. Los impactos positivos se reflejan principalmente en el aspecto socioeconómico: aumento del ingreso económico en la región productora, la activación de empresas de fertilizantes, insecticidas y servicios agronómicos, creación de empleos (temporales y permanentes), crecimiento de infraestructura, así como el crecimiento y establecimiento de las empresas dedicadas al cultivo de aguacate (Garibay & Bocco, 2007).

La agroindustria del aguacate ha generado alrededor de 47 000 empleos directos, 70 000 empleos estacionales y 187 000 empleos indirectos permanentes dando un total de 304 000 empleos anuales. Algunos de los empleos indirectos están relacionados a servicios asociados como son el establecimiento de industrias de agroquímicos, servicios de irrigación y de asesoría agronómica y comercial (Chávez-León *et al.*, 2012). De esta manera no es extraño que en Michoacán haya al menos 352 empresas certificadas por la SENASICA para la para la distribución de plaguicidas, convirtiéndolo en el estado con mayor número de empresas certificadas dedicadas a este ramo (SENASICA, 2021).

De acuerdo con Villanueva Tomas & Zepeda Anaya (2016), la producción de aguacate ha sido un factor detonante en la disminución de la pobreza alimentaria, de capacidades y de patrimonio en los municipios donde al menos el 50% de sus ingresos agrícolas provienen de dicha actividad, comparado con los municipios donde no se dedican a esa actividad. Aunque, es importante señalar que esta contribución no ha sido considerable ya que los ingresos obtenidos de la producción y exportación del aguacate no suelen distribuirse de forma homogénea entre los involucrados.

Por otra parte, los efectos negativos de este cultivo son visibles especialmente en el ambiente, en los ecosistemas cercanos a los sitios de producción de aguacate. Algunos de los principales factores que intervienen en la degradación del ambiente en la región están relacionados con uso excesivo de agroquímicos y el cambio de uso de suelo (CUS) (Bravo Espinoza *et al.*, 2009; Vidales-Fernández, 2009).

En los 67 municipios, el uso de agroquímicos como fertilizantes y pesticidas es generalizado, por su uso en actividades de fertilización y control de plagas, enfermedades y malezas que pueden afectar el cultivo (Montiel-Aguirre *et al.*, 2007). Los pesticidas se pueden clasificar en dos grupos: a) por su tipo de uso: insecticidas, herbicidas, fungicidas, etc.; y, b) de acuerdo con la estructura química de la sustancia activa: organoclorados, organofosforados, piretroides, compuestos inorgánicos, carbamatos, entre otros (Badii & Landeros, 2015).

Algunos de los agroquímicos utilizados en los cultivos de aguacate son fertilizantes nitrogenados, potásicos y cálcicos; herbicidas del grupo 2-4 D, paraquat y glifosato; e insecticidas del grupo orgánico-fosforado y piretroides (Tapia Vargas & Bravo Espinoza,

2015). Anualmente en la franja aguacatera de Michoacán se estima que son utilizadas 30 000 ton de fertilizantes, 450 000 L de insecticidas y 900 000 ton de fungicidas (Vidales, 2007). Bajo este panorama, es común que la aplicación de agroquímicos se realice en demasía, provocando consecuencias negativas a la calidad del suelo, los mantos acuíferos y a la salud humana y de animales (Ruíz, 1999; Vidales-Fernández, 2009).

1.1.5 IMPACTOS AL SUELO, MANTOS ACUÍFEROS Y SALUD HUMANA DEL USO DE AGROQUÍMICOS UTILIZADOS EN CULTIVOS DE AGUACATE

En el suelo, la aplicación de pesticidas puede afectar a la microflora del suelo que incluye: bacterias, hongos, algas y protozoos. Estos organismos son importantes ya que son los encargados de la degradación de residuos de restos de otros organismos, transformándolos en materia orgánica que da estabilidad y aumenta la fertilidad de los suelos. La materia orgánica tiene un papel fundamental en el suelo, de ella depende el funcionamiento de los ecosistemas al regular procesos como el ciclo de nutrientes y transferencia de energía (Chowdhury *et al.*, 2008).

El uso de pesticidas y fertilizantes en los sistemas agrícolas es considerado como uno de los principales agentes de contaminación de reservorios de agua. El uso excesivo de agroquímicos produce una sobreacumulación de estas sustancias (sea en fase sólida o líquida) en el suelo, que por procesos de desorción (liberación) y lixiviación pueden llegar hasta el agua subterránea (Bibi & Ilyas, 2020; Panjaitan *et al.*, 2020). Algunos de los nutrientes más abundantes en los cuerpos de agua son el nitrógeno y fósforo, producto de la fertilización de campos agrícolas. El exceso de estos nutrientes en el agua favorece el crecimiento de lirio acuático (*Eichhornia*), así como microalgas y fitoplancton que pueden ser generados por los grupos Cyanophyceae (cianobacterias), Dinophyceae, Chlorophyceae, Cryptophyceae, Chrysophyceae, Euglenophyceae y Bacillariophyceae (Almanza *et al.*, 2016). Este proceso es conocido como eutrofización (Carpenter *et al.*, 2006).

La persistencia de los plaguicidas en el ambiente depende de las características químico-biológicas y de su nivel de degradabilidad. Algunos plaguicidas tienen una mayor permanencia en el ambiente aumentando la probabilidad de entrar en contacto con otros elementos del sistema como es el aire, biota, suelos y agua (Badii & Landeros, 2015).

En cuanto la exposición humana y animal a plaguicidas, puede ser por el contacto con la piel, inhalación o ingesta (esencialmente al consumir alimentos contaminados por la agregación de estas sustancias químicas en suelo y agua); esta última vía de exposición es considerada como la vía de mayor grado de intoxicación al mostrar más incidencias (Margni *et al.*, 2002; Nicolopoulou-Stamati *et al.*, 2016).

En el contexto de la agroindustria del aguacate es importante señalar que el uso de pesticidas es un factor de riesgo para la salud pública, pero el mayor grado de vulnerabilidad a ser afectado por los riesgos de la aplicación de estos insumos son las personas encargadas de su manipulación (Jiménez Quintero *et al.*, 2016).

Con el objetivo de reducir los accidentes con relación al uso de plaguicidas en los cultivos agrícolas la FAO ha elaborado para guías de buenas prácticas para su aplicación, donde se destaca la capacitación previa del operador para manipular los agroquímicos, el uso de equipo de seguridad personal, es decir aquella indumentaria que evite el contacto directo con la piel o la inhalación de partículas, el almacenamiento del producto sobrante o la eliminación de los contenedores vacíos (FAO, 2002).

Sin embargo, evadir estas recomendaciones conlleva serios daños a la salud. Algunos de los efectos negativos de los pesticidas a la salud humana se relacionan a casos de cáncer, cambios genéticos o mutaciones, defectos de nacimiento, daños en el sistema circulatorio y nervioso, desórdenes del sistema endocrino, reproductivo, inmune, problemas gastrointestinales, neurológicos, respiratorios y dermatológicos (Panjaitan *et al.*, 2020; Nicolopoulou-Stamati *et al.*, 2016).

1.1.6 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO (CUS) EN LA REGIÓN PRODUCTORA DE AGUACATE EN MICHOACÁN

El cambio de uso de suelo, en este contexto implica la modificación o reconversión de tierras con vocación forestal a campos agrícolas para la producción de este cultivo (Bravo Espinoza *et al.*, 2009; Barsimantov & Navia Antezana, 2012). Este proceso ha afectado principalmente a la región conocida como Meseta Purhépecha, donde al menos el 80% de los municipios que la conforman son productores de aguacate (Garibay & Bocco, 2007).

Esta zona es donde se ha visto la mayor conversión de bosques de coníferas y latifoliadas a parcelas agrícolas (Garibay & Bocco, 2007). Es aquí donde se muestra la mayor

conversión en superficie hacia la agricultura en el periodo de 1976 a 2005. Los motivos de pérdida de superficie boscosa pueden ser varios, pero entre ellos destaca la expansión de la frontera agrícola para la producción de aguacate. Además, es importante señalar que generalmente, la expansión del cultivo de aguacate ocurre en zonas cercanas a áreas previamente ocupadas por este cultivo, aunque también se ha extendido a sitios donde anteriormente no estaba presente cultivo (Morales Manilla *et al.*, 2012).

El CUS se considera como uno de los principales agentes de cambio en la estructura y dinámica del paisaje y las funciones y dinámicas del ecosistema. Los cambios generados en el ecosistema inducidos por el manejo comprenden cambios en los flujos de energía, en la biodiversidad, los ciclos biogeoquímicos y en los procesos hidrológicos importantes en la región (Peng *et al.*, 2006; Tasser *et al.*, 2015). Esto porque el CUS puede afectar los flujos de calor sensible y latente, nutrientes y contaminantes al alterar los procesos de intercambio entre ecosistemas y las capas bajas de la atmósfera, generando retroalimentaciones entre el CUS y las tendencias de cambio climático (Tasser *et al.*, 2005).

Algunos de los procesos biogeoquímicos que pueden ser alterados por el CUS y el manejo agrícola son la entrada y salida de nutrientes en los ecosistemas (Wu *et al.*, 2017) y los procesos de descomposición de la materia orgánica, es decir, la transformación de moléculas complejas a moléculas simples (Heijboer *et al.*, 2018). Adicionalmente la mineralización de nutrientes como el nitrógeno y fósforo, que es la transformación de formas orgánicas disueltas a formas inorgánicas asimilables por las plantas como los amonios, nitratos y ortofosfatos (Rhoades & Coleman, 1999; Zeller *et al.*, 2000; Templer *et al.*, 2005). Así también, la inmovilización de nutrientes en biomasa microbiana puede sufrir cambios al alterar las comunidades de microorganismos del suelo (Li *et al.*, 2019).

En conjunto, el uso de agroquímicos y el CUS, pueden incidir en la degradación del ambiente, al afectar los ecosistemas a través de la contaminación del aire, agua y suelo, la alteración de ciclos biogeoquímicos, en el clima, así como degradación de suelos y cuerpos de agua (Kochtcheeva & Singh, 2002). La degradación del ambiente se ve reflejada en los cambios que ocurren en la biosfera y sus soportes vitales entre los que se incluyen el aprovechamiento y producción de alimentos (marinos y terrestres), así como las barreras que representan los bosques contra desastres naturales y los agentes de enfermedades infecciosas

y vectores (Rapport *et al.*, 1998). Por tanto, al alterar los ecosistemas, también afectamos la salud humana y el ambiente, ya que este último es el que provee de bienes y servicios esenciales para la supervivencia y buena salud del ser humano.

Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, Michoacán es líder nacional en la producción de aguacate, la producción de este fruto tiene gran importancia económica por el alto valor de sus exportaciones (SIAP, 2016). Además, cada año la superficie ocupada por este cultivo incrementa (SADER & CMDRS, 2019). Por lo tanto, es importante conocer los esfuerzos de investigación realizados a la fecha enfocados a este cultivo y, de esta manera, conocer las áreas de estudio que han sido más abordadas e identificar las áreas de oportunidad para futuras investigaciones. No obstante, el auge de este cultivo tiene un trasfondo ambiental desalentador, ya que desde hace tiempo está provocando graves problemas socioambientales, entre ellos la pérdida de cobertura forestal, CUS y la contaminación por agroquímicos en la región productora del estado (Alarcón-Cháires, 2020).

En este sentido, es fundamental hacer énfasis en los estudios relacionados al estudio del suelo y a la salud humana. En primer lugar, porque el suelo es uno de los ecosistemas que alberga gran cantidad de microorganismos que contribuyen en los ciclos de los elementos que hacen posible la vida y es el sustento de la vida humana. Factores como el CUS y el uso de productos químicos en la producción agrícola, pueden alterar su funcionamiento y, por consiguiente, los procesos del suelo relacionados al ciclo de nutrientes, descomposición de la materia orgánica, mantenimiento de la estructura del suelo; todo esto generando suelos degradados.

Por otro lado, el excesivo uso de agroquímicos en el cultivo de aguacate representa un grave problema de salud a las personas que están en contacto directo e indirecto. De tal forma que, si este tipo de problemáticas no son atendidas por los diferentes actores involucrados como son las dependencias de gobierno correspondientes, los dueños y trabajadores de los huertos de aguacate, la comunidad científica y los consumidores, estos últimos tienen un papel importante al momento de elegir productos valorando los procesos que conlleva para su producción, así como el impacto ambiental generado en su producción y distribución. En conjunto, estos factores pueden llevar al colapso de la industria aguacatera en Michoacán.

Así pues, el objetivo de este capítulo es identificar a través de una revisión bibliográfica las publicaciones científicas en torno al cultivo de aguacate en Michoacán y, en particular, identificar aquellas publicaciones científicas que analicen los efectos del cultivo de aguacate en el suelo y sus procesos biogeoquímicos y en la salud humana en el estado de Michoacán. Lo anterior con el fin de generar información que permita diseñar estrategias integrales para hacer uso eficiente de los agroquímicos en la zona aguacatera de Michoacán, para reducir los riesgos de contaminación ambiental y a la salud humana y frenar la degradación de los ecosistemas forestales.

1. 2 MÉTODOS

La búsqueda bibliográfica se realizó en agosto de 2020, en la base de datos de Web of Science (WoS) (<http://www.webofknowledge.com/>) y Scopus (<https://www.scopus.com/>); se utilizaron estos buscadores ya que se caracterizan por ser bases de datos multidisciplinarias y cuentan con herramientas que facilitan el manejo de la información recabada. Se definieron las palabras clave: “Avocado AND Michoacan”. La búsqueda bibliográfica se limitó a la categoría “País” y se seleccionó “Mexico” y de delimitó al periodo de 1970-2020, ya que a partir de esta década incrementó notablemente el cultivo de aguacate en México (Sánchez Colín *et al.*, 2001).

Una vez realizada la búsqueda bibliográfica se compararon los resultados obtenidos en ambas bases de datos. De esta manera se eliminaron resultados repetidos y se omitieron aquellos que no estuvieran relacionados con el aguacate. Posteriormente, los resultados obtenidos sin repeticiones se clasificaron por área de estudio: Ciencias de la Vida, Ciencias Sociales, Ciencias Físicas y Tecnología; estas categorías fueron asignadas con base en la clasificación de la Colección Principal de Web Of Science (https://images.webofknowledge.com/WOKRS519B3/help/es_LA/WOS/hp_database.html). Cada una de estas áreas de estudio abarcan una serie de disciplinas y temas/ramas de investigación en las que se clasificaron los resultados (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Categorías de clasificación de los 78 resultados sin repeticiones obtenidos de la búsqueda bibliográfica: “Avocado AND Michoacan” limitada a México, en el período de tiempo de 1970-2020 en las bases de datos de WoS y Scopus. Las coincidencias en los temas/ramas/técnicas de investigación se comparten en entre distintas disciplinas, ya que se encontraron trabajos que coincidieron en más de una de una disciplina.

Área de estudio	Núm. Pub.	Disciplinas	Núm. Pub.	Temas/ramas/técnicas
Ciencias de la Vida	72	Ciencias Agrícolas	61	Horticultura, Fitosanidad, Agroecología, Parasitología, Agricultura Sustentable, Entomología, Diversidad Genética, Certificaciones, Bioinformática, Manejo Agrícola, Nutrición, Control Biológico, Conservación, Propagación de plantas, Biodiversidad, Suelo
		Ciencias Ambientales	17	Cambio de uso de suelo/Cubiertas, Usos de suelo, Planificación, Gestión Ambiental, Conservación, Suelo, Agricultura Sustentable, Sostenibilidad, Biodiversidad
		Biología	54	Fitosanidad, Plagas y enfermedades, Entomología, Bioinformática, Variabilidad Genética, Parasitología, Control Biológico, Herpetofauna, Ecología, Fragmentación, Nutrición, Suelo, Fitoquímica, Ecofisiología
Ciencias Sociales	18	Economía y Negocios	17	Certificaciones, Economía, Producción, Parámetros de calidad, Relaciones Internacionales, Comercio, Mercado, Negocios internacionales
		Gobierno y Legislación	5	
		Geografía	12	Sistemas de Información Geográfica, Usos de suelo, Planificación, Gestión Ambiental, Patrones de Vegetación, Cubiertas
Ciencias Físicas	2	Química	2	
Tecnologías	9	Ingenierías	8	Energía, Modelación
		Informática	2	Bioinformática, Modelación matemática

Además, para la disciplina Ciencias de la Vida, por ser la disciplina más amplia, se realizó una nube de palabras en el generador: (<https://www.nubedepalabras.es/>) ingresando una lista con los nombres de los temas/ramas/técnicas en los que se clasificaron los resultados, así como el número de veces que se mencionaron en los artículos analizados.

Posteriormente, una vez seleccionados los artículos sin repeticiones, se identificaron las publicaciones científicas asociadas al suelo y sus procesos biogeoquímicos, así como las publicaciones científicas realizadas en el área de la salud.

1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la búsqueda realizada en WoS se encontraron 56 publicaciones y en Scopus 72 publicaciones. Una vez que se eliminaron las publicaciones repetidas, el resultado final corresponde a 78 publicaciones científicas registradas sobre el cultivo de aguacate en el estado de Michoacán en el periodo de 1970-2020 (Figura 1.2).

En 1977 se registró la primera publicación, con García & Tsunewaki (1977) estudiaron la actividad de la enzima peroxidasa a través de la técnica de zimografía en estados productores de aguacate en México, entre ellos Michoacán; a partir de esta publicación no se tiene registro de ninguna otra hasta el año 2002.

La producción de aguacate en México comenzó a tener auge desde la década de los años 70, pero no fue hasta la década de los años 90 cuando Michoacán destacó en la producción del fruto posicionándose como el principal productor de aguacate en México (Sánchez Colín *et al.*, 1998). A pesar de esto, durante la década de los años 90 no se tiene ningún registro de publicación científica en las bases de datos consultadas (Wos y Scopus).

En el año 2002, después de 24 años sin ninguna publicación científica para el estado de Michoacán, que se registraron 4 publicaciones (Estrada-Venegas *et al.*, 2002; Iturriaga *et al.*, 2002; Stanford, 2002; Valle-Guadarrama *et al.*, 2002). Es también a partir de este año que las publicaciones se han mantenido activas hasta el presente con un promedio de 4 publicaciones al año, siendo en 2017 el año más productivo con 10 publicaciones científicas.

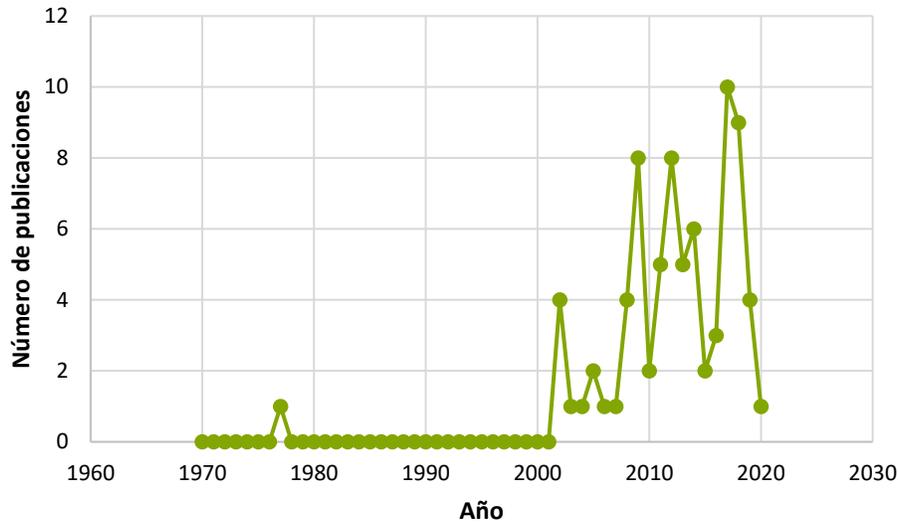


Figura 1.2 Número de publicaciones por año en el período de tiempo de 1970-2020. Los resultados corresponden a las 78 publicaciones científicas obtenidas de la consulta en las bases de WoS y Scopus con las palabras clave “Avocado AND Michoacan” limitados por país “Mexico”.

Los 78 resultados obtenidos de la revisión bibliográfica en las bases de datos de WoS y Scopus, se dividieron en 4 áreas de conocimiento: 1) Ciencias de la Vida, 2) Ciencias Sociales, 3) Ciencias Físicas y 4) Tecnologías. Cada una de estas áreas comprenden distintas disciplinas que abarcan distintos temas (Tabla 1.1). El área de estudio donde se han registrado el mayor número de publicaciones científicas corresponde a el área de Ciencias de la Vida con 72 publicaciones representadas en 3 diferentes disciplinas: ciencias agrícolas, ciencias ambientales y biología; ciencias agrícolas abarca el 46% de las publicaciones, seguido de biología con 41% y las ciencias ambientales apenas conforman un 13% de las publicaciones totales.

En el área de Ciencias de la Vida y las disciplinas que la conforman se estudian temas/ramas de investigación enfocados principalmente a plagas y enfermedades que afectan el cultivo de aguacate en Michoacán, algunos ejemplos de estos estudios corresponden a Ávila-Quezada *et al.* (2005) quienes analizaron el daño que ocasionan algunos insectos pertenecientes al Orden *Thysanoptera* o mejor conocidos como Trips en los cultivos de aguacate; Hernández Pérez *et al.* (2019) emitieron el primer reporte de la presencia del oomiceto *Phytophthora vexans* (de Bary) Abad, de Cock, Bala, Robideau, Lodhi & Lévesque patógeno que hasta hace poco tiempo, es considerado por miembros de la comunidad

científica como uno de los responsables de la sintomatología de la tristeza del aguacate, además del ya conocido *Phytophthora cinnamomi* Rands; Ochoa-Fuentes *et al.* (2015) estudiaron la variabilidad patogénica de ocho variantes genéticas de *Phytophthora cinnamomi* Rands por Ochoa-Fuentes *et al.* (2015). Así también se ha analizado. Rodríguez-López *et al.* (2013) analizaron la infección del aguacate por el hongo *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc., responsable de la enfermedad llamada antracnosis.

Aunado al estudio de plagas y enfermedades se encuentran también algunos estudios relacionados al control biológico (Sánchez-Saavedra *et al.*, 2012; Lara-Chávez *et al.*, 2013) y la entomología (Aluja *et al.*, 2004; Lara *et al.*, 2017; Trujillo-Pahua & Ibáñez-Bernal, 2019) (Figura 1.4). El que la mayoría de los estudios se encuentre dentro de estas áreas puede deberse a la importancia económica del aguacate. Contar con dicha información favorece la implementación de buenas prácticas agrícolas que garanticen el cumplimiento de las especificaciones fitosanitarias nacionales y regulaciones de los diferentes países a los que se exporta el aguacate (Rodríguez-Campos *et al.*, 2011).

Existen otros temas que aún no han sido ampliamente explorados como los anteriormente mencionados; algunos de ellos son desde el enfoque de la sustentabilidad, la agroecología, la genética y temas relacionados al estudio del suelo (Figura 1.3), este último tema se retomará en la siguiente sección.



Figura 1.3 Nube de palabras sobre los temas abordados en las disciplinas de Ciencias Agrícolas, Ciencias Ambientales y Biología. El tamaño de la palabra varía en función de cuantas veces es mencionada en los textos analizados.

Ciencias Sociales es la segunda área de conocimiento con mayor número de publicaciones (18 publicaciones científicas) divididas en las disciplinas de economía y negocios, gobierno y legislación, y geografía; de éstas el 50% de las publicaciones realizadas están relacionadas a economía y negocios, el 35% corresponden a estudios geográficos y el 15% restante corresponde a gobierno y legislación.

En economía y negocios los temas más abordados son los referentes a economía (Stanford, 2002; Riedemann & Echánove Huacuja, 2003; Thiébaud, 2012; Valenzo-Jiménez & Martínez, 2018). Los estudios del campo geográfico se enfocan en temas de cambio de uso de suelo, cubiertas, usos de suelo y análisis espaciales a través del uso de sistemas de información geográfica (Barsimantov & Navia Antezana, 2012; Gopar-Merino & Velázquez, 2016; Campos-Campos *et al.*, 2018; Ramírez-Sánchez *et al.*, 2019).

En el área de tecnología únicamente se encontraron 9 publicaciones científicas, relacionadas a las ingenierías e informática, abarcan temas de consumo energético en huertas aguacate, modelación para la planeación del establecimiento del cultivo de aguacate, el uso de esquilmo de aguacate, así como la creación de un modelo para estimar el área del fruto afectada por antracnosis (Morales García *et al.*, 2009; Anaya & Burgos, 2015; González-Estudillo *et al.*, 2017; Medina Orozco & Medina Orozco, 2018).

Respecto a las ciencias físicas, únicamente se encontraron 2 publicaciones en la disciplina de la química: Valle-Guadarrama *et al.* (2002) evaluaron la permeabilidad y la composición gaseosa de la piel del aguacate 'Hass' a través de cámaras de superficie, ya que la piel del aguacate representa una barrera en el intercambio de gases a la atmósfera como el O₂ y CO₂, utilizados en la atmósfera de almacenamiento post cosecha, debido a que estos pueden controlar procesos fisiológicos al interrumpir procesos metabólicos, prolongando el tiempo de vida del fruto en almacenamiento. El otro artículo corresponde a Medina-Carrillo *et al.*, (2017) donde cuantificaron el contenido de compuestos fenólicos, clorofilas, carotenoides y lignina en la piel de ejemplares de aguacate 'Hass' bajo cinco etapas de desarrollo, dichos. Dichos ejemplares procedentes de 3 regiones productivas, cada una de estas regiones con diferente clima y altitud. Lo anterior se realizó porque se considera que los metabolitos secundarios y lignina en la piel del aguacate funcionan como mecanismos de

defensa o de adaptación al medio. Sin embargo, se desconoce cómo los factores climáticos afectan su presencia en la piel del fruto.

1.3.1 EFECTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE EN LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS DEL SUELO Y A LA SALUD HUMANA

De las 78 publicaciones encontradas a partir de la búsqueda bibliográfica, solo se identificaron 7 publicaciones que evaluaron algún aspecto del suelo. En algunas de estas publicaciones los autores estudian características del suelo para el establecimiento del cultivo de aguacate tal como el trabajo de Dubrovina & Bautista (2014), donde a través de una revisión bibliográfica identificaron los requerimientos de suelo y climáticos para el cultivo de aguacate y, a partir de esta información, desarrollan escalas de idoneidad de suelo y climáticas. El estudio se realizó en 22 municipios productores de aguacate localizados en la parte central de Michoacán. Por su parte Ramírez-Sánchez *et al.*, (2019) evaluaron la aptitud territorial para el cultivo de aguacate en la Región del Pico de Tancítaro considerando el conocimiento local del paisaje de la región, los factores socio económicos y ambientales considerados por los agricultores y a través de la implementación de un modelo agrilocal que considera las prácticas agrícolas del sitio.

Posteriormente se encuentra el trabajo de Castillo-Vega *et al.*, (2010) donde bajo condiciones de invernadero, los autores evaluaron el papel de los hongos endofíticos de raíz en la nutrición con boro en plantas de aguacate en suelo de tipo andosol, el cual es representativo de la mayor parte de la zona productora de aguacate. En este trabajo se analiza la acumulación de boro en diferentes partes de la planta, la firmeza del tallo y la disponibilidad de boro en el suelo asociada a la presencia de hongos endofíticos de raíz.

Por otro lado, en Salazar-García *et al.* (2011), entre otras variables, evaluaron el efecto de la humedad del suelo en el peso del fruto (fresco y seco) y en el contenido de la materia seca; esto se realizó en el municipio de Tancítaro en un suelo de tipo andosol en huertas de aguacate mayores a 10 años.

Dentro de estos 7 artículos también se identificaron las publicaciones científicas relacionadas a los procesos biogeoquímicos en el suelo, se encontraron 3 resultados, el primer resultado relacionado a estudios de suelo es de Ordóñez *et al.* (2008) donde hablan sobre la estimación del contenido de carbono en la vegetación, hojarasca y suelo en 10 clases diferentes de uso

de suelo y coberturas de suelo en la región Purépecha, una de estas clases corresponde a huertas de aguacate. Posteriormente se encuentra el trabajo González-Cortés *et al.* (2012) en donde analizan la riqueza de especies y composición de los hongos micorrícicos arbusculares frente al cambio de uso de suelo (bosque nativo a plantaciones de aguacate o maíz). Finalmente, el trabajo de Tapia Vargas *et al.*, (2012) donde evaluaron dos sistemas de riego, por macroaspersión y riego tradicional con manguera, sobre la lixiviación de nitratos y el efecto en la concentración de N foliar. La medición de nitratos en el suelo se realizó a tres profundidades 30, 60 y 90 cm. En la tabla 1.2 se encuentran resumidos los resultados obtenidos relacionados al suelo y procesos biogeoquímicos de las publicaciones anteriores.

Tabla 1.2 Resultados obtenidos sobre el suelo y procesos biogeoquímicos, en la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos de Web of Science y Scopus sobre el estudio del cultivo de aguacate en Michoacán.

Sitio	Tipo de suelo	Sistema	Resultados relacionados a suelo y procesos biogeoquímicos	Año	Fuente
Región Purépecha	No especificado	Región conformada principalmente por bosque de pino, pino-encino, y encino, otros tipos de vegetación como matorrales, pastizales, agricultura de secano, huerto de aguacate y tierras de pastoreo.	De acuerdo con la profundidad de suelo muestreada, se encontraron diferencias significativas en el contenido de carbono el suelo, a los primeros 5cm la clase con mayor contenido fue el bosque de roble y el más bajo se encontró en suelos agrícolas; en la profundidad de 5-15cm la clase con mayor contenido fue el bosque de pino-encino y el más bajo fue el bosque degradado. En la 3a profundidad (15-30cm) el bosque de encino fue nuevamente la clase con mayor contenido de carbono y bosque degradado con menor cantidad.	2008	Ordóñez <i>et al.</i> , 2008
Región Purépecha (Salvador Escalante y Los Reyes)	Andosoles húmicos	En ambos sitios se eligieron 6 sitios: En Los Reyes 2 sitios con uso forestal, 2 sitios con huertas de aguacate y 2 con cultivo de maíz. En Salvador Escalante únicamente se eligieron 2 sitios con uso forestal y 2 con huerta de aguacate.	En todos los sitios de estudio, las propiedades del suelo medidas en el estudio muestran una baja relación con las comunidades de hongos micorrícicos arbusculares. 1	2012	González-Cortés <i>et al.</i> , 2012
Choritiro, Tancítaro, Michoacán	Hapludand vítrico conocido localmente como tupuri	Huerto comercial de aguacate Hass de 10 años.	A la profundidad de 30 cm la concentración de nitratos en la solución del suelo para ambos tipos de riego. Sin embargo, a los 60 y 90 cm incrementó la concentración de nitratos, especialmente con el riego tradicional con manguera, por lo que se puede decir que este tipo de riego favorece la lixiviación de nitratos.	2012	Tapia-Vargas <i>et al.</i> , 2012

En lo referente a la salud humana, de las 78 publicaciones científicas resultantes de la búsqueda bibliográfica, en Michoacán hasta el año 2020 no se identificó ninguna publicación científica que abarque algún tema de salud; esto indica que en las bases de datos consultadas aún no se han registrado publicaciones en este tema, pero no significa que la asociación entre el cultivo de aguacate y sus prácticas agrícolas, así como sus efectos a la

salud humana aún no sean analizados, ya que existe evidencia de los efectos negativos del uso de pesticidas en el cultivo de aguacate a la salud, tal como intoxicaciones vinculadas a una exposición de corto tiempo con efectos sistémicos o localizados y manifestaciones o patologías vinculadas a la exposición a bajas dosis por largo tiempo (del Puerto Rodríguez *et al.*, 2014).

Con base en los resultados obtenidos, se puede decir que dicha información ha sido poco considerada y qué en Michoacán, por la importancia de este cultivo debería estar entre los temas de estudio más abordados para garantizar la salud de las personas que de forma directa e indirecta están en contacto con los agroquímicos.

1.4 CONSIDERACIONES FINALES

Se realizó una búsqueda bibliográfica sobre el cultivo de aguacate en Michoacán en el período de 1970-2020. De los resultados, al menos el 70% de las publicaciones encontradas se han realizado en años recientes (2010-2020). Los resultados se pueden clasificar en las áreas de estudio de Ciencias de la Vida, Ciencias Sociales, Tecnología y Ciencias Físicas. De éstas, Ciencias de la Vida es el área que alberga la mayor cantidad de publicaciones científicas, seguido de Ciencias Sociales y Tecnología y Ciencias Físicas. Los temas que más se han estudiado son los referentes a plagas y enfermedades (identificación y control biológico), así como cuestiones de los usos de suelo, cambio de usos y cubiertas de suelo en la región productora de aguacate en el estado. Los temas relacionados al área de Tecnología y Ciencias Físicas son las menos desarrolladas.

En lo referente al estudio del suelo y sus procesos biogeoquímicos, únicamente tres publicaciones abarcan este tema, aunque sea un tema que debería estar entre los más estudiados por la importancia que este representa para la producción de cualquier tipo de cultivo. Así mismo, en el sector de la salud, aún hace falta incrementar los esfuerzos de investigación acerca de las prácticas de manejo del cultivo y las consecuencias que éstas puedan tener a la salud humana ya que para este tema no se encontró ningún registro en la búsqueda bibliográfica.

Finalmente, es importante reconocer el esfuerzo de la comunidad científica para estudiar los diferentes temas que engloba el cultivo de aguacate en Michoacán. No obstante,

aún quedan áreas de investigación que requieren mayor estudio, por lo que representan áreas de oportunidad para futuras investigaciones, ejemplo de esto es la agroecología, los temas relacionados a la sostenibilidad, las ciencias de la salud, la investigación relacionada a comprender los procesos biogeoquímicos del suelo y la gestión ambiental. Por otro lado, también se sugiere para posteriores trabajos incrementar los esfuerzos de búsqueda incluyendo otras bases de datos, integrar los documentos o reportes que también se realizan por parte de asociaciones dedicadas al estudio del cultivo de aguacate en Michoacán, así como incluir tesis, ya que en este tipo de trabajos probablemente se encuentre información valiosa que ayude a abordar y enriquecer en distintos temas relacionados al cultivo de aguacate. Además, se debe ampliar el área geográfica de búsqueda, es decir incluir las demás zonas productoras de aguacate a nivel nacional ya que esto podría arrojar información valiosa que no ha sido incluida en esta revisión.

CAPÍTULO 2. DINÁMICA DE N Y P EN SUELOS DE CULTIVO DE AGUACATE

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 RELACIÓN PLANTA-SUELO Y CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Las moléculas orgánicas que constituyen a los organismos vivos (ácidos nucleicos, carbohidratos, lípidos y proteínas) están compuestas esencialmente de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, fósforo y azufre (C, N, H, O, P y S); estos elementos conforman el 95% de la biosfera y su disponibilidad para los organismos depende de los ciclos biogeoquímicos (Bormann & Likens, 1967; Schlesinger & Bernhardt, 2013).

La circulación de una sustancia química en el ambiente es conocida como ciclo biogeoquímico (Mackenzie *et al.*, 1991), ya que los elementos se encuentran en constante movimiento, desde y hacia distintos reservorios, a través de flujos que son bidireccionales. Pero en ocasiones dichos elementos pueden almacenarse en depósitos o formas que pueden disminuir la disponibilidad de éstos a los organismos vivos (Galloway *et al.*, 2014).

El suelo tiene un papel crucial en los principales ciclos biogeoquímicos (C, N, P y S); igualmente, en él se desarrolla la producción primaria que es la cantidad de materia y energía sintetizadas por organismos autótrofos como las plantas, algas y bacterias fotosintéticas y quimiosintéticas. En un tiempo determinado, esta materia orgánica puede constituir un incremento en la biomasa vegetal o ser alimento para los consumidores; provee los nutrientes esenciales (macronutrientes) como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), así como los oligoelementos para el soporte de la producción de biomasa (Smith *et al.*, 2015). Sin embargo, elementos como el N y P son comúnmente nutrientes limitantes para el crecimiento de las plantas (Gallardo *et al.*, 2009).

El N, al no estar presente entre los minerales de la roca madre, ingresa al ecosistema a través de gases atmosféricos como el nitrógeno molecular (N₂), el cuál es fijado química y biológicamente por una variedad de bacterias que poseen nitrogenasas, enzimas que brindan la capacidad de romper el triple enlace del N₂, produciendo amonio (NH₄⁺), que puede ser

utilizado por las plantas (Gallardo *et al.*, 2009; Cerón-Rincón & Aristizábal-Gutiérrez, 2012). Otra entrada de N al suelo es a través de la materia orgánica (MO) de plantas, animales, hongos y bacterias muertos (Schlesinger & Bernhardt, 2013). Pero no es hasta que ocurre el proceso de descomposición y mineralización que vuelve a estar disponible para su uso por plantas y microorganismos (Celaya-Michel & Castellanos-Villegas, 2011).

La descomposición es la suma de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren a la materia orgánica del suelo, resultando en la reducción del tamaño de partícula y transformación de compuestos orgánicos a inorgánicos (Heal *et al.*, 1981; Robinson, 2002). Una gran parte del N contenido en la MO se encuentra en formas complejas como proteínas, ácidos nucleicos y quitina. Por tanto, los microorganismos deben secretar exoenzimas como las proteasas, ribonucleasas y quitinasas para la descomposición de los polímeros en pequeñas subunidades solubles, tal como los aminoácidos y nucleótidos. De esta manera el N es liberado como nitrógeno orgánico disuelto (NOD) a la solución del suelo (Chapin III *et al.*, 2012).

El NOD puede ser utilizado por hongos micorrícicos y por plantas para su crecimiento. De igual manera, los microorganismos descomponedores toman NOD dependiendo de la disponibilidad de C y N. Si no se presenta una limitación de C orgánico, los microorganismos heterótrofos pueden descomponer el NOD para mantener su crecimiento y satisfacer sus requerimientos energéticos secretando amonio (NH_4^+) al suelo, proceso conocido como mineralización o amonificación. Si existe deficiencia de C orgánico (energía), el NH_4^+ puede ser oxidado por organismos quimiótrofos y transformado en nitrito (NO_2^-) y posteriormente, por otro paso de oxidación, a nitrato (NO_3^-), esto es conocido como nitrificación (Chapin III *et al.*, 2012), proceso por el cual los microorganismos obtienen energía.

El ciclo del P no dispone de una fase gaseosa y su principal entrada al ecosistema es por medio del intemperismo de rocas ricas en fósforo como la apatita (Gallardo *et al.*, 2009). Es un elemento importante, ya que forma parte de los ácidos nucleicos, metabolitos intermediarios como fosfatos de azúcar y fosfatos de adenosina, que son parte integral del metabolismo de todo organismo. Sin embargo, es un elemento dinámico y biológicamente activo; distintas formas de P pueden ser química o enzimáticamente hidrolizadas a aniones

de ortofosfato (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) que son formas de P inorgánicas solubles y disponibles a corto plazo para que sean utilizadas por bacterias, algas y plantas (Hopkins, 2015).

En comparación con los demás macronutrientes, el P es el nutriente menos móvil y disponible. Es a menudo el principal factor limitante para el crecimiento de las plantas, debido a la reactividad de los iones de fosfato y las características del suelo que, en conjunto, pueden generar la retención (oclusión) de la mayor parte del P, dejando disponible una pequeña cantidad de P en la solución del suelo (Hinsinger, 2001).

El P también puede obtenerse a través del fósforo orgánico (Po) el cual constituye entre el 20-80% del fósforo total (PT) en el suelo y es derivado de los restos de microorganismos, plantas o animales, pero no es sino hasta que ocurre el proceso de mineralización que puede ser útil para las plantas (Oehl *et al.*, 2004; Fuentes *et al.*, 2006). La mineralización es la conversión de formas orgánicas de P a ortofosfatos (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) que son liberados a la solución del suelo. El Po es mineralizado por la acción de enzimas específicas: fosfomonoesterasas, fosfodiesterasas y fosfotriesterasas, que pueden ser de origen microbiano o vegetal (Picone & Zamuner, 2002; Tapia-Torres & García-Oliva, 2013).

La solubilización es otro proceso importante en el ciclo del fósforo que influye en la biodisponibilidad. Este proceso está mediado por microorganismos, principalmente por bacterias; el mecanismo por el cual los microorganismos solubilizan es por la disminución del pH, generalmente a valores cercanos a 2, valores necesarios para llevar a cabo la solubilización (Lara *et al.*, 2011). El ajuste de pH lo realizan a través de la liberación de ácidos orgánicos como el ácido glucónico, cítrico, láctico y acético, que actúan sobre los compuestos insolubles de fosfato inorgánico asociados con iones metálicos como el calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y aluminio (Al^{3+}) (Corrales Ramírez *et al.*, 2014; Fuentes *et al.*, 2006).

2.1.2 CAMBIO DE USO DE SUELO Y DINÁMICA DE N Y P

El cambio de uso de suelo (CUS) es un factor importante en el cambio global y está directamente relacionado con cuestiones como la seguridad alimentaria, calidad del agua y del suelo. El CUS y cambios en el manejo de ecosistemas con frecuencia ocurren juntos, generando cambios en la calidad del suelo, incluida la actividad de microorganismos del suelo y, en consecuencia, en la dinámica de nutrientes en el suelo (Kong *et al.*, 2006).

De acuerdo con la FAO (2002), la agricultura representa la mayor proporción de uso de suelo a nivel mundial. La agricultura tiene al menos tres componentes que impactan al suelo y a los procesos ecosistémicos: 1) alteración a la biomasa microbiana por la sustitución de vegetación natural por el establecimiento de monocultivos de plantas anuales y perennes; 2) las técnicas de labranza pueden modificar características físicas del suelo, y 3) el uso de fertilizantes incrementa la entrada de varios nutrientes tanto en forma orgánica como inorgánica (McLauchlan, 2006) modificando el ciclaje natural de los suelos.

Se ha reportado que el CUS modifica los ciclos biogeoquímicos del carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P) (Jaramillo *et al.*, 2003; Baeten *et al.*, 2011). El ciclo del N es de los ciclos más afectados por el CUS ya que es particularmente sensible a los cambios en las condiciones ambientales y las alteraciones a las propiedades biológicas, físicas y químicas (Campos, 2010). De acuerdo con Campos (2010), el CUS es un factor importante en la regulación de la mineralización del N en el suelo y su disponibilidad. No obstante, aún no hay consenso sobre los efectos del CUS en la mineralización del N ya que ciertos autores registran incrementos (Ross *et al.*, 1999), mientras que otros reportan decrementos (Gelaw *et al.*, 2014) y algunos no muestran ningún efecto por el CUS (Maroko *et al.*, 1998).

El ciclo del P es afectado por el CUS y el tipo de prácticas agrícolas. Dada la gran cantidad de fertilizantes fosfatados que se utiliza en la agricultura se ha generado una acumulación de P en muchas regiones. Sin embargo, una gran cantidad de éste es fijado por adsorción a las fases minerales y es convertido a compuestos inorgánicos complejos de baja disponibilidad. Como consecuencia, la aplicación de fertilizantes fosfatados se hace imprescindible para asegurar que una pequeña proporción de P permanezca disponible para las plantas y los microorganismos (Stutter *et al.*, 2015).

Bayuelo-Jiménez *et al.* (2019) en su estudio realizado en una comunidad Purépecha en el estado de Michoacán evaluaron, entre otros objetivos, los efectos de dos sistemas de uso de suelo (monocultivo de maíz y un bosque nativo) en las formas de P y su distribución en el suelo. Encontraron que el tipo de uso de suelo sí afectó a las formas y distribución de P en el suelo. En el suelo cultivado se incrementó la fracción de fósforo inorgánico; el suelo de bosque presentó mayor contenido de fósforo orgánico, mientras que en el suelo cultivado disminuyó significativamente la disponibilidad de este elemento. Así también, la fracción de

fósforo residual fue mayor en el suelo cultivado, esta fracción corresponde a la mayor parte del fósforo total en ese suelo.

Stutter *et al.* (2015) analizaron cómo la acumulación de P en el suelo varía en función del uso de suelo (sitios cultivados, pastizales intensivos y sitios de pastoreo extensivo y semi natural) y se encontró que suelos cultivados son dominados por ortofosfatos inorgánicos (Pi), así como especies del grupo monoéster de fosfato asociadas a la adsorción de aluminio y hierro (Al^{3+} y Fe^{3+}). En los pastizales intensivos dominaron los monoésteres de fosfato. En cambio, las especies lábiles de diésteres de fosfato dominaron a medida que los sitios de pastoreo se volvían más extensivos.

Es evidente que existe poca información relacionada con el entendimiento de la dinámica del N y P en los suelos de uso agrícola para cultivo de aguacate. Por lo tanto, es necesario que se desarrollen trabajos que permitan un entendimiento conjunto de cómo el manejo agrícola en la región productora de aguacate en Michoacán afecta la dinámica de los ciclos biogeoquímicos de C, N y P.

2.1.3 OCLUSIÓN DE FÓSFORO

El P es un elemento reactivo que puede ser atraído electrostáticamente a los minerales del suelo con carga positiva a través del intercambio aniónico, formando uno o dos enlaces covalentes. Puede unirse también con minerales solubles, generando precipitados insolubles como el hierro (Fe^{3+}), aluminio (Al^{3+}) y calcio (Ca^{2+}) (Chapin III *et al.*, 2012). Una vez que el P es precipitado y estabilizado, deja de estar disponible para plantas y microorganismos, ya que se forman compuestos resistentes a corto y mediano plazo a los procesos físicos y químicos del suelo (Buckingham *et al.*, 2010).

Walker & Syers (1976) proponen un modelo sobre la distribución de las fracciones de P en suelo durante el desarrollo de los ecosistemas. En él proponen que en suelos jóvenes son más abundantes las fracciones de P unidas a calcio (apatita), seguido del P no ocluido y P orgánico, mientras que el P ocluido corresponde a la fracción más pequeña. En los estadios finales de desarrollo (suelos intemperizados) ocurre lo contrario, la fracción de P ocluido incrementa, siendo ésta junto a la fracción del P orgánico, las fracciones dominantes en ambientes desarrollados.

El fósforo ocluido es reconocido como la forma más recalcitrante (Zhang *et al.*, 2016). Entre los principales factores que intervienen en el proceso de oclusión de P está el pH. De acuerdo con Hopkins (2015) la biodisponibilidad del P está ligada al pH ya que en suelos fuertemente ácidos se favorece en mayor medida la formación de minerales de fosfato de hierro y aluminio dando como resultado solubilidad reducida del P. Sin embargo, a medida que el pH incrementa, la solubilidad del P aumenta hasta llegar a la máxima solubilidad y disponibilidad de P para la planta que se da a un pH de 6.5. En cambio, cuando el pH se vuelve alcalino, llegando a un pH cercano a 8, provoca una reducida disponibilidad y baja solubilidad del P por la formación de minerales de fosfato de calcio.

Los suelos de tipo andosol, por su distribución en la frontera agrícola en México y por su pH ácido, nos permite analizar el proceso de oclusión y disponibilidad de N y P. Este tipo de suelos son provenientes de eyecciones o vidrios volcánicos, aunque también pueden desarrollarse en otros materiales ricos en silicatos bajo intemperización ácida en climas húmedos y peri húmedos (FAO, 2008). Son suelos típicamente negros y tienen un alto potencial para la producción agrícola. Sin embargo, tienen una fuerte oclusión de fosfatos derivada por los Al^{3+} y Fe^{3+} libres. Por lo anterior, como medida para aumentar la disponibilidad de ortofosfatos, se incluye la adición de compuestos cálcicos, sílice, materia orgánica y la aplicación de fertilizantes fosfatados (FAO, 2008). En México, a lo largo del Eje Neovolcánico se localizan vastas regiones con depósitos de cenizas volcánicas, una de estas regiones es la Meseta Purépecha donde se han identificado suelos de tipo andosol (Alcalá de Jesús *et al.*, 2001).

Debido a la alta reactividad del P, una gran proporción del P utilizado como fertilizante se ocluye en los primeros 20 cm de profundidad del suelo. Este almacén de P ocluido en suelos agrícolas ha generado a lo largo de la franja agrícola un incremento de P que actualmente es considerado como el legado del P (McCrackin *et al.*, 2018). Ante la inminente crisis global de P por el acceso desigual a este recurso, este legado puede ser nuestra alternativa para asegurar el acceso a este recurso, mantener la producción agrícola y transitar hacia una agricultura sostenible (Noë *et al.*, 2020). Sin embargo, es necesario que se hagan estudios para poder conocer la capacidad de oclusión de P en los suelos de uso agrícola y la velocidad de solubilización para incrementar la biodisponibilidad del elemento.

Por lo anterior, es evidente que el CUS modifica la dinámica natural de los ciclos biogeoquímicos del C, N y P y con el tiempo esta modificación puede degradar irreversiblemente los procesos edáficos. Sin embargo, se requieren estudios que integren el efecto que tiene el CUS de bosques a huertos de aguacate sobre la dinámica del N y P debido a que son dos de los elementos más fuertemente afectados por las grandes entradas de fertilización en los sistemas agrícolas.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué efecto tiene el cambio de uso de suelo, de uso forestal a agrícola, así como el tipo de manejo agrícola (semi convencional u orgánico) en la disponibilidad de N y P en huertos de aguacate con suelos de tipo andosol?

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del cambio de uso de suelo y el tipo de manejo agrícola sobre la disponibilidad de N y P en huertos de aguacate con suelo de tipo andosol.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar el efecto del cambio de uso de suelo y el tipo de manejo agrícola sobre la dinámica de N
- Evaluar el efecto del cambio de uso de suelo y el tipo de manejo agrícola sobre la dinámica de P
- Evaluar el efecto del cambio de uso de suelo sobre el proceso de oclusión de P
- Identificar los procesos que intervienen en la disponibilidad de P en un suelo tipo andosol asociado al cultivo de aguacate

2.2 MÉTODOS

2.2.1 SITIOS DE ESTUDIO

El estudio se realizó en dos sitios: la “Huerta Huitzicho” localizada en el municipio de Uruapan y la “Huerta Cedritos 2” ubicada en el municipio de Acuitzio, ambos municipios pertenecientes al estado de Michoacán (Figura 2.1). La elección de dichos sitios de estudios fue realizada previamente al inicio del presente trabajo por los investigadores responsables del proyecto.

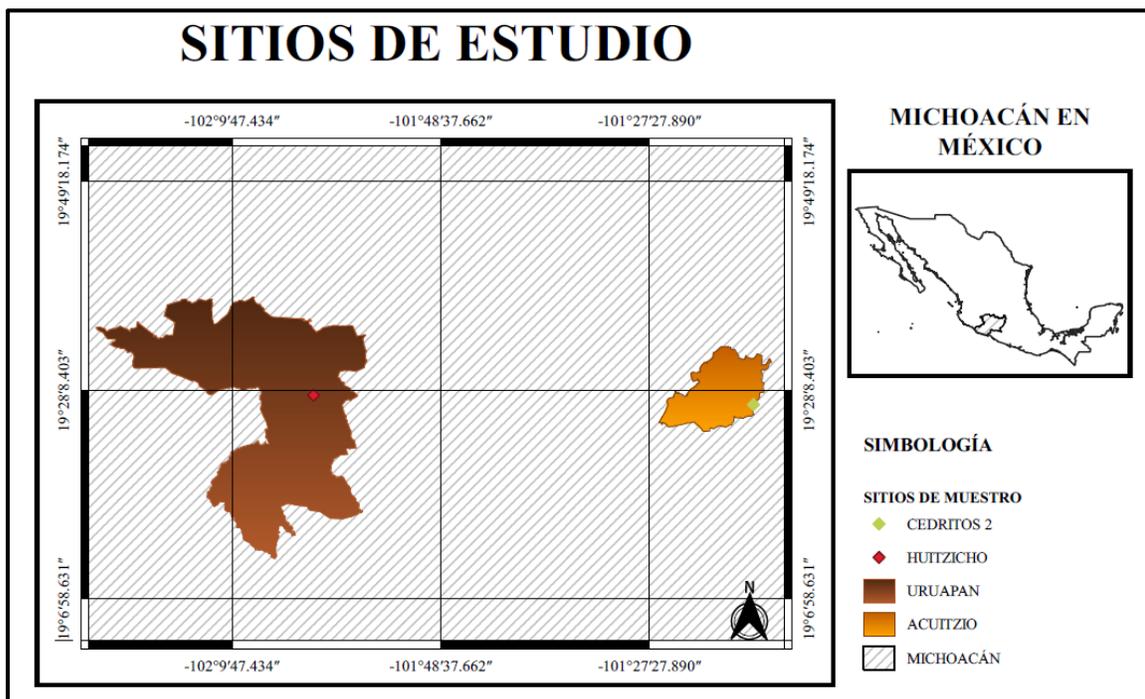


Figura 2.1 Mapa de los sitios de estudio: Huerta Huitzicho, Uruapan y Huerta Cedritos 2, Acuitzio, ambos ubicados en el estado de Michoacán de Ocampo.

Huitzicho, se ubica en las coordenadas $19^{\circ}27'38.6''$ latitud Norte y $102^{\circ}01'32.24''$ Oeste y Cedritos 2 en las coordenadas $19^{\circ}26'41.3''$ Norte y $101^{\circ}16'55''$ Oeste (Tabla 2.1). De acuerdo con la CNA (1998), Huitzicho pertenece a la cuenca Río Tepalcatepec-Infiernillo y Cedritos 2 a la cuenca del Río Tacámbaro. En Huitzicho, el rango de precipitación media anual varía de 1500 a 2000 mm, mientras que en Cedritos 2 oscila entre los 800 a 1200 mm (Vidal-Zepeda, 1990). El clima en Huitzicho es semicálido húmedo con lluvias en verano, la temperatura oscila de 18°C en el mes más frío a más de 22°C en el mes más cálido. En Cedritos 2, el clima es templado subhúmedo con una temperatura media anual entre $12\text{-}18^{\circ}\text{C}$

(García & CONABIO, 2001). El tipo de suelo que predomina en ambos sitios es andosol úmbrico (SEMARNAP, 1998).

A continuación, se describen algunas características sobre el tipo de prácticas agrícolas que se realizan en cada uno de los sitios. Es importante mencionar que no se realizó una entrevista formal a los productores, la información presentada corresponde a datos obtenidos de conversaciones durante el muestreo.

La huerta Huitzicho tiene al menos 50 años, se caracterizó como una huerta con manejo semi convencional por el uso de insumos sintéticos y orgánicos para los procesos de fertilización y el control de plagas y enfermedades. La fertilización del cultivo se realiza con productos sintéticos, materia orgánica, guano y estiércol. El manejo de plagas y enfermedades para la etapa de prevención se hace con productos orgánicos y en caso de no ser suficiente se emplean los insecticidas y plaguicidas sintéticos (C. S. Bravo, comunicación personal, 7 de mayo de 2019).

La huerta Cedritos 2, se caracterizó como huerta orgánica, ya que en los últimos 30 años no se ha utilizado ningún producto sintético. Actualmente, utilizan estiércol como fuente de N, roca fosfórica como fuente de P, magnesio y manganeso en sales. En cuanto al control fitosanitario se emplean fungicidas como el cobre y algunos productos derivados de plantas como el aceite de higuera para el control de plagas.

Para la elección de ambos sitios se consideraron 2 factores: 1) que hayan tenido un proceso de cambio de uso de suelo de bosque a cultivo de aguacate). En este sentido, dichos sitios debían estar cercanos a un fragmento aledaño de bosque conservado y 2) que el manejo agrícola fuese distinto entre ellos (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Sitios de estudio. Se muestran las coordenadas geográficas de cada sitio, municipio, tipo de suelo y tipo de práctica agrícola.

Sitio de muestreo	Coordenadas WGS 84	Municipio	Tipo de suelo	Práctica agrícola
Huerta “Huitzicho”	19°27’38.6”N 102°01’32.24”O	Uruapan del Progreso	Andosol úmbrico	Semi convencional
Huerta “Cedritos 2”	19°26’41.3”N 101°16’55.08”O	Acuitzio Del Canje	Andosol úmbrico	Orgánico

2.2.2 DISEÑO DE MUESTREO

El muestreo de los sitios se realizó en distintas temporadas, el primer muestreo fue en Huitzicho (mayo 2019) durante la temporada seca; el muestro en Cedritos 2 (septiembre de 2019) se realizó en la temporada de lluvias. En cada sitio de estudio se replicó el siguiente muestreo basado en trabajos previos (Hernández Becerra, 2014; González-Hernández, 2020):

Se delimitó un rectángulo de 50 x 100 metros en cada huerta y fragmento de bosque. El rectángulo se dividió en 5 transectos de 50x20 metros, para cada uno se eligió un número al azar entre 0-20, una vez seleccionado, en ese punto se trazó una línea de 50 metros de longitud; sobre esa línea se tomó una muestra de suelo cada 10 metros; las muestras de suelo se obtuvieron a los primeros 15 cm de profundidad del suelo, por medio de un nucleador con tubo recolector de 20 cm de profundidad y 8 cm de diámetro. De cada transecto se obtuvieron 5 muestras (Figura 2.2).

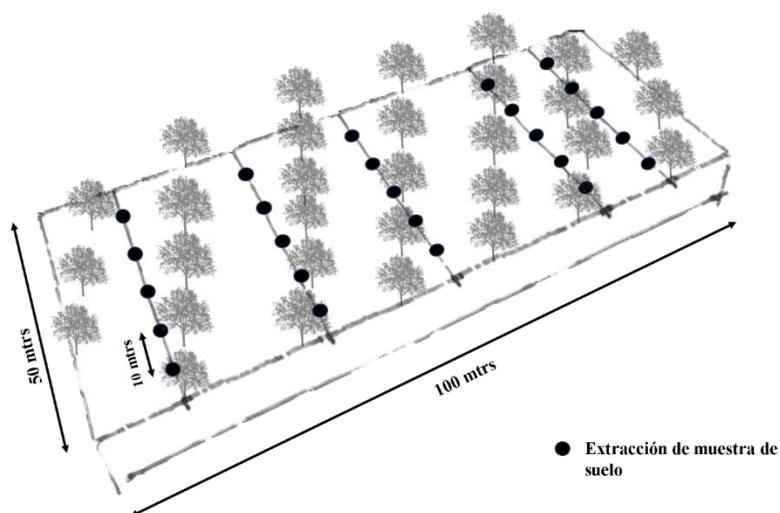


Figura 2.2 Diseño de muestreo para la caracterización del sitio de estudio. El diseño se replicó en cada sitio de estudio.

Posteriormente, las 5 muestras de cada transecto se mezclaron, obteniendo 1 muestra compuesta de aproximadamente 2 kg de suelo por transecto. Finalmente, se obtuvieron 5 muestras compuestas por parcela de bosque y por parcela de huerta de cada sitio. Estas muestras compuestas se tamizaron, se guardaron en bolsas negras y se almacenaron a 4°C hasta el momento de realizar los análisis fisicoquímicos y biogeoquímicos y el experimento de oclusión. Los análisis fisicoquímicos y biogeoquímicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Biogeoquímica de Suelos del Instituto de Investigaciones en Ecología y Sustentabilidad (IIES).

2.2.3 ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS Y BIOGEOQUÍMICOS

2.3.1.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS

HUMEDAD Y PH

La humedad se determinó por medio de un análisis gravimétrico: se pesó una alícuota de suelo fresco, se secó en una estufa eléctrica de cultivo (E-51, BG PRONALAB) a 100°C durante 48 horas y, finalmente se registró el peso seco. El porcentaje de humedad se calculó con la siguiente ecuación:

Ecuación 1:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso suelo húmedo} - \text{Peso suelo seco}}{\text{Peso suelo húmedo}} \times 100$$

Para el pH, se utilizó una solución 1:2 p/v de suelo en agua desionizada y se leyó a través de un potenciómetro digital (HORIBA, LAQUA PH 1100) previamente calibrado.

2.3.1.2 ANÁLISIS DE NUTRIENTES

Se determinaron las formas totales, disueltas, disponibles y microbianas de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), como se explica a continuación.

NUTRIENTES TOTALES

La determinación de nutrientes totales se realizó con las alícuotas de suelo utilizadas para la estimación de la humedad; éstas fueron molidas en un mortero de ágata de 88 mm de diámetro.

La concentración de carbono total (CT) se determinó por combustión y el método de Coulometría; se cuantificó utilizando el Analizador de Carbono Total (UIC Modelo

CM5012; Chicago, E.U.A). Para el análisis de N y P totales (NT y PT) se realizó una digestión ácida con ácido sulfúrico (H_2SO_4), peróxido de hidrógeno al 30% (H_2O_2) y, una mezcla digestora de sulfato de potasio (K_2SO_4) y sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4$). Las muestras se mantuvieron a $375^\circ C$ durante 4 horas. Después, se aforaron a 250 ml con agua desionizada y se filtró en papel Whatman N°1.

La cuantificación de NT se determinó por el método de Semi-Kjendahl y se leyó por colorimetría a 660 nm en el Autoanalizador Bran Luebe III (Norderstedt, Alemania). El PT se determinó por el método colorimétrico de molibdato después de una digestión ácida y posterior por reducción del ácido ascórbico, de molibdato y reducción de ácido ascórbico (Murphy & Riley, 1962) y se leyó a 660 nm en el Autoanalizador Bran Luebe III (Norderstedt, Alemania).

NUTRIENTES DISUELTOS

Para su determinación se realizó la lectura de las formas de C, N y P totales disueltas (CTD, NTD, PTD) y las formas inorgánicas: N inorgánico disuelto (NID) leído como amonio (NH_4^+ disuelto) y P inorgánico disuelto (PID) leído como ortofosfato disuelto (PO_4^{-3} disuelto).

Para obtener las formas inorgánicas (NID y PID) y el CTD se pesó una alícuota de 20 g de suelo fresco, se agregó 80 ml de agua desionizada y se agitaron durante 30 min. Después, las muestras se filtraron a través de papel Whatman N° 42 y posteriormente por membranas Millipore de 45 μm . El CTD se leyó en un analizador de C total (UIC CM5012; Chicago, E.U.A) en el módulo para líquidos (IUC-COULOMETRICS), mientras que el NID y PID se leyeron en el autoanalizador Bran-Luebbe III (Norderstedt, Alemania).

Para las formas de NTD y PTD: se realizó una digestión con H_2SO_4 concentrado y H_2O_2 : se tomó una alícuota de 25 ml del extracto previamente filtrado por Millipore de 45 μm ; se agregó 1 ml de H_2SO_4 concentrado y las muestras se mantuvieron a una temperatura de $275^\circ C$ durante 2 horas. Posteriormente, las muestras se neutralizaron con hidróxido de sodio (NaOH) al 20% y H_2SO_4 5N, se usó fenolftaleína al 0.5% como indicador. Una vez realizado este procedimiento, las muestras se aforaron a 50 ml con agua desionizada.

Seguido, las muestras se filtraron en papel Whatman N° 42 para la determinación de NTD leído como NH_4^+ disuelto y el PTD leído como PO_4^{3-} disuelto.

Finalmente, las formas orgánicas disueltas de C, N y P (COD, NOD y POD) se obtuvieron de la diferencia de las formas totales (CTD, NTD y PTD) menos las formas inorgánicas (NID y PID) (ecuación 2), con excepción del C, para este se consideró el valor de CTD como COD.

Ecuación 2:

Nutriente Orgánico Disuelto=(Nutriente Total Disuelto-Nutriente Inorgánico Disuelto)

NUTRIENTES DISPONIBLES

Se determinaron las formas inorgánicas disponibles de N (NH_4^+ disponible y NO_3^- disponible) y P (PO_4^{3-} disponible) en el suelo.

Determinación de N disponible

Se pesaron 10 g de suelo fresco de cada muestra, se añadieron 50 ml de cloruro de potasio (KCl) 2 N y se agitaron por 30 min a 350 rpm. Después, se filtraron en filtros Whatman N° 1. La cuantificación de las formas inorgánicas de N se realizó por medio del método colorimétrico de hipoclorito-fenol en el autoanalizador Bran-Lubbe III (Norderstedt, Alemania).

Determinación de P disponible

Se pesaron 2.5 g de suelo fresco de cada muestra, se añadió 80 ml de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) ajustado a pH 8.5, se agitaron durante 16 hrs y se centrifugaron durante 25 min a 6000 rpm (Centrífuga Thermo Scientific, SL 16). Posteriormente, el sobrenadante se filtró en papel Whatman N° 42 y se tomó una alícuota de 5 ml, se agregó una gota de fenolftaleína y se añadieron gotas de NaOH a diferentes concentraciones (0.5, 1 y 5 M) hasta que el color viró a rosa. Posteriormente, se neutralizaron agregando HCl 1 M y se aforaron a 25 ml con agua desionizada. Finalmente, las muestras se leyeron en el autoanalizador Bran-Luebbe III (Norderstedt, Alemania).

NUTRIENTES EN BIOMASA MICROBIANA

Se determinaron los nutrientes en biomasa microbiana del C, N y P (CMIC, NMIC y PMIC) mediante el método de extracción por fumigación con cloroformo de Vance *et al.*, 1987).

Determinación de Carbono y Nitrógeno en Biomasa Microbiana

Se pesaron por duplicado 20 g de suelo fresco de cada muestra para obtener dos lotes, uno no fumigado y otro fumigado. Las muestras de cada lote se humedecieron a capacidad de campo y se colocaron en 2 desecadores distintos: al desecador con el lote no fumigado sólo se le colocó una caja Petri con agua y un filtro encima de ésta para mantener la humedad, mientras que al desecador con el lote a fumigar se le colocó la caja Petri con agua y el filtro y, un vaso de precipitado con 80 ml de cloroformo (CHCl_3). Posteriormente, al lote a fumigar se le aplicó vacío durante 40 min, se selló con Parafilm y ambos desecadores se incubaron por 24 hrs a 27°C.

Seguido de la incubación, se realizó una extracción agregando 80 ml de K_2SO_4 0.5 M a ambos lotes de muestras y se agitaron durante 30 min a velocidad baja. Después, se filtraron aproximadamente 10 ml de cada muestra en papel Whatman N° 42 para la determinación del carbono contenido en la biomasa microbiana (CMIC); el resto se filtró en papel Whatman N° 1 para la determinación de nitrógeno contenido en la biomasa microbiana (NMIC). La cuantificación del CMIC se realizó en el Autoanalizador de Carbono Total.

Para la obtención de NMIC se realizó una digestión para la cual se tomaron 30 ml del extracto previamente filtrado, se agregó 0.6 ml de CuSO_4 0.19 M y 10 ml de H_2SO_4 concentrado; la digestión se realizó a 300°C durante 2 hrs, al término de este tiempo se dejaron enfriar las muestras y se aforaron en matraces de 50 ml. Finalmente, las muestras se filtraron en papel Whatman N° 1 y los extractos se utilizaron para la cuantificación de NMIC en el autoanalizador Bran-Luebbe III (Norderstedt, Alemania).

Determinación de Fósforo en Biomasa Microbiana

La determinación de PMIC se realizó con base en el procedimiento de fraccionamiento secuencial de P (Hedley *et al.*, 1982). Sin embargo, el fraccionamiento se realizó por duplicado hasta la fracción de NaHCO_3 . Se pesaron por duplicado 2.5 g de suelo

fresco de cada muestra para obtener dos lotes, uno no fumigado y otro fumigado siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de la determinación de C y N en biomasa microbiana.

Después de la incubación se agregó a cada muestra 30 ml de NaHCO_3 0.5 M a pH 8.5 y se agitaron 16 hrs a 150 rpm; transcurrido este tiempo, las muestras se centrifugaron (centrífuga Thermo Scientific SL 16) por 25 min a 6000 rpm. El sobrenadante se filtró en papel Whatman N°42. Para realizar la digestión, del filtrado se tomó una alícuota de 5 ml, se agregó 1.11 ml de H_2SO_4 11 N y 0.7 ml de persulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) al 50%. Finalmente, se introdujeron a una autoclave a 121°C durante 1 hr.

Una vez digeridas las muestras se neutralizaron: a cada muestra se le agregó una gota de P-nitrofenol y, utilizando NaOH 0.5 M, 1 M y 5 M y un potenciómetro (Thermo Scientific, Orion 3star Plus) se ajustó el pH entre 6.5 y 7, en caso de que el pH fuera mayor se utilizó HCl 1 M para reducirlo. Por último, las muestras neutralizadas se aforaron a 25 ml con agua desionizada y se cuantificó en autoanalizador Bran-Luebbe III (Norderstedt, Alemania).

La obtención de las concentraciones finales de C, N y P microbianos se calculó con la siguiente ecuación:

Ecuación 3:

$$\text{Nutriente Microbiano} = \frac{\text{fumigado} - \text{no fumigado}}{\text{Coeficiente de extracción}}$$

2.2.4 EXPERIMENTO DE OCLUSIÓN DE P

El experimento de oclusión de fósforo se realizó con las muestras de suelo provenientes del muestreo descrito previamente en la sección 2.2.2. El experimento de oclusión de fósforo se realizó en el Laboratorio de Microbiómica de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia (ENES Unidad Morelia).

Se realizó un experimento sobre la capacidad de oclusión de P del suelo, con base en el procedimiento del *Protocolo para la obtención del P fijado en la parte no biológica del suelo* de Perroni *et al.* (2014) adaptado con base en la metodología de Lajtha *et al.* (1999). La base de la metodología consiste en fertilizar al suelo con diferentes concentraciones conocidas de una solución de fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4) a la cual se debe

agregar unas gotas de cloroformo (CHCl_3) para evitar el crecimiento de algún microorganismo en la solución. Posteriormente, a partir de la solución de KH_2PO_4 se preparan las soluciones de trabajo con las cantidades a fertilizar y se aforan con una solución de KCl 0.01 M que evita la precipitación del P. Las muestras de suelo fertilizadas con la solución de trabajo se agitan durante 24 hrs, se centrifugan y se filtran. Posteriormente, las muestras se prepararon para su lectura y para esto se tomó una alícuota del filtrado y se agregó una solución para desarrollo de color (ácido ascórbico y molibdato de amonio). Así también, se debe obtener el P disponible real, es decir el ortofosfato contenido en el suelo sin fertilizar, realizando el mismo procedimiento a diferencia que estas muestras no son fertilizadas y únicamente son aforadas con KCl 0.01 M.

En el protocolo se sugiere trabajar con concentraciones de P de 0-200 $\mu\text{g P}^*\text{ml}$, pero estas cantidades se modificaron con base en la concentración de P disponible obtenido en los análisis biogeoquímicos previamente realizados a los suelos de los sitios de estudio. Las concentraciones utilizadas fueron 70, 210 y 630 $\mu\text{g P/ml}$ para el bosque y huerta de Uruapan y 20, 60 y 180 $\mu\text{g P/ml}$ para el bosque y huerta de Acuitzio (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Tratamiento de fertilización con fósforo a los cuales fueron sometidas las muestras de suelo de los sitios de estudio. BH: Bosque Huitzicho; HH: Huerta Huitzicho; BC: Bosque Cedritos 2; HC: Huerta Cedritos 2

Sitio	Lote	Tratamiento 1 ($\mu\text{g P}^*\text{ml}$)	Tratamiento 2 ($\mu\text{g P}^*\text{ml}$)	Tratamiento 3 ($\mu\text{g P}^*\text{ml}$)
Huitzicho	BH	70	210	630
	HH			
Cedritos	BC	20	60	180
	HC			

Cada tratamiento tuvo un total de 20 réplicas conformadas por 10 réplicas provenientes de muestras de suelo del sitio Huitzicho (bosque y huerta) y 10 réplicas provenientes de muestras de suelo del sitio Cedritos 2 (bosque y huerta) (Tabla 2.3). El volumen de suelo utilizado en cada replica corresponde a 3 gr de suelo fresco de la muestra correspondiente.

Tabla 2.3 Diseño experimental para el experimento de oclusión de fósforo. BH: Bosque Huitzicho; HH: Huerta Huitzicho; BC: Bosque Cedritos 2; HC: Huerta Cedritos 2

	FERTILIZACIÓN ($\mu\text{g P*ml}$)	BH	HH	BC	HC
Tratamiento 1 ($\mu\text{g P*ml}$)	70 20	5	5	5	5
Tratamiento 2 ($\mu\text{g P*ml}$)	210 60	5	5	5	5
Tratamiento 3 ($\mu\text{g P*ml}$)	630 180	5	5	5	5

Para la extracción del fósforo disponible del suelo, se preparó una solución Stock A (1000 $\mu\text{g P/ml}$) de fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4) y se agregaron 2 gotas de cloroformo (CHCl_3) para evitar el crecimiento de algún organismo en la solución y se aforó con cloruro de potasio (KCL) 0.01 M. A partir de la solución Stock A se prepararon las soluciones de trabajo con las concentraciones de cada tratamiento (Tabla 2). Para la extracción del fósforo disponible real, es decir el P disponible del suelo sin fertilizar, únicamente se utilizó la solución de KCl 0.01 M.

Posteriormente, se pesaron 3 g de suelo, a las muestras a fertilizar se les agregó 30 ml de la solución de trabajo correspondiente y a las muestras para la obtención del P disponible real se agregó 30 ml de KCl 0.01 M. Posteriormente, se añadió una gota de cloroformo y se agitaron durante 24 hrs. Después, las muestras se centrifugaron (centrífuga Thermo Scientific Heraeus Megafure 16R) a 3500 rpm durante 20 min y se filtraron en papel Whatman N°42.

La lectura de las muestras fertilizadas y de las muestras para la determinación del P disponible se realizó siguiendo el procedimiento del protocolo para la determinación de P microbiano por colorimetría utilizando el sistema reductor con ácido ascórbico y antimonio como catalizador de (Tapia-Torres & Montiel, 2015). Del filtrado previamente obtenido se tomó una alícuota de 2.5 ml, se añadió 2.5 ml de solución de desarrollo de color (ácido ascórbico y molibdato de amonio) y se aforaron a 25 ml con agua desionizada. Se dejaron reposar durante 15 min. Finalmente, las muestras se leyeron a una $\lambda=882$ nm en un espectrofotómetro (Thermo Scientific GENESYS 10S UV-VIS).

La fracción de P ocluido se obtuvo con la siguiente ecuación obtenida de Perroni *et al.* (2014):

Ecuación 4:

Oclusión= F - (C - S)

F= Fertilización con P * $\frac{30 \text{ ml}}{3 \text{ g de suelo} * \text{fracción de suelo seco}}$

C= Fósforo disponible

S= Fósforo disponible sin fertilizar

2.2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.2.5.1 ANÁLISIS DE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS Y BIOGEOQUÍMICAS

Se utilizó el programa estadístico IBM SPSS Statistics Versión 25 para realizar una prueba de T Student para muestras independientes y determinar la significancia de las diferencias en las variables biogeoquímicas entre bosque y huerta dentro de cada sitio y entre tipo de manejo, entre huertos de cada sitio (semi convencional y orgánico). Por medio del programa R Studio (R Core Team, 2020) se realizó un análisis de correlación de Pearson para identificar relaciones entre variables de los sitios de estudio.

2.2.5.2 ANÁLISIS DE EXPERIMENTO DE OCLUSIÓN DE P

Se utilizó el programa R Studio (R Core Team, 2020) para realizar los análisis estadísticos. Se empleó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para los datos obtenidos del experimento de oclusión; como factores se utilizaron: el uso de suelo con dos niveles (bosque y huerta) y las fertilizaciones con KH_2PO_4 con tres niveles para cada sitio, es decir, 70, 210 y 630 $\mu\text{Gp} * \text{ml}$ para Huitzicho y 20, 60 y 180 $\mu\text{Gp} * \text{ml}$ para Cedritos 2.

2.3 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los análisis de las variables fisicoquímicas, biogeoquímicas y del experimento de oclusión en los sitios Huitzicho y Cedritos 2, donde se evaluó el efecto del CUS y el tipo de manejo orgánico en la dinámica de nutrientes y el proceso de oclusión para el muestreo realizado en 2019.

2.3.1 ANÁLISIS DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y BIOGEOQUÍMICAS

En la Tabla 2.4 se muestran los promedios de las variables físicas y químicas (porcentaje de humedad y pH) analizadas en el suelo del bosque y huerta de Huitzicho y Cedritos 2. Tanto en Huitzicho como en Cedritos 2, ambos sitios presentaron diferencias significativas en estas variables: en Huitzicho, el suelo en la huerta presentó valores más altos en el pH que en el bosque (6.9 y 6.3 respectivamente; $p < 0.023$); al igual que en la humedad (13.18% y 11.5% respectivamente; $p < 0.027$). En Cedritos 2, el pH del bosque fue más alto que en la huerta (6.7 y 6.2 respectivamente; $p < 0.033$). El porcentaje de humedad fue más alto en bosque (36.31%) que en la huerta (31.27%; $p < 0.044$).

En la Tabla 2.4 se muestran los promedios de las variables biogeoquímicas analizadas en el suelo de Huitzicho y Cedritos 2. En los nutrientes totales, en Huitzicho la única diferencia significativa fue el PT ($p < 0.002$) con una mayor concentración en la huerta ($0.489 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) respecto al bosque ($0.170 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). En Cedritos 2 no se determinaron las formas totales de los nutrientes.

En los nutrientes orgánicos disueltos, en Huitzicho no se obtuvieron diferencias significativas en ninguno de los nutrientes evaluados (COD, NOD y POD). En Cedritos 2 el NOD presentó diferencias significativas ($p < 0.017$) siendo la concentración más alta en el suelo del bosque ($1.25 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) respecto al suelo de la huerta ($0.802 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$).

En Huitzicho, todas las formas disponibles de los nutrientes presentaron diferencias significativas; el NH_4^+ disponible ($p < 0.00$) tuvo mayor concentración en el bosque ($2.98 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) respecto a la huerta ($1.01 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). En cambio, el NO_3^- disponible ($p < 0.007$) y el PO_4^{3-} disponible ($p < 0.019$) presentaron mayor concentración en el suelo de la huerta (3.24 y $56.1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente) que en el bosque (0 y $4.84 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). En Cedritos 2 el NH_4^+ disponible presentó diferencia significativa ($p < 0.007$) entre la concentración del bosque (5.74

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y de la huerta ya que de esta última su concentración fue tan baja que no detectada por el equipo. El PO_4^{3-} disponible también presentó diferencia significativa ($p<0.007$) siendo la concentración mayor la del suelo de la huerta ($18.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) respecto al suelo del bosque ($0.171 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).

De los nutrientes en biomasa microbiana únicamente se observaron diferencias significativas en el PMIC ($p<0$) en el sitio Huitzicho. En donde la concentración más alta fue en la huerta ($15.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) respecto al bosque ($4.11 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). En Cedritos 2, el CMIC y NMIC mostraron diferencias significativas ($p<0.006$ y $p<0.001$), ambas concentraciones fueron mayores en el bosque (295 y $78 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente) que en la huerta (155 y $36.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente).

Tabla 2.4 Variables biogeoquímicas con media y error estándar (del promedio) y, significancia de las diferencias entre las variables biogeoquímicas de cada parcela de muestreo en los sitios de estudio. **CT:** Carbono Total; **NT:** Nitrógeno Total; **PT:** Fósforo Total; **COD:** Carbono Orgánico Disuelto; **NOD:** Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD:** Fósforo Orgánico Disuelto; **NH₄⁺Disp:** Amonio Disponible; **NO₃⁻Disp:** Nitrato Disponibles; **PO₄³⁻Disp:** Ortofosfato Disponible; **CMIC:** Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC:** Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC:** Fósforo en Biomasa Microbiana.

	Huitzicho			Cedritos 2		
	Bosque	Huerta	P	Bosque	Huerta	P
<i>pH</i>	6.3 ^B (0.139)	6.9 ^A (0.129)	0.023	6.7 ^A (0.131)	6.2 ^B (0.159)	0.033
% <i>Humedad</i>	11.5 ^B (0.274)	13.18 ^A (0.555)	0.027	36.31 ^A (1.37)	31.27 ^B (1.60)	0.044
TOTALES (mg*g⁻¹)						
<i>CT</i>	51.3 (±3.73)	47.9 (±3.46)	0.526			
<i>NT</i>	1.25 (±0.097)	1.51 (±0.099)	0.094			
<i>PT</i>	0.170 ^B (±0.009)	0.489 ^A (±0.049)	0.002			
DISUELTOS (µg*g⁻¹)						
<i>COD</i>	51.2 (±10.8)	36.1 (±7.53)	0.285	39 (±6.35)	24.5 (±3.01)	0.074
<i>NOD</i>	3.29 (±0.520)	2.95 (±0.429)	0.619	1.25 ^A (±0.110)	0.802 ^B (±0.100)	0.017
<i>POD</i>	1.87 (±0.052)	2.17 (±0.450)	0.531	4.49 (±0.158)	4.83 (±0.220)	0.251
DISPONIBLES (µg*g⁻¹)						
<i>NH₄⁺Disp</i>	2.98 ^A (±0.204)	1.01 ^B (±0.202)	0	5.74 ^A (±0.766)	0 ^B	0.002
<i>NO₃⁻Disp</i>	0 ^B	3.24 ^A (±0.384)	0.007	0.015(± 0.015)	2.20 (±0.908)	0.149
<i>PO₄³⁻Disp</i>	4.84 ^B	56.1 ^A (±14.6)	0.019	0.171 ^B (±0.171)	18.2 ^A (±8.68)	0.007
MICROBIANOS (µg*g⁻¹)						
<i>CMIC</i>	174 (±54.3)	191 (±48.5)	0.818	295 ^A (±30.2)	155 ^B (±23.2)	0.006
<i>NMIC</i>	21.2 (±2.59)	32.3 (±5.65)	0.128	78 ^A (±4.91)	36.1 ^B (±7.19)	0.001
<i>PMIC</i>	4.11 ^B (±1.11)	15.6 ^A (±1.32)	0	16.9 (±3.36)	17.1 (±2.95)	0.955

En la Tabla 2.5 se comparan los promedios de las variables fisicoquímicas bajo un manejo agrícola distinto: semi convencional (huerta Huitzicho) y orgánico (huerta Cedritos 2). El pH mostró diferencia significativa ($p < 0.014$) ya que el pH del sitio semi convencional fue menos ácido (pH 6.9) que el del sitio orgánico (pH 6.2). En la humedad también se encontró diferencia significativa ($p < 0$), el sitio con mayor porcentaje de humedad fue el orgánico (31.27%) y el sitio semi convencional apenas alcanzó 13.8% de humedad.

En la Tabla 2.5 se comparan los promedios de las variables biogeoquímicas bajo un manejo agrícola distinto, semi convencional (huerta Huitzicho) y orgánico (huerta Cedritos 2). No se compararon las medias para los nutrientes totales ya que únicamente se cuenta con los datos del sitio semi convencional. En los nutrientes orgánicos disueltos se obtuvieron diferencias significativas para el NOD y POD ($p < 0.001$, para ambas variables). El NOD presentó mayor concentración en el suelo del sitio semi convencional ($2.95 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) respecto al orgánico ($0.802 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). En contraste, el POD presentó mayor concentración en el sitio con manejo orgánico (Tabla 2.5).

El NH_4^+ disponible ($p < 0.001$) y el PO_4^{3-} disponible ($p < 0.056$) presentaron diferencias significativas entre parcelas agrícolas, mientras que el NH_3 no presentó diferencias. La mayor concentración de NH_4^+ disponible se encontró en el sitio semi convencional, mientras que en el sitio orgánico el valor fue de cero, es decir, la concentración de NH_4^+ en el sitio orgánico fue tan baja que no fue detectada por la técnica utilizada para su determinación. El PO_4^{3-} disponible presentó una mayor concentración en el sitio con manejo semi convencional ($56.1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) respecto al sitio con manejo orgánico ($18.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$). No se observaron diferencias significativas en los nutrientes en biomasa microbiana, entre tipos de manejo agrícola.

Tabla 2.5 Variables biogeoquímicas con media y error estándar (del promedio) y, significancia de las diferencias entre el tipo de manejo de las parcelas: la huerta convencional Huitzicho y la huerta orgánica Cedritos 2. **CT**: Carbono Total; **NT**: Nitrógeno Total; **PT**: Fósforo Total; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NH₄⁺Disp**: Amonio Disponible; **NO₃⁻Disp**: Nitrato Disponibles; **PO₄³⁻Disp**: Ortofosfato Disponible; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana.

	Semi Convencional (Huitzicho)	Orgánico (Cedritos 2)	P
<i>pH</i>	6.9 ^A (0.129)	6.2 ^B (0.159)	0.014
<i>% Humedad</i>	13.18 ^B (0.555)	31.27 ^A (1.60)	0.000
TOTALES (mg*g⁻¹)			
<i>CT</i>	47.9 (±3.46)		
<i>NT</i>	1.51 (±0.099)		
<i>PT</i>	0.489 (±0.049)		
DISUELTOS (µg*g⁻¹)			
<i>COD</i>	36.1 (±7.53)	24.5 (±3.01)	0.192
<i>NOD</i>	2.95 ^A (±0.429)	0.802 ^B (±0.100)	0.001
<i>POD</i>	2.17 ^B (±0.450)	4.83 ^A (±0.220)	0.001
DISPONIBLES (µg*g⁻¹)			
<i>NH₄⁺ Disp</i>	1.01 ^A (±0.202)	0 ^B	0.001
<i>NO₃⁻ Disp</i>	3.24 (±0.384)	2.20 (±0.908)	0.587
<i>PO₄³⁻ Disp</i>	56.1 ^A (±14.6)	18.2 ^B (±8.68)	0.056
MICROBIANOS (µg*g⁻¹)			
<i>CMIC</i>	191 (±48.5)	155 (±23.2)	0.522
<i>NMIC</i>	32.3 (±5.65)	36.1 (±7.19)	0.693
<i>PMIC</i>	15.6 (±1.32)	17.1 (±2.95)	0.643

En las Figuras 2.3 – 2.6 se muestran los resultados obtenidos del análisis de correlación de Pearson que se realizaron utilizando las variables fisicoquímicas y biogeoquímicas cuantificadas para cada sitio: Bosque Huitzicho, Huerta Huitzicho, Bosque Cedritos 2 y Huerta Cedritos 2.

En la Figura 2.3, correspondiente al Bosque Huitzicho, la humedad se correlacionó significativamente de forma positiva con el NMIC. Así mismo, el CT se correlacionó significativamente de forma positiva con el PT y el PMIC. El NT y PT se correlacionaron significativamente de forma positiva.

En la Figura 2.4, de la correlación de las variables fisicoquímicas y biogeoquímicas de la Huerta Huitzicho únicamente se encontró correlación significativa de forma positiva entre las variables CT y NT y entre las formas disponibles de NO_3^- y PO_4^{3-} . Las variables COD y el PMIC se correlacionaron significativamente de forma negativa.

La Figura 2.5 muestra las correlaciones obtenidas en el bosque Cedritos 2. El COD se correlacionó significativamente de forma negativa con el CMIC. El POD se correlacionó significativamente de forma negativa con el PO_4^{3-} disponible. Por su parte el PO_4^{3-} disponible se correlacionó significativamente de forma positiva con el NMIC.

Las correlaciones observadas para la Huerta Cedritos 2 (Figura 2.6), fueron entre el pH con el NO_3^- disponible y el PMIC; el NOD se correlacionó igualmente con el NO_3^- disponible y el PMIC. En las formas disponibles, por su parte el NO_3^- disponible se correlacionó significativamente de forma positiva con el PMIC y PO_4^{3-} disponible; el PO_4^{3-} disponible se correlacionó significativamente de forma positiva con el pH y el PMIC.

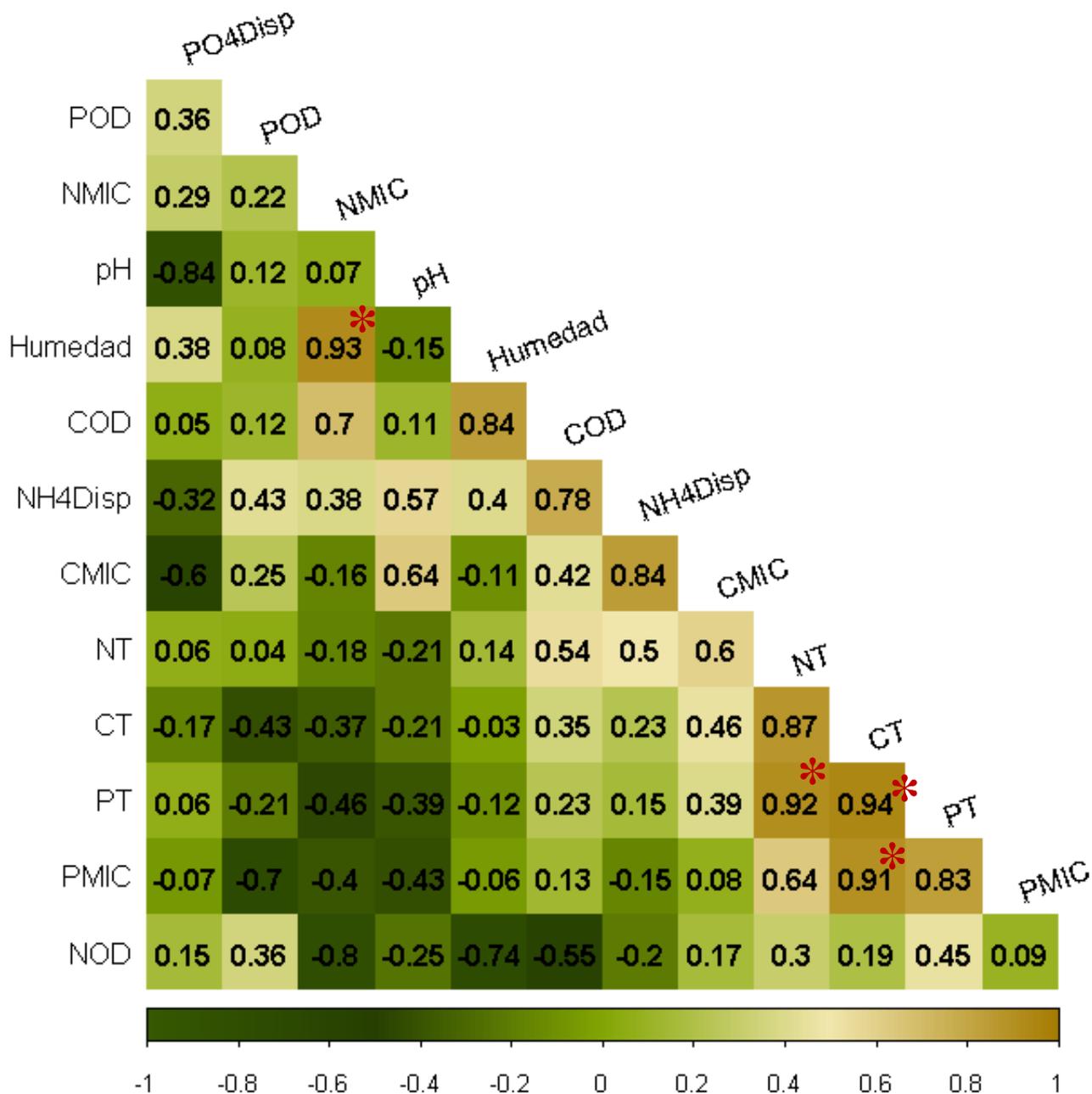


Figura 2.3 Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas del Bosque del sitio Huitzicho. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; CT: Carbono Total; NT: Nitrógeno Total; PT: Fósforo Total; COD: Carbono Orgánico Disuelto; NOD: Nitrógeno Orgánico Disuelto; POD: Fósforo Orgánico Disuelto; NH4Disp: Amonio Disponible; PO4Disp: Fósforo disponible en forma de ortofosfato; CMIC: Carbono en Biomasa Microbiana; NMIC: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; PMIC: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.05$).

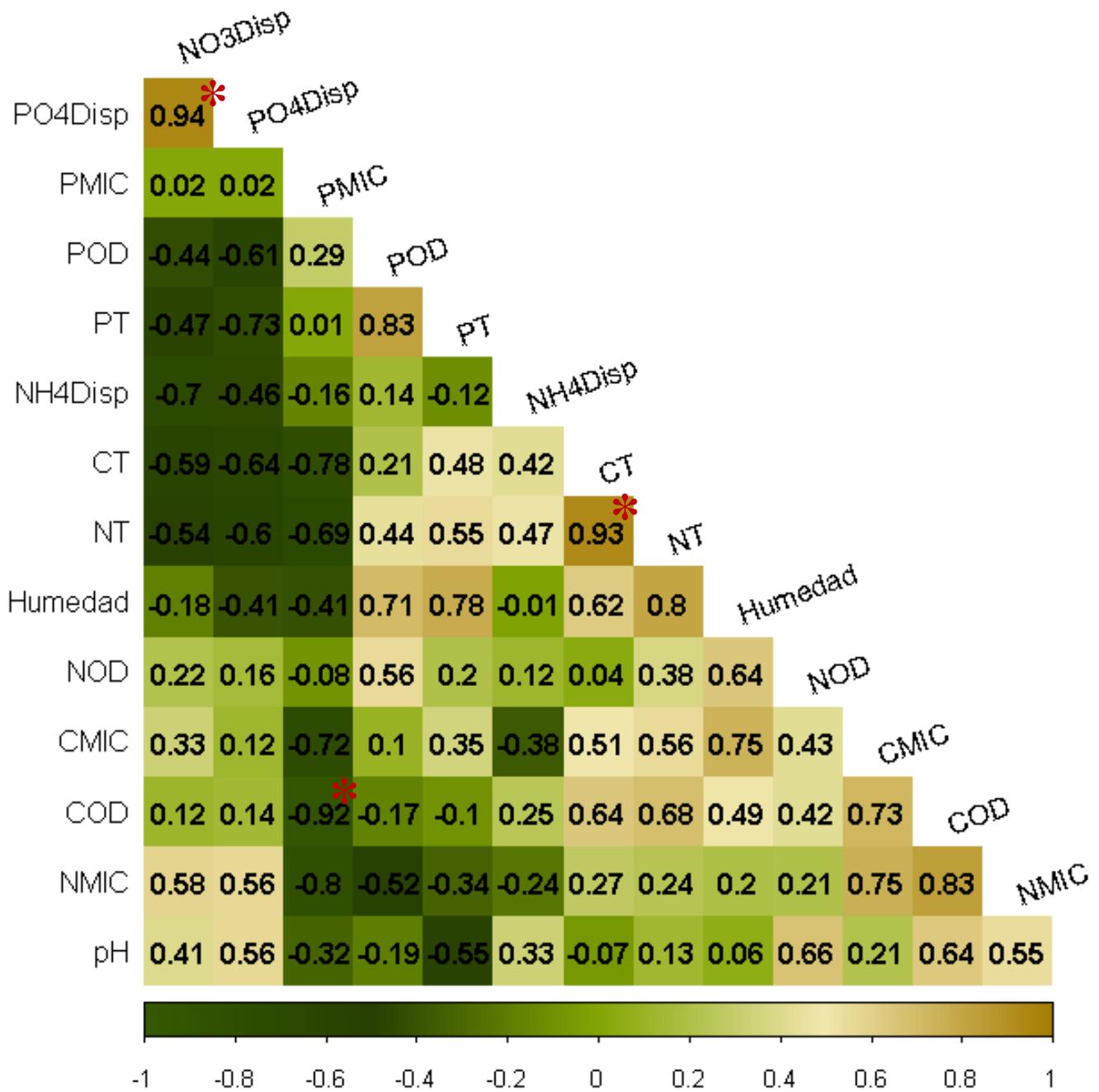


Figura 2.4 Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas de la Huerta del sitio Huitzicho. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; CT: Carbono Total; NT: Nitrógeno Total; PT: Fósforo Total; COD: Carbono Orgánico Disuelto; NOD: Nitrógeno Orgánico Disuelto; POD: Fósforo Orgánico Disuelto; NH4Disp: Amonio Disponible; NO3Disp: Nitrato Disponible; PO4Disp: Fósforo disponible en forma de ortofosfato; CMIC: Carbono en Biomasa Microbiana; NMIC: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; PMIC: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$).

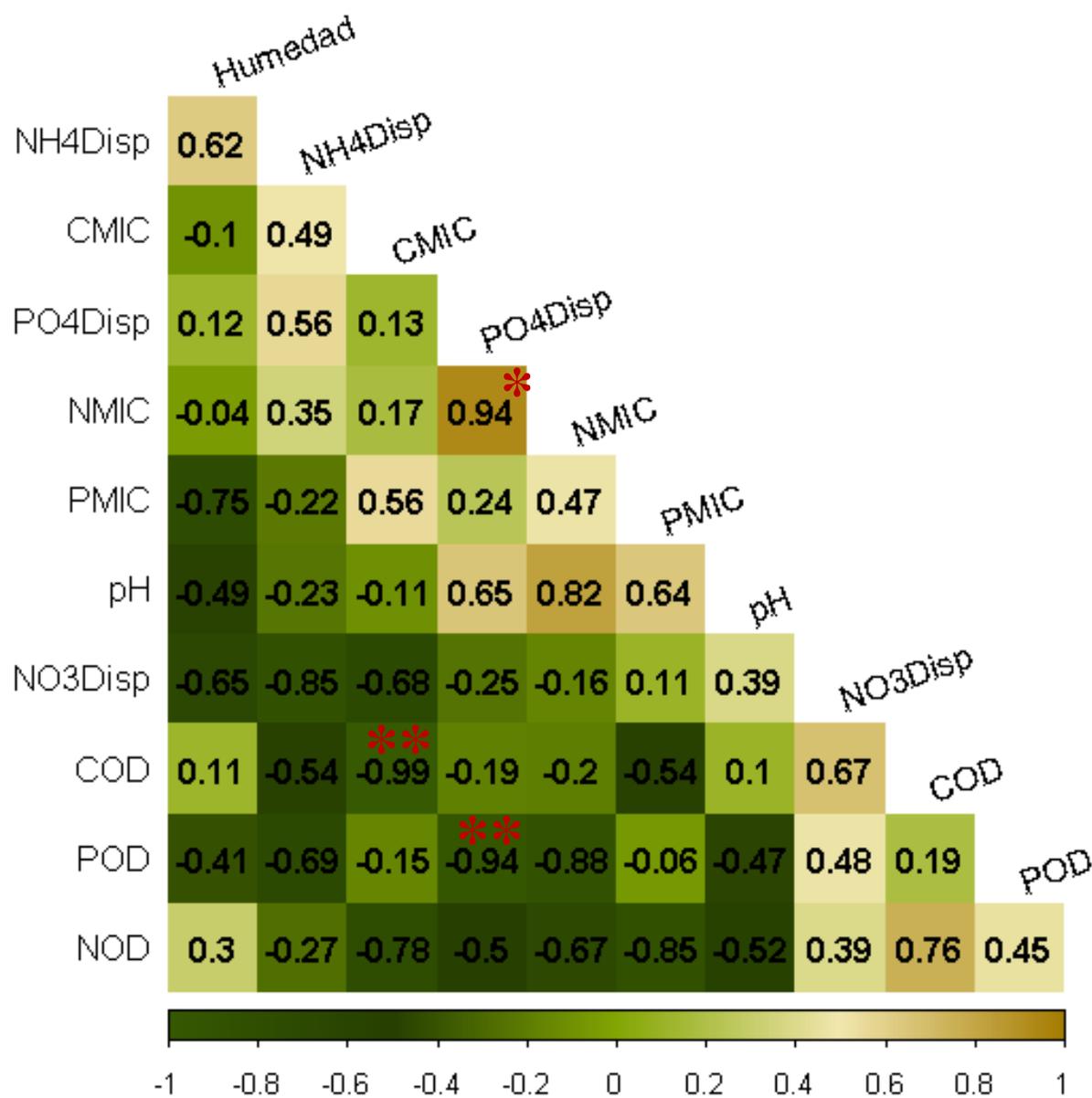


Figura 2.5 Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas de Bosque del sitio Cedritos 2. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NH4Disp**: Amonio Disponible; **NO3Disp**: Nitrato Disponible; **PO4Disp**: Fósforo disponible en forma de ortofosfato; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$).

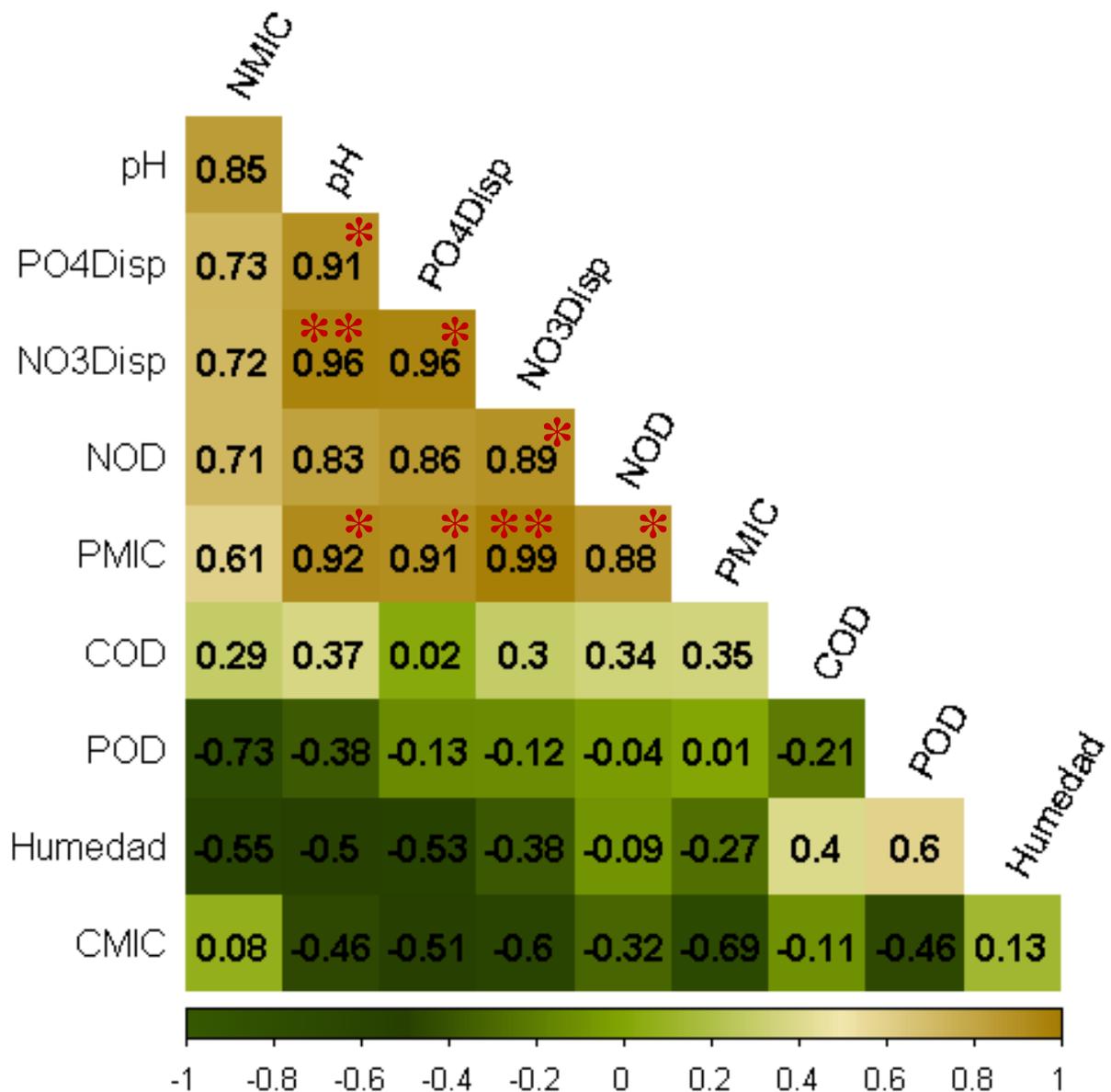


Figura 2. 6 Matriz de correlación de Pearson de las variables biogeoquímicas de la Huerta del sitio Cedritos 2. Las variables biogeoquímicas utilizadas fueron: pH; Humedad; **COD**: Carbono Orgánico Disuelto; **NOD**: Nitrógeno Orgánico Disuelto; **POD**: Fósforo Orgánico Disuelto; **NO3Disp**: Nitrato Disponible; **PO4Disp**: Ortofosfato disponible; **CMIC**: Carbono en Biomasa Microbiana; **NMIC**: Nitrógeno en Biomasa Microbiana; **PMIC**: Fósforo en Biomasa Microbiana. La escala de color representa los valores de rho (coeficiente de correlación de Pearson). Con asterisco se encuentran señaladas las correlaciones significativas ($p < 0.5$).

2.3.2 ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO DE OCLUSIÓN DE FÓSFORO

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) mostraron que en Huitzicho no se observó efecto del cambio de uso (CUS) de suelo en el proceso de oclusión de fósforo en el suelo, en cambio la cantidad de fertilizante utilizada en los suelos de ambos sitios sí muestra diferencias significativas ($p < 0.000$). En el caso de la Huerta Huitzicho a medida que la cantidad de fertilizante aumenta, el proceso de oclusión también parece hacerlo.

Por su parte, en Cedritos 2 el CUS no presentó diferencias significativas para el proceso de oclusión, caso contrario a las fertilizaciones, donde sí hubo diferencias significativas ($p < 0.000$) (Figura 2.7). En las fertilizaciones se pudo observar que a medida que la concentración de las fertilizaciones es mayor, el proceso de oclusión disminuye caso contrario al huerto Huitzicho. Además, existe una influencia significativa ($p < 0.014$) sobre la oclusión de P en el suelo por parte de ambos factores (CUS y fertilización).

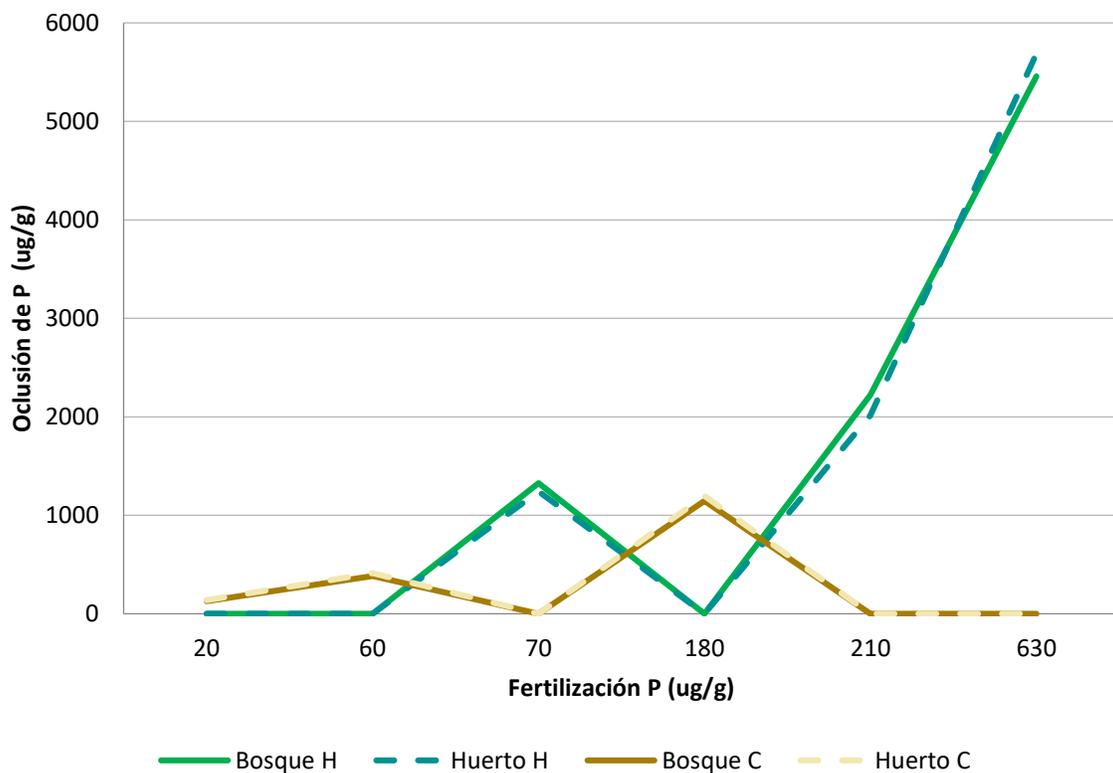


Figura 2. 7 Fertilización vs oclusión ($\mu\text{gP } g^{-1}$) en los sitios de estudio Huitzicho y Cedritos 2. En tonos verde y azul están representados el sitio Huitzicho y en tonos marrón el sitio Cedritos 2. Las líneas continuas corresponden a los bosques y las líneas punteadas a las huertas.

2.4 DISCUSIÓN

El presente trabajo tuvo por objetivo evaluar los efectos del cambio de uso de suelo (CUS) y el tipo de manejo agrícola (semi convencional y orgánico) sobre la dinámica de nutrientes, específicamente nitrógeno (N) y fósforo (P) en suelos de tipo andosol de cultivos de aguacate en Michoacán; así como evaluar el efecto del CUS en el proceso de oclusión de P en el suelo. Para esto se evaluaron las variables fisicoquímicas y biogeoquímicas de los sitios de estudio Huitzicho (Uruapan, Michoacán) y Cedritos 2 (Acuitzio, Michoacán) ambos conformados por una huerta dedicada al cultivo de aguacate y un fragmento de bosque aledaño. Las huertas de aguacate fueron seleccionadas de acuerdo con el manejo agrícola, en Huitzicho el manejo es semi convencional y en Cedritos 2 es un manejo agrícola orgánico. A continuación, se discute por separado la dinámica del N y P en los distintos sitios y por tipo de manejo, también se discute el efecto del CUS en el proceso de oclusión de P para el muestreo realizado en 2019.

Para explicar la dinámica de nutrientes en los sitios de estudio se realizaron diagramas de cajas, donde cada color representa un nutriente, al cual están asociados distintos procesos biogeoquímicos. Además, en color rojo se encuentran señaladas las diferencias significativas y, las flechas blancas corresponden a procesos generales. La Figura 2.8 corresponde al sitio bosque Huitzicho, Figura 2.9 huerta Huitzicho, Figura 2.10 bosque Cedritos 2 y Figura 2.11 huerta Cedritos 2. Las figuras 2.8 y 2.9 muestran las diferencias significativas entre el bosque y la huerta (CUS) del sitio Huitzicho y las figuras 2.10 y 2.11 muestran las diferencias significativas entre el bosque y la huerta (CUS) del sitio Cedritos 2.

2.4.1 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA DINÁMICA DE N Y P EN EL SITIO HUITZICHO

El muestreo se realizó en temporada seca, durante el mes de mayo, por lo que en ambos sitios (bosque y huerta) se observaron bajos porcentajes de humedad. En el suelo de la huerta se presentó mayor humedad con 13.18% respecto al bosque (11.5%). El pH del bosque presentó un pH ligeramente ácido (pH=6.3) y la huerta un pH neutro (pH=6.9). De acuerdo con Osorio (2012) y su escala de pH para disponibilidad de nutrientes, el pH del bosque puede estar favoreciendo la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Generalmente en los ecosistemas terrestres, el COD representa la principal fuente de energía para la actividad microbiana encargada de la mineralización de nutrientes (N y P). En el caso del bosque Huitzicho se observó que el COD y NOD están en cantidades mayores que en la huerta, esto quiere decir que los microorganismos encargados de realizar el proceso de mineralización tienen más recurso energético, lo cual puede explicar la mayor concentración de NH_4^+ disponible. En cambio, el NO_3^- disponible en el bosque fue muy baja que no fue detectada con la técnica utilizada, esta baja disponibilidad puede deberse a que hay competencia por el recurso, es decir, los organismos descomponedores y plantas compiten con los organismos nitrificantes por el NH_4^+ disponible, por lo tanto el proceso de nitrificación en el bosque se ve limitado y las salidas de N por desnitrificación y lixiviación disminuyen (Chapin III *et al.*, 2012).

Este mismo resultado, fue reportado por Gavito Pardo *et al.* (2011) donde al igual que en este trabajo se realizó un muestreo de suelo huertas de aguacate con manejo orgánico y convencional y fragmentos de bosque aledaños; en los bosque la forma predominante de N fue el NH_4^+ , que no contamina cuerpos de agua, mientras que las concentraciones de NO_3^- fueron menores.

En la huerta Huitzicho, contrario al bosque, la mayor parte del nitrógeno inorgánico se encontró en forma de NO_3^- disponible, resultado que también fue observado por Gavito Pardo *et al.* (2011) y se encontró que este efecto tuvo mayor visibilidad en las huertas convencionales. Lo anterior puede indicar que en un primer momento el proceso que domina es la mineralización del NOD y, posteriormente, la nitrificación, disminuyendo la cantidad de NH_4^+ disponible. Sin embargo, el tipo de manejo agrícola puede ser un factor importante en la disponibilidad del N, ya que la adición de fertilizantes puede incrementar la cantidad de NO_3^- disponible en la solución del suelo. Este incremento en el proceso de nitrificación y mayor cantidad de NO_3^- disponible, lo observaron también Salazar-Sosa *et al.* (2010), al añadir estiércol bovino en un cultivo de maíz.

En lo referente al P, en la huerta las distintas formas de P analizadas (PT, POD, PO_4^{3-} y PMIC) registraron mayores concentraciones respecto al bosque Huitzicho. Las diferencias significativas se encontraron en el almacén de PT, PO_4^{3-} disponible y PMIC (Tabla 4). La principal fuente de fósforo inorgánico son las fuentes orgánicas que están constituidas

principalmente por los residuos de plantas, animales y microorganismos que liberan compuestos como los ácidos nucleicos, fosfolípidos y ésteres (Cerón-Rincón & Aristizábal-Gutiérrez, 2012).

La concentración de PO_4^{3-} disponible en la huerta fue mayor respecto al bosque. Esto se puede explicar por el tipo de manejo agrícola, es decir, la adición de fertilizantes químicos y orgánicos pudo haber favorecido la disponibilidad de este nutriente en la solución del suelo. Respecto al proceso de inmovilización de P en la biomasa microbiana, en el suelo de la huerta, se observó que este proceso se favorece en comparación con el suelo del bosque. Este mismo patrón fue reportado por Morón-Cruz (2019) y González-Hernández (2020), en otros sistemas, lo que podría indicar que los microorganismos a pesar de contar con mayor disponibilidad de P respecto al bosque, inmovilizan más P y lo mantienen como reserva de P disponible ya que, de acuerdo con González-Hernández (2020), los nutrientes inmovilizados en biomasa microbiana representan un fertilizante natural en los ecosistemas por la liberación de nutrientes posterior a la muerte o lisis celular.

En el bosque Huitzicho las concentraciones de PO_4^{3-} disponible y PMIC fueron bajas lo cual se explica por las características de estos suelos (Figura 2.8); su composición basada en materiales como la imogolita, ferrihidrita, alófano y complejos órgano minerales de aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{3+}) promueven la oclusión del P lo cual puede reducir la disponibilidad de este elemento para la plantas y microorganismos (Bayuelo Jiménez *et al.*, 2019).

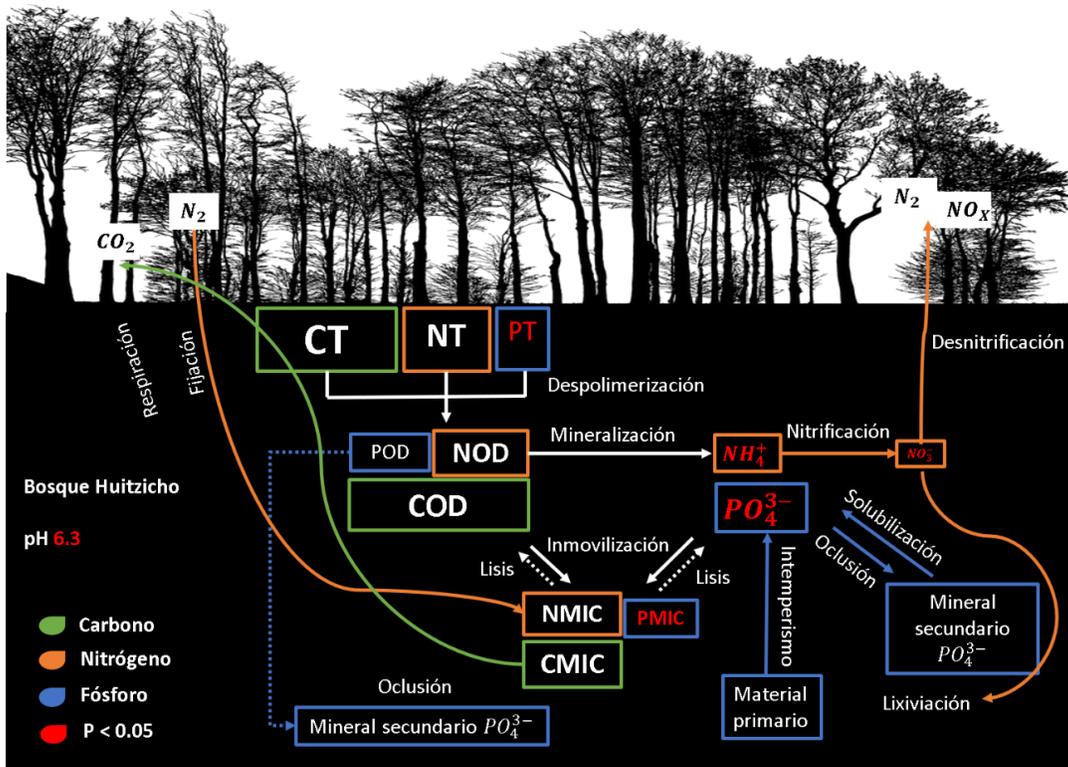


Figura 2.8 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del Bosque Huitzicho, Uruapan en mayo de 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.

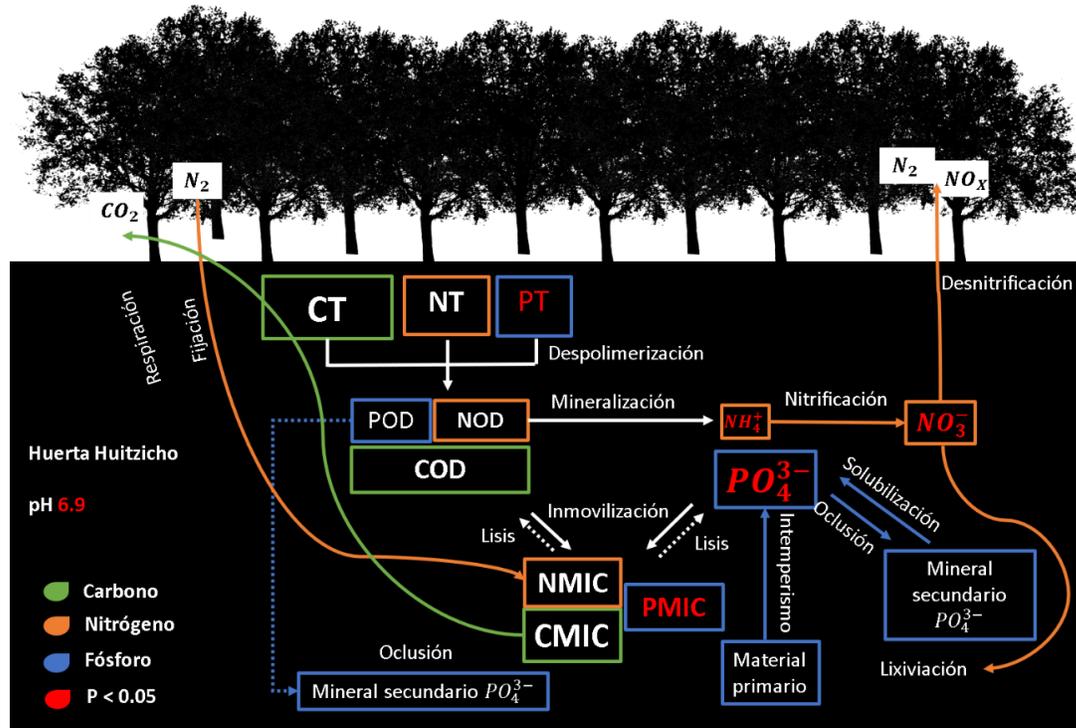


Figura 2.9 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes de la huerta Huitzicho, Uruapan en mayo 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.

2.4.2 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA DINÁMICA DE N Y P EN EL SITIO CEDRITOS 2

El muestreo en el sitio Cedritos 2 se realizó durante la época de lluvias, en el mes de septiembre 2019, lo cual se vio reflejado en el alto porcentaje de humedad en ambos sitios (bosque y huerta) el bosque tuvo mayor humedad (36.31%) respecto a la huerta (31.27%; Tabla 4). El pH del bosque fue ligeramente neutro (pH 6.7) y la huerta presentó un pH ligeramente ácido (pH 6.2) (Tabla 4). De acuerdo con Osorio (2012) y su escala de pH para disponibilidad de nutrientes, el pH de la huerta es el óptimo para la disponibilidad de nutrientes para las plantas. En las Figuras 2.10 y 2.11 se muestran los diagramas de cajas de la dinámica de nutrientes del N y P en el bosque y huerta de Cedritos 2.

En el bosque, la concentración de COD ($39 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) fue mayor respecto a la huerta ($24.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). La diferencia en la disponibilidad en ambos sitios puede deberse a la composición de la MO, es decir si está compuesta de material más recalcitrante o lábil. La baja disponibilidad de COD en la huerta puede traducirse en una reducción de energía para los microorganismos encargados del proceso de despolimerización de la MO (Tapia-Torres, 2010) y, por lo tanto, una menor concentración de NOD y POD.

En la dinámica del N, las variables biogeoquímicas que presentaron diferencias significativas por el CUS fueron el NOD ($P=0.017$), el NH_4^+ disponible ($P=0.002$) y el PO_4^{3-} disponible ($P=0.007$). Así mismo, se observó diferencias en el CMIC ($P=0.006$) y NMIC (0.001) (Tabla 4). En el bosque, el proceso que domina en la dinámica del N es la inmovilización de este nutriente en la biomasa microbiana (NMIC), esto nos indica gran parte del nitrógeno orgánico que hay en el suelo, posterior a su mineralización, está siendo almacenado en la biomasa microbiana.

En las formas de nitrógeno inorgánico, el NH_4^+ disponible en el bosque obtuvo mayor concentración que el NO_3 disponible, lo que puede indicar que la mineralización es el proceso que domina sobre la nitrificación en la disponibilidad de formas inorgánicas de nitrógeno en el bosque. Además, la baja concentración del NH_4^+ puede indicar también que la mayor parte de este está siendo inmovilizado. En la huerta, contrario al bosque, la concentración de NH_4^+ disponible fue baja, esto se puede atribuir a la baja concentración de NOD existente en la

huerta, que al ser menor disminuye el proceso de mineralización de las formas orgánicas a inorgánicas.

Respecto a la dinámica del P, las variables biogeoquímicas de POD y PMIC mostraron valores muy similares tanto en el bosque como en la huerta, por esta razón se puede decir que a pesar del CUS se han mantenido estables los procesos relacionados a la entrada de P orgánico, así como su almacén en la biomasa microbiana (Figura 2.10 y 2.11). Por otro lado, el P inorgánico sí presentó variabilidad, en el caso de la huerta su concentración fue mayor que en el bosque, lo cual se puede explicar por las prácticas de manejo empleadas, tal como la adición de fertilizantes.

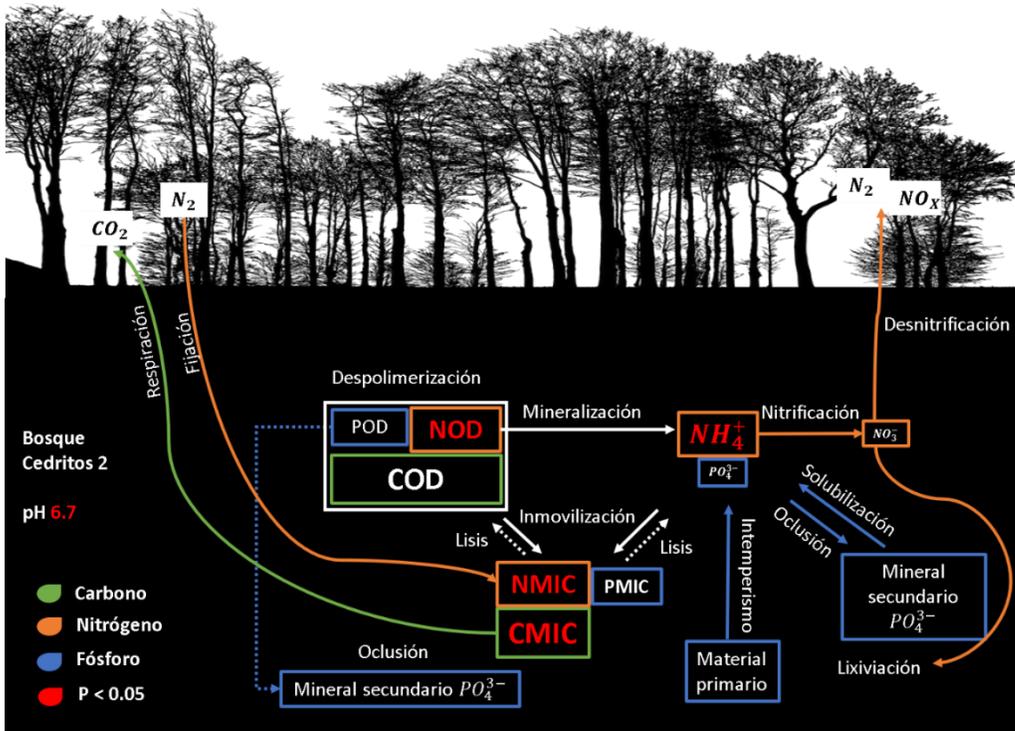


Figura 2.10 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del bosque Cedritos 2, Acuitzio en septiembre 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.

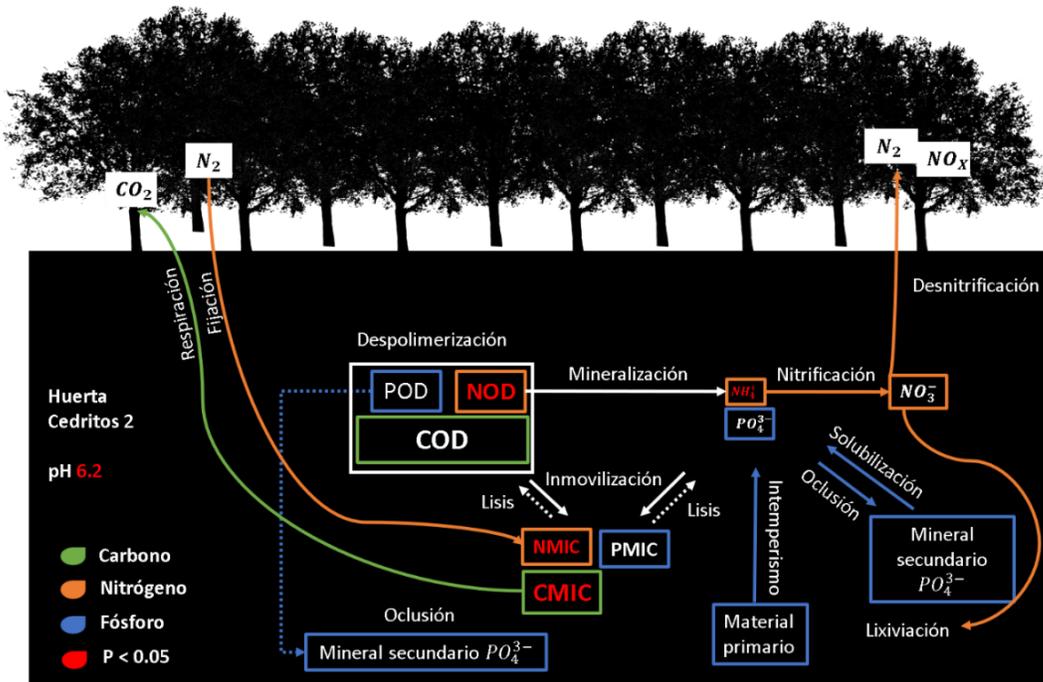


Figura 2.11 Diagrama de cajas de la dinámica de nutrientes del bosque Cedritos 2, Acuitzio en septiembre 2019. Cada color utilizado corresponde a un nutriente. Además, las diferencias significativas están señaladas en rojo; los procesos generales están señalados con flechas blancas; el tamaño de las cajas indica si la concentración del nutriente en cuestión incrementa o decrece.

2.4.3 EFECTOS DEL TIPO DE MANEJO AGRÍCOLA EN LA DINÁMICA DE N Y P EN LAS HUERTAS DE AGUACATE HUITZICHO Y CEDRITOS 2

Las huertas de aguacate muestreadas tienen distinto tipo de manejo agrícola, la huerta Huitzicho está bajo un manejo agrícola semi convencional y la huerta Cedritos 2 tiene un manejo agrícola orgánico. El objetivo de esta comparación fue analizar si el tipo de manejo agrícola que se lleva a cabo para la siembra de aguacate modifica de manera diferencial la dinámica de N y P. Las diferencias significativas se encontraron en los almacenes de los nutrientes orgánicos disueltos: NOD y POD; y en los nutrientes disponibles: NH_4^+ y PO_4^{3-} (Tabla 2.5).

El NOD tuvo una concentración mayor en el sitio con manejo agrícola semi convencional respecto al sitio orgánico, posiblemente debido a una mayor despolimerización de moléculas ricas en N. Además, prácticas de manejo tal como mantener el mantillo producido por el cultivo puede generar un ingreso importante de MO al sistema, que por procesos de descomposición y despolimerización libera nutrientes en forma orgánica. (Tamayo et al., 2018) La concentración de POD fue más alta en el sitio orgánico, respecto al semi convencional, de igual manera que con el N, esto podría estar relacionado a una mayor despolimerización de moléculas ricas en P en el sitio con manejo orgánico. Tanto el NH_4^+ disponible como el PO_4^{3-} disponible, tuvieron mayor concentración en el sitio semi convencional, respecto al orgánico donde no se registró concentración de NH_4^+ disponible (Tabla 2.5).

En el sitio semi convencional, para la fertilización del cultivo se utilizan insumos orgánicos como composta, el guano, derivados de pescado y estiércol y, fertilizantes sintéticos como los nitrogenados y fosfatados (Tapia-Vargas & Bravo Espinoza, 2009). Se ha visto que la aplicación de composta y los derivados de pescado pueden favorecer la disponibilidad de nutrientes necesarios en la solución del suelo para el cultivo de aguacate. Por otro lado, también se ha observado que la frecuente aplicación de estos fertilizantes orgánicos alcaliniza el pH ayudando a hacer disponibles elementos que en este tipo de suelos (andosoles) son de baja disponibilidad, lo cual se ve reflejado en el pH del sitio (Tapia-Vargas et al., 2014).

Por otro lado, la composta, el guano y el estiércol son considerados como fuentes de entrada de MO y de los macronutrientes N y P, tanto en formas orgánicas como inorgánicas (Beltrán-Morales *et al.*, 2019; RETAMA, 2017). Además, la adición de fertilizantes sintéticos representa otra entrada de nutrientes inorgánicos a la solución del suelo para que estos sean adquiridos por las plantas y microorganismos. Por lo anterior, se puede decir que la disponibilidad de NH_4^+ y NO_3^- en la solución del suelo es resultado principalmente de la entrada de MO con alto contenido de N, la aplicación de fertilizantes orgánicos ricos en N, así como la aplicación de fertilizantes sintéticos.

Sin embargo, también puede haber pérdidas de nutrientes en el sistema y, en el caso del sitio semi convencional, la mayor parte del nitrógeno inorgánico fue el NO_3^- disponible, esto sugiere que las pérdidas de N del sistema por desnitrificación y lixiviación pueden ser mayores (Chapin III *et al.*, 2012).

En el caso de la dinámica del P, en el sitio semi convencional, la entrada de este nutriente puede ser por medio de la MO y de la fertilización química. No obstante, se puede observar que el POD fue menor que en el sitio orgánico. Por otro lado, el PO_4^{3-} disponible fue mayor en el sitio semi convencional, lo cual podría indicar que este almacén es superior por la adición de la fertilización.

En el sitio orgánico, el NOD y el NH_4^+ disponible fueron menores respecto al sitio semi convencional, esto podría estar relacionado a la cantidad y calidad de la MO que entra al sistema, ya que estos dos factores son determinantes para la disponibilidad del sustrato necesario para la descomposición y mineralización del N (Chapin III *et al.*, 2012). En el sitio orgánico, el mantillo generado por el cultivo es retirado; de acuerdo con los datos obtenidos en campo, la única entrada de MO es a través de la fertilización con estiércol. El P en esta huerta es suministrado por medio de roca fosfórica, por este motivo es que la concentración de PO_4^{3-} disponible fuese menor que en el sitio semi convencional, donde la entrada de P es a través de la MO del sitio, la adición de fertilizantes orgánicos y sintéticos.

2.4.4 EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL PROCESO DE OCLUSIÓN DE P EN EL SUELO

Con el experimento, se evaluó cómo el proceso de oclusión de fósforo se ve afectado por el cambio de uso de suelo (CUS). Para esto se realizó un experimento de fertilización con fosfato monopotásico (KH_2PO_4) que fue aplicado en diferentes concentraciones a las muestras de suelo fresco de bosque y huerta de ambos sitios: Huitzicho y Cedritos 2. Los datos obtenidos se analizaron a través de un análisis de varianza de 2 factores, donde el factor 1 fue el tipo de uso de suelo (bosque y huerta) y factor 2 fueron las distintas concentraciones de fertilizaciones que se utilizaron.

De acuerdo con los datos obtenidos se puede inferir que el CUS no tuvo un impacto significativo en este proceso en ninguno de los sitios de estudio. En cambio, la concentración de fertilizante aplicada sí mostró diferencias significativas en ambos sitios ($P < 0.000$) lo que sugiere que para la Huerta Huitzicho a medida que se agrega más fertilizante fosfatado al suelo, este tiene la capacidad de retenerlo u ocluirlo a través de la formación de compuestos insolubles (Figura 2.7). Lo anterior se puede explicar debido a que el ion PO_4^{3-} es altamente reactivo y que los suelos del tipo andosol tienen altas concentraciones de Fe^{3+} y Al^{3+} que favorecen la formación de moléculas inorgánicas estables. Esto por un lado reduce la disponibilidad de P para las plantas y microorganismos, pero por otro lado favorece el almacén de P estable aumentando el legado de P en los suelos de la franja aguacatera y reduciendo al mismo tiempo la contaminación de cuerpos de agua por un exceso de P.

En el caso de la huerta Cedritos 2, contrario al sitio Huerta Huitzicho, conforme incrementó la cantidad de fertilizante aplicada al suelo, el proceso de oclusión no aumentó, si no que el proceso de oclusión disminuyó (Figura 2.7), lo cual al no ser aprovechado por alguna planta o microorganismos ni unirse con otros elementos podría indicarnos que el suelo de este sitio a partir de $210 \mu\text{gP/g}$ suelo se satura de este nutriente y, al no ser aprovechado por las plantas o microorganismos ni unirse a otro elementos, puede salir del suelo a través de procesos de lixiviación hacia los cuerpos de agua ocasionando costos ambientales por la contaminación de cuerpos de agua y económicos por el gasto que genera la aplicación en exceso de este nutriente.

Sin embargo, son necesarios más estudios que nos permitan evaluar la velocidad de oclusión y de solubilización en los suelos de uso agrícola para hacer un uso eficiente de los fertilizantes fosfatados y nitrogenados.

CONCLUSIONES GENERALES

Con toda la información abordada en el presente trabajo llegamos a las siguientes conclusiones generales:

Capítulo 1:

1. El cultivo de aguacate en Michoacán se ha estudiado desde diferentes áreas de conocimiento, donde los temas más abordados refieren principalmente a tres líneas temáticas: plagas y enfermedades, control biológico y prácticas de manejo agrícola.

2. Existe poca información relacionada al suelo y, específicamente, a sus procesos biogeoquímicos y cómo estos son alterados por el cambio de uso de suelo y el manejo agrícola del cultivo.

3. Los efectos del uso de agroquímicos en el cultivo de aguacate a la salud humana han sido poco estudiado en Michoacán a pesar de su importancia económica para el estado y el país.

4. Ante la constante expansión de la franja aguacatera es imprescindible contar con trabajos que aborden dichos temas y así contribuir al diseño de estrategias de manejo que permitan construir un sistema productivo sostenible.

Capítulo 2:

1. El cambio de uso de suelo, de forestal a huertas de aguacate tuvo incidencia en la dinámica del N y P en ambos sitios de estudio: Huitzicho y Cedritos 2.

2. En la huerta del sitio con manejo agrícola semi convencional (Huitzicho), se observaron mayores concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} disponible y de PMIC. Mientras que la dinámica natural del bosque en el mismo sitio favoreció una mayor mineralización de N y por lo tanto se observaron mayores concentraciones de NH_4^+ .

3. En el bosque de Huitzicho el proceso que domina es la mineralización de la materia orgánica, lo cual reduce las pérdidas de N por desnitrificación o lixiviación.

4. En el sitio con manejo agrícola orgánico (Cedritos 2), las formas de nitrógeno tuvieron mayor concentración en el bosque que en la huerta.

5. El proceso que domina en el bosque es la inmovilización de N en la biomasa microbiana.

6. En la huerta orgánica, las altas concentraciones de NO_3^- están relacionadas con la fertilización; concentraciones pequeñas de NH_4^+ pueden atribuirse a bajas concentraciones de NOD ya sea porque la MO es muy recalcitrante o no están presentes los organismos necesarios para su despolimerización.

7. Respecto al P, se encontró una mayor concentración de PO_4^{3-} en la huerta de aguacate, producto posiblemente de la adición de roca fosfatada como fertilizante.

8. El manejo semi convencional favoreció una mayor concentración de NOD, NH_4^+ y PO_4^{3-} con respecto al manejo orgánico.

9. En el sitio semi convencional debido al proceso de fertilización, existió una mayor entrada de MO rica en N, la cual se encuentra en mayor disponibilidad para las plantas debido a los procesos de mineralización y nitrificación.

10. Los distintos tratamientos de fertilización sí afectaron el proceso de oclusión de P. No obstante, el efecto de las fertilizaciones en ambos sitios fue distinto: en Huitzicho, la oclusión de P incrementa conforme aumenta la concentración de P añadida al suelo, es decir forma compuestos complejos que se mantienen en el suelo formando reservas de este elemento que posteriormente pueden utilizarse por procesos de solubilización. En el suelo de Cedritos 2 a concentraciones intermedias el suelo se satura de este nutriente, por lo que al no ser aprovechado por ningún organismo o unirse con otros compuestos puede convertirse en una fuente de contaminación de cuerpos de agua por su liberación a través de procesos de lixiviación.

Consideraciones finales:

En este trabajo únicamente se tomaron en cuenta las variables fisicoquímicas y biogeoquímicas de los nutrientes totales, disueltos, disponibles y en biomasa microbiana. Sin embargo, para futuros trabajos es importante considerar la microbiota del suelo por su

importancia en los ciclos biogeoquímicos. Además, se sugiere aplicar la técnica de fraccionamiento de P para conocer la distribución de las diferentes formas de P en el suelo. Por otro lado, se propone realizar investigaciones similares en un gradiente de formas de manejo orgánico, semi convencional y convencional.

Finalmente, debido a la poca información existente sobre la dinámica de nutrientes en el sitio y en general en el estado, se adaptaron los alcances de esta investigación para realizar un análisis de estos que permita posteriormente generar un marco para evaluar los efectos que tiene el cambio de uso de suelo en la zona aguacatera en Michoacán.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS GENERALES

- Alarcón-Cháires, P. (2020, enero). Aguacate: El desierto verde mexicano. *Diálogos Ambientales*, (1), 47–52. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat%7Cdialogosambientales/articulos/editorial-invierno-2020?idiom=es>
- Alcalá de Jesús, M., Ortíz Solorio, C. A., & Gutiérrez Castorena, M. del C. (2001). Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoamericana*, 19(3), 227–239.
- Almanza, V., Parra, O., Bicudo, C. E. D. M., González, M. A., López, M., & Urrutia, R. (2016). Floraciones de fitoplancton y variación de la estructura comunitaria fitoplanctónica en tres lagos someros eutróficos de Chile Central. *Gayana - Botanica*, 73(2), 191–205. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432016000200191>
- Aluja, M., Díaz-Fleischer, F., & Arredondo, J. (2004). Nonhost Status of Commercial *Persea americana* ‘Hass’ to *Anastrepha ludens*, *Anastrepha obliqua*, *Anastrepha serpentina*, and *Anastrepha striata* (Diptera: Tephritidae) in Mexico. *Journal of Economic Entomology*, 97(2), 293–309. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-97.2.293>
- Álvarez Ojeda, M. G., Pecina Quintero, V., Acosta Díaz, E., & Almeyda León, I. H. (2018). Evaluación molecular del aguacate criollo (*Persea americana* Mill) en Nuevo León, México. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XX (2).
- Anaya, C. A., & Burgos, A. L. (2015). Energy consumption in the management of avocado orchards in Michoacán, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 21(1), 5–20. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.01.002>
- Ávila-Quezada, G. D., Téliz-Ortiz, D., Vaquera-Huerta, H., González-Hernández, H., & Johansen-Naime, R. (2005). Temporal progress of the damage by thrips (Insecta: Thysanoptera) on avocado (*Persea americana* Mill.). *Agrociencia*, 39(4), 441–447.
- Badii, M., & Landeros, J. (2015). Plaguicidas que afectan a la salud humana y la sustentabilidad. *CULCyT//Toxicología de Plaguicidas*, (19), 21–34.
- Baeten, L., Verstraeten, G., de Frenne, P., Vanhellefont, M., Wuyts, K., Hermy, M., & Verheyen, K. (2011). Former land use affects the nitrogen and phosphorus concentrations and biomass of forest herbs. *Plant Ecology*, 212(5), 901–909. <https://doi.org/10.1007/s11258-010-9876-9>
- Barsimantov, J., & Navia Antezana, J. (2012). Forest cover change and land tenure change in Mexico’s avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops. *Applied Geography*, 32(2), 844–853. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.001>
- Bayuelo Jiménez, J. S., Ochoa, I., De la Cruz Torres, E., & Muraoka, T. (2019). Efecto del uso del suelo en las formas y disponibilidad de fósforo de un Andisol de la Meseta P’urhépecha, Michoacán. *Revista Terra Latinoamericana*, 37(1), 35. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i1.367>
- Bayuelo-Jiménez, J. S., Muraoka, T., de la Cruz-Torres, E., Quintero-Ponce, E., Paredes-Gutiérrez, L. C., & Zaman, M. (2019). Phosphorus fractions and dynamics as affected by land-use changes in the Central Mexican highlands. *Soil Use and Management*, (August), 1–10. <https://doi.org/10.1111/sum.12550>
- Beltrán-Morales, F. A., Nieto-Garibay, A., Murillo-Chollet, J. S. A., Ruiz-Espinoza, F. H., Troyo-Dieguez, E., Alcalá-Jauregui, J. A., & Murillo-Amador, B. (2019). Contenido inorgánico de nitrógeno, fósforo y potasio de abonos de origen natural para su uso en agricultura orgánica. *Revista Terra Latinoamericana*, 37(4), 371–378. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.520>
- Bibi, F., & Ilyas, N. (2020). Effect of Agricultural Pollution on Crops. En M. Hasanuzzaman (Ed.), *Agronomic Crops*. Springer, Singapore.
- Bormann, F. H., & Likens, G. E. (1967). Nutrient Cycling. *Science*, 155(3761), 720-424–429.

- Bravo Espinoza, M., Sánchez Pérez, J. de la L., Vidales Fernández, J. A., Sáenz Reyes, J. T., Chávez León, J. G., Muñoz Flores, H. J., ... Venegas González, E. (2009). *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán*. (J. B. Rentería Ánima & L. Reyes Muro, Eds.), *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro* (Primera Ed). Uruapan, Michoacán: INIFAP.
- Buckingham, S. E., Neff, J., Titiz-Maybach, B., & Reynolds, R. L. (2010). Chemical and textural controls on phosphorus mobility in drylands of southeastern Utah. *Biogeochemistry*, *100*(1), 105–120. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9408-7>
- Campos Rojas, E., Hernández Vásquez, L., Espíndola Barquera, M. C., Reyes Alemán, C., & Barrientos Priego, A. (2011). Caracterización de aguacates criollos mexicanos (*Persea drymifolia*) como donadores de semilla. En *Proceedings VII World Avocado Congress 2011* (pp. 1–11).
- Campos, C. A. (2010). Response of soil inorganic nitrogen to land use and topographic position in the coffee de perote volcano (Mexico). *Environmental Management*, *46*(2), 213–224. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9517-z>
- Campos-Campos, O., Cruz-Cárdenas, G., Aquino, R. J. C., Moncayo-Estrada, R., Machuca, M. A. V., & Meléndez, L. A. Á. (2018). Historical delineation of landscape units using physical geographic characteristics and land use/cover Change. *Open Geosciences*, *10*(1), 45–57. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0004>
- Carpenter, S. R., Smith, V. H., Correll, D. L., Caraco, N. F., Howarth, R. W., & Sharpley, A. N. (2006). Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological Applications*, *8*(3), 559. <https://doi.org/10.2307/2641247>
- Castillo-Vega, A., Sánchez-García, P., Pérez-Moreno, J., Rodríguez-Mendoza, M. N., Trejo-Téllez, L. I., Sandoval-Villa, M., & Alcántar-González, G. (2010). Root endophytic fungi and boron nutrition: Effect on Avocado (*Persea americana* Mill.) “Hass” plants growing on an andisol. *Acta Horticulturae*, *868*, 395–400. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.868.53>
- Celaya-Michel, H., & Castellanos-Villegas, A. E. (2011). Nitrogen mineralization on arid and semi-arid land soil. *Terra Latinoamericana*, *29*, 343–356. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n3/2395-8030-tl-29-03-00343.pdf> <http://www.cabdirect.org/abstracts/20123049100.html>
- Cerón-Rincón, L. E., & Aristizábal-Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Rev. Colomb. Biotecnol*, *XIV* (1), 285–295.
- Chávez-León, G., Tapia Vargas, L. M., Bravo Espinoza, M., Sáenz Reyes, T., Muñoz Flores, H. J., Vidales Fernández, I., Mendonza Cantú, M. (2012). *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. (Primera Ed, Vol. 53). Uruapan, Michoacán: INIFAP.
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2012). Nutrient Cycling. En *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* (Second Ed, pp. 259–296). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Chowdhury, A., Pradhan, S., Saha, M., & Sanyal, N. (2008). Impact of pesticides on soil microbiological parameters and possible bioremediation strategies. *Indian Journal of Microbiology*, *48*(1), 114–127. <https://doi.org/10.1007/s12088-008-0011-8>
- CNA. (1998). *Cuencas Hidrológicas. Escala 1:250000*.
- Corrales Ramírez, MSc, L. C., Arévalo Gálvez, Z. Y., & Moreno Burbano, V. E. (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *Nova*, *12*(21), 67. <https://doi.org/10.22490/24629448.997>
- del Puerto Rodríguez, A. M., Suárez Tamayo, S., & Palacio Estrada, D. E. (2014). Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, *52*(3), 372–387.
- Dubrovina, I. A., & Bautista, F. (2014). Analysis of the suitability of various soil groups and types of climate for avocado growing in the state of Michoacán, Mexico. *Eurasian Soil Science*, *47*(5), 491–503.

<https://doi.org/10.1134/S1064229314010037>

- Estrada-Venegas, E. G., Rodríguez-Navarro, S., & McMurtry, J. A. (2002). Some avocado mites from Michoacán, Mexico. *International Journal of Acarology*, 28(4), 387–393. <https://doi.org/10.1080/01647950208684315>
- FAO, & OMS. (2001). Codex Alimentarius - Alimentos Producidos Orgánicamente. Recuperado el 10 de febrero de 2021, de <http://www.fao.org/3/Y2772S/y2772s00.htm#Contents>
- FAO. (2002). Agricultura y medio ambiente. En *Agricultura mundial: hacia los años 2015/20130 Informe resumido* (p. 75). Roma, Italia. [https://doi.org/10.1016/s0306-9192\(97\)89951-4](https://doi.org/10.1016/s0306-9192(97)89951-4)
- FAO. (2002). Guía sobre Buenas Prácticas para la Aplicación Terrestre de Plaguicidas. Recuperado el 2 de febrero de 2021, de <http://www.fao.org/3/Y2767S/Y2767S00.htm#Top>
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional* (Vol. 103 INFORM). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Recuperado de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30044a.html%0Ahttp://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- FIRA. (2007). Aguacate Análisis de Rentabilidad del Ciclo 2006-2007 y Costos de Cultivo para el Ciclo 2007-2008. FIRA. Recuperado de https://www.fira.gob.mx/Nd/AGUACATE_Michoacan_-_Rentabilidad_2006-2007_Costos_2007-2008.pdf
- Fuentes, B., Bolan, N., Naidu, R., & Mora, M. de la L. (2006). Phosphorus in Organic Waste-Soil Systems. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(2), 64–83. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912006000200006>
- Galindo-Tovar, M. E., & Arzate-Fernández, A. M. (2010). Consideraciones sobre el origen y primera dispersión del aguacate Lauraceae). *Cuadernos de Biodiversidad*, 33, 11–15.
- Galindo-Tovar, M. E., Arzate-Fernández, A. M., Ogata Aguilar, N., Lee Espinosa, H. E., & Landero Torres, I. (2008). Origen y Domesticación del Aguacate (*Persea americana* Mill.) en Mesoamérica. En *XXI Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Veracruz y I del Trópico Mexicano 2008* (pp. 516–523)
- Gallardo, A., Covelo, F., Morillas, L., & Delgado, M. (2009). Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Ecosistemas*, 18(2), 4–19. <https://doi.org/10.7818/re.2014.18-2.00>
- Galloway, J. N., Schelinger, W. H., Clarck, C. M., Grimm, N. B., Law, B. E., Thornton, P. E., ... Martin, R. (2014). Biogeochemical Cycles. En J. M. Melillo, T. (T. C. Richmond, & G. W. Yohe (Eds.), *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment* (pp. 350–368). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J0X63JT0>
- García, A., & Tsunewaki, K. (1977). Cytogenetical studies in the genus *Persea* [avocado] (Lauraceae). iII. electrophoretica studies on peroxidase isozymes). *Jap J Genet.*
- García, E., & CONABIO. (2001). Climas (Clasificación de Koppen modificado por García) Escala 1:1000000, (México). Recuperado el 13 de noviembre de 2020 de http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Garibay, C., & Bocco, G. (2007). La situación actual en el uso del suelo en comunidades indígenas de la región P'urhépecha 1976-2005. *Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas*, 1–66.
- Gavito Pardo, M. E., Astier Calderón, M., Martínez Cruz, J., Ayala Barajas, R., Ramírez García, E., Ortíz Ávila, T., ... Orlando, G. M. (2011). *Informe Final Etapa 1 Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el estado de Michoacán: validación de indicadores ambientales en los principales tipos de producción*. Morelia, Michoacán.

- Gelaw, A. M., Singh, B. R., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.035>
- González-Cortés, J. C., Vega-Fraga, M., Varela-Fregoso, L., Martínez-Trujillo, M., Carreón-Abud, Y., & Gavito, M. E. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities and land use change: The conversion of temperate forests to avocado plantations and maize fields in central Mexico. *Fungal Ecology*, 5(1), 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2011.09.002>
- González-Estudillo, J. C., González-Campos, J. B., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2017). Optimal Planning for Sustainable Production of Avocado in Mexico. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1(2), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s41660-017-0008-z>
- González-Hernández, K. (2020). *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate orgánico en la dinámica de nutrientes y la actividad microbiana*. Instituto Tecnológico de Cd. Altamirano. Cd. Altamirano, Guerrero, México.
- Gopar-Merino, L. F., & Velázquez, A. (2016). Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016(90), 75–88. <https://doi.org/10.14350/rig.46688>
- Heal, O., Flanagan, P., French, D., & Maclean, S. (1981). Decomposition and accumulation of organic matter. *Decomposition and Accumulation of Organic Matter in Tundra*, 587–633.
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., & Chauhan, B. S. (1982). Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970.
- Heijboer, A., De Rooter, P. C., Bodelier, P. L. E., & Kowalchuk, G. A. (2018). Modulation of litter decomposition by the soil microbial food web under influence of land use change. *Frontiers in Microbiology*, 9(NOV), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02860>
- Hernández Becerra, N. (2014). *Dinámica de C, N y P y composición de la comunidad bacteriana del suelo de un gradiente de manejo agrícola en el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán, México.
- Hernández Pérez, A., Cerna Chávez, E., Delgado Ortiz, J. C., Beltrán Beache, M., Tapia Vargas, L. M., & Ochoa Fuentes, Y. M. (2019). First report of *Phytophthium vexans* causing the “Avocado sadness” in Michoacan, Mexico. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 9457(1101), 11–13.
- Herrera-González, J. A., Salazar-García, S., Martínez-Flores, H. E., & Ruiz-García, J. E. (2017). Indicadores preliminares de madurez fisiológica y comportamiento postcosecha del fruto de aguacate méndez. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(1), 55–63. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.1.55-63>
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237(3), 173–195.
- Hopkins, B. G. (2015). Phosphorus availability with alkaline / calcareous soil. *Western Nutrient Management Conference*, (Vol 6), 88–93.
- Iturriaga, M. H., Arvizu-Medrano, S. M., & Escartín, E. F. (2002). Behavior of *Listeria monocytogenes* in avocado pulp and processed guacamole. *Journal of Food Protection*, 65(11), 1745–1749. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.11.1745>
- Jaramillo, V. J., Kauffman, J. B., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D. L., & Ellingson, L. J. (2003). Biomass, Carbon, and Nitrogen Pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystems*, 6(7), 609–629. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0195-4>
- Jiménez Quintero, C. A., Pantoja Estrada, A. H., & Leonel, H. F. (2016). Riesgos en la salud de agricultores por uso y manejo de plaguicidas, microcuena “La Pila”. *Universidad y Salud*, 18(3), 417. <https://doi.org/10.22267/rus.161803.48>

- Kochtcheeva, L., & Singh, A. (2002). Una evaluación de riesgos y amenazas para la salud humana debidos al colapso/degradación del ecosistema. En G. Feola & R. Bazzani (Eds.), *Desafíos y estrategias para la implementación de un enfoque ecosistémico para la salud humana en los países en desarrollo* (pp. 17–28). Uruaguay.
- Kong, X., Zhang, F., Wei, Q., Xu, Y., & Hui, J. (2006). Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China. *Soil and Tillage Research*, 88(1–2), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.04.010>
- Lajtha, K., Driscoll, C. T., Jarrell, W. M., & Elliott, E. T. (1999). Soil phosphorus: characterization and total element analysis. Standard soil methods for long-term ecological research. *Oxford University Press*, (New York), 115–142.
- Lara, C., Esquivel Ávila, L., & Negrete Peñata, J. L. (2011). Bacterias nativas solubilizadoras de fosfatos para incrementar los cultivos en el departamento de Córdoba-Colombia. *Biología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 9(2), 114–120.
- Lara, J. R., Rugman-Jones, P. F., Stouthamer, R., & Hoddle, M. S. (2017). Population Genetics of *Oligonychus perseae* (Acari: Tetranychidae) Collected from Avocados in Mexico and California. *Florida Entomologist*, 100(3), 616–626. <https://doi.org/10.1653/024.100.0320>
- Lara-Chávez, M. B. N., Ávila-Val, T. del C., Aguirre-Paleo, S., & Vargas-Sandoval, M. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi identification in avocado trees infected with *Phytophthora cinnamomi* Rands under biocontrol. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(3), 415–421.
- Li, X., He, H., Zhang, X., Yan, X., Six, J., Cai, Z., Li, Z. (2019). Distinct responses of soil fungal and bacterial nitrate immobilization to land conversion from forest to agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 81–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.023>
- Mackenzie, T. F., May Ver, L., Sabine, C., Lane, M., & Lerman, A. (1991). C, N, P, S Global Biogeochemical Cycles and Modeling of Global Change. En R. Wollast, T. F. Mackenzie, & L. Chou (Eds.), *NATO ASI Series Vol. 14 Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change* (Vol. 4, pp. 2–4). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-76064-8>
- Margni, M., Rossier, D., Crettaz, P., & Jolliet, O. (2002). Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93(1–3), 379–392. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00336-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00336-X)
- Maroko, J. B., Buresh, R. J., & Smithson, P. C. (1998). Soil nitrogen availability as affected by fallow-maize systems on two soils in Kenya. *Biology and Fertility of Soils*, 26(3), 229–234. <https://doi.org/10.1007/s003740050372>
- McCrackin, M. L., Muller-Karulis, B., Gustafsson, B. G., Howarth, R. W., Humborg, C., Svanbäck, A., & Swaney, D. P. (2018). A Century of Legacy Phosphorus Dynamics in a Large Drainage Basin. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(7), 1107–1122. <https://doi.org/10.1029/2018GB005914>
- McLauchlan, K. (2006). The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review. *Ecosystems*, 9(8), 1364–1382. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0135-1>
- Medina Orozco, L. E., & Medina Orozco, I. N. (2018). Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(2), 121. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Medina-Carrillo, R. E., Salazar-García, S., Bonilla-Cárdenas, J. A., Herrera-González, J. A., Ibarra-Estrada, M. E., & Álvarez-Bravo, A. (2017). Secondary metabolites and lignin in ‘Hass’ avocado fruit skin during fruit development in three producing regions. *HortScience*, 52(6), 852–858. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11882-17>
- Montiel-Aguirre, G., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Uribe-Gómez, M. (2007). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 85–90.

- Morales García, J. L., Rodríguez Guzmán, M. del P., Azpíroz Rivero, H. S., & Pedraza Santos, M. E. (2009). Modelo para la estimación del área del fruto en la evaluación de la antracnosis en aguacate (*Persea Americana* Mill.) cv. Hass. *Revista UDO Agrícola*, 9(2), 421–424.
- Morales Manilla, L. M., Reyes González, A., Cuevas García, G., & Onchi Ramuco, M. (2012). Inventario 2011 del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán. Centro. Morelia, Michoacán: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM-COFUPRO.
- Morón-Cruz, J. A. (2019). *Más allá de las minas: sustentabilidad en el uso de fósforo en sistemas agrícolas* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters., 1. Recuperado de papers://d389027f-1c90-43ee-8f36-77ce4678000f/Paper/p19
- Neff, J. C., & Asner, G. P. (2001). Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model. *Ecosystems*, 4(1), 29–48. <https://doi.org/10.1007/s100210000058>
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L. (2016). Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. *Frontiers in Public Health*, 4(July), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Noë, J. Le, Roux, N., Billen, G., Gingrich, S., Erb, K., Krausmann, F., & Thieu, V. (2020). The phosphorus legacy offers opportunities for agro-ecological transition (France 1850 – 2075). *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, 15.
- Ochoa-Fuentes, Y. M., Cerna-Chavez, E., Gallegos-Morales, G., Cepeda-Siller, M., Landeros-Flores, J., & Olivas, A. F. (2015). Pathogenic variability of *Phytophthora cinnamomi* Rands in *Persea americana* Mill. of Michoacan, Mexico. *Ecossistemas Y Recursos Agropecuarios*, 2(5), 211–215.
- Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D., & Oberson, A. (2004). Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(4), 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.010>
- Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H. J., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. V, Guerrero, G., Maser, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2074–2084. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.024>
- Ornela, J. de J., & Yahia, E. M. (2002). El aguacate en México. *Horticultura Internacional*, 76–85. Recuperado de http://www.marm.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_hortint%2Fhortint_2002_38_76_85.pdf
- Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 4–7. Recuperado de [http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/14 pH del suelo y nutrientes_0.pdf](http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/14%20pH%20del%20suelo%20y%20nutrientes_0.pdf)
- Panjaitan, E., Sidauruk, L., Indradewa, D., Martono, E., & Sartohadi, J. (2020). Impact of agriculture on water pollution in Deli Serdang Regency, North Sumatra Province, Indonesia. *Organic Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00282-7>
- Peng, J., Wang, Y., Wu, J., Yue, J., Zhang, Y., & Li, W. (2006). Ecological effects associated with land-use change in China's southwest agricultural landscape. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 13(4), 315–325. <https://doi.org/10.1080/13504500609469683>
- Pérez Álvarez, S., Ávila Quezada, G., & Coto Arbelo, O. (2015). Revisión bibliográfica El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos Tropicales*, 36(2), 111–123. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19879.55200>
- Perroni, Y., García-Oliva, F., Tapia-Torres, Y., & Souza, V. (2014). Relationship between soil P fractions and microbial biomass in an oligotrophic grassland-desert scrub system. *Ecological Research*, 29(3), 463–472. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1138-1>

- Picone, L., & Zamuner, E. (2002). Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. *Informaciones Agronómicas del cono Sur*, 16(7620), 11–15. Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E8E2F139150F1B6D8525799C0058C6C3/\\$FILE/nota3.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/E8E2F139150F1B6D8525799C0058C6C3/$FILE/nota3.pdf)
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez-Sánchez, L. G., Morales-Manilla, L. M., Vilchis-Mata, I., Trujillo-Herrada, A., & Castelo-Agüero, D. del C. (2019a). Evaluación territorial para el cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) en la región del pico de Tancítaro, Michoacán, México. *Agrociencia*, 53(4), 487–503.
- Rapport, D. J., Costanza, R., & McMichael, A. J. (1998). Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology and Evolution*, 13(10), 397–402. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01449-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01449-9)
- RETAMA. (2017). RETAMA Revista Técnica de Medio Ambiente. Recuperado el 27 de octubre de 2020, de <https://www.retema.es/articulo/tecnicas-disponibles-para-recuperacion-de-nutrientes-a-partir-de-residuos-ddJQx>
- Rhoades, C. C., & Coleman, D. C. (1999). Nitrogen mineralization and nitrification following land conversion in montane Ecuador. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(10), 1347–1354. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00037-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00037-1)
- Riedemann, C. S., & Echánove Huacuja, F. (2003). Los pequeños productores de aguacate del Ejido y la Comunidad de San Francisco Peribán, Michoacán (México). *Cuadernos Geográficos*, 33, 133–149.
- Robinson, C. H. (2002). Controls on decomposition and soil nitrogen availability at high latitudes. *Plant and Soil*, 242(1), 65–81. <https://doi.org/10.1023/A:1019681606112>
- Rodríguez-Campos, J., Escobedo-Reyes, A., & Lugo-Melchor, O. Y. (2011). Inocuidad en Aguacate Resumen Introducción Producción de aguacate en México y el mercado de exportación, 165–186.
- Rodríguez-López, É. S., Cárdenas-Soriano, E., Hernández-Delgado, S., Gutiérrez-Diez, A., & Mayek-Pérez, N. (2013). Análisis de la infección de *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc. de frutos de aguacatero. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35(3), 898–905. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000300029>
- Roldán-Estrada, A., Aguirre-Paleo, S., Bárcenas-Ortega, A., Hernández-Tovar, I., Verduzco-Ortega, R., Pérez-Zavala, M., & Gutiérrez-Segovia, Y. (1999). Rescate de ecotipos criollos y silvestres de aguacate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 69–71.
- Ross, D. J., Tate, K. R., Scott, N. A., & Feltham, C. W. (1999). Land-use change: Effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(6), 803–813. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00180-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00180-1)
- Ruíz, F. J. F. (1999). Tópicos sobre agricultura orgánica. En *Consejo Nacional Regulador de Agricultura Orgánica* (p. 260). Universidad Autónoma de Chapingo.
- SADER, & CMDRS. (2019). Situación de las exportaciones de aguacate de Jalisco y Michoacán. Recuperado el 12 de noviembre de 2020, de <https://www.cmdrs.gob.mx/sites/default/files/cmdrs/sesion/2019/12/20/2644/materiales/aguacate-10-ordinaria-2019.pdf>
- SAGARPA, & SIAP. (2018). *Boletín mensual de la producción de Aguacate*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302238/Boletin_mensual_produccion_de_aguacate_enero_2018.pdf
- SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030 Aguacate Mexicano. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030* (Primera Ed). Ciudad de México: SAGARPA. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257067/Potencial-Aguacate.pdf>
- Salazar-García, S., González-Durán, I. J. L., & Tapia-Vargas, L. M. (2011). Influencia del clima, humedad del

- suelo y época de floración sobre la biomasa y composición nutrimental de frutos de aguacate ‘Hass’ en Michoacán, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(2), 183–194.
- Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E., & González-Valdivia, J. (2018). Phenology of “Méendez” avocado in Southern Jalisco, México. *Agrociencia*, 52(7), 991–1003.
- Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., López-Martínez, J. D., Vázquez-Vázquez, C., Serrato-Corona, J. S., Orona-Castillo, I., & Flores-Márgez, J. P. (2010). Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, (28), 381–390.
- Sánchez Colín, S., Mijares Oviedo, P., López-López, L., & Barrientos-Priego, A. F. (1998). Historia del aguacate en México. En *Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín 1998-2001* (pp. 171–187). Coatepec Harinas, México.
- Sánchez Colín, S., Mijares Oviedo, P., López-López, L., & Barrientos-Priego, A. F. (2001). Historia del aguacate en México. *Memoria 1998-2001. Fundación Salvador Sánchez Colín. CICTAMEX S. C.*, 171–187. Recuperado de http://www.avocadosource.com/journals/cictamex/cictamex_1998-2001/CICTAMEX_1998-2001_PG_171-187.pdf
- Sánchez-Saavedra, M. G., Cortez-Madrugal, H., & Ochoa-Estrada, S. (2012). Parasitismo de larvas de *Copturus aguacatae* (Coleoptera: Curculionidae) por *Heterorhabditis indica* (Rhabditida: Heterorhabditidae) en laboratorio. *Revista Colombiana de Entomología*, 38(2), 200–207.
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, Third Edition. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (Third Edit). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66291-2>
- SEMARNAP. (1998). Mapa de los suelos dominantes de la República Mexicana (Primera aproximación 1996) Escala 1:4000000, (México).
- SENASICA. (2021). Directorio de empresas con certificación vigente para comercializar plaguicidas agrícolas. Recuperado el 31 de enero de 2021, de <https://sistemasssl.senasica.gob.mx/WebMod/Publico.jsp?v=comerc>
- SIAP. (2018). Atlas Agroalimentario 2012-2018. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP)*, 1, 1–222. <https://doi.org/10.1111/resp.12002>
- SIAP. (2016). El oro verde del campo mexicano. Recuperado el 23 de mayo de 2020, de <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-cultivo-del-aguacate>
- SIAP. (2020). SIACON. SIAP. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., Scholes, M. C. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *SOIL Discussions*, 2(1), 537–586. <https://doi.org/10.5194/soild-2-537-2015>
- Stanford, L. (2002). Constructing “quality”: The political economy of standards in Mexico’s avocado industry. *Agriculture and Human Values*, 19(4), 293–310. <https://doi.org/10.1023/A:1021196219849>
- Stutter, M. I., Shand, C. A., George, T. S., Blackwell, M. S. A., Dixon, L., Bol, R., Haygarth, P. M. (2015). Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*, 257–258, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.020>
- Tamayo V., Á., Bernal E., J. A., & Díaz D., C. A. (2018). Composition and removal of nutrients by the harvested fruit of avocado cv. Hass in Antioquia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(2), 8511–8516. <https://doi.org/10.15446/rfna.v71n2.71929>
- Tapia Vargas, L. M., Larios Guzmán, A., Contreras, J. A., Vidales Fernández, I., & Barradas, V. L. (2012). Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 251–258.

- Tapia-Torres, Y. (2010). *Efecto del tipo de vegetación en la dinámica de nutrientes y en la estructura de las comunidades bacterianas del suelo en el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila (tesis de maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.
- Tapia-Torres, Y., & García-Oliva, F. (2013). La Disponibilidad del Fósforo es Producto de la Actividad Bacteriana en el Suelo en Ecosistemas Oligotróficos: una Revisión Crítica. *TERRA, Latinoamericana*, 31, 231–242.
- Tapia-Torres, Y., & Montiel, C. (2015). *Determinación de P microbiano por colorimetría utilizando el sistema reductor con ácido ascórbico y antimonio como catalizador*.
- Tapia Vargas, L. M., Coria Avalos, V. C., Viadeles Fernández, I., Larios Guzmán, A., & Vidales Fernández, J. A. (2015). Aguacate. En *Agenda Técnica Agrícola para Michoacán* (Segunda ed, pp. 17–25). México, D.F.: SAGARPA. Recuperado de https://issuu.com/senasica/docs/16_michoacan_2015_sin
- Tapia Vargas, L. M., Larios Guzmán, A., Contreras, J. A., Vidales Fernández, I., & Barradas, V. L. (2012). Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 28(3), 251–258.
- Tapia-Vargas, L. M., & Bravo Espinoza, M. (2009). Consumo de Agua. En J. Rentería Ánima & L. Reyes Muro (Eds.), *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán* (Primera Ed, p. 27). Uruapan, Michoacán: INIFAP.
- Tapia-Vargas, L. M., Larios-Guzmán, A., Hernández Pérez, A., & Gillén-Andrade, H. (2014). Nutrición orgánica del aguacate cv . “Hass” y efecto nutrimental y agronómico * Organic nutrition of avocado cv . “Hass” and nutritional and agronomic effect Resumen Introducción. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 463–472.
- Tasser, E., Tappeiner, U., & Cernusca, A. (2005). Ecological Effects of Land-use Changes in the European Alps. En U. M. Huber, H. K. M. Bugmann, & M. A. Reasoner (Eds.), *Global Change and Mountain Regions. Advances in Global Change Research* (pp. 409–420). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-x_41
- Templer, P. H., Groffman, P. M., Flecker, A. S., & Power, A. G. (2005). Land use change and soil nutrient transformations in the Los Haitises region of the Dominican Republic. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(2), 215–225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.031>
- Thiébaud, V. (2012). La libéralisation économique et la restructuration des territoires ruraux au Mexique : l’exemple de la culture de l’avocat dans l’État de Michoacán Economic Liberalization and the Restructuring of Rural Territories in Mexico: The Case of Avocado Cultivatio. *Cahiers de géographie du Québec*, 53(148), 63. <https://doi.org/10.7202/038142ar>
- Trujillo-Pahua, L., & Ibáñez-Bernal, S. (2019). New Geographical Records of Bat Flies (Diptera: Streblidae) Associated With Phyllostomid Bats (Chiroptera: Phyllostomidae) in the West Highlands of Mexico. *Journal of Medical Entomology*, 56(1), 18–28. <https://doi.org/10.1093/jme/tjy166>
- Valenzo-Jiménez, M., & Martínez, J. (2018). Evaluation of the differentiating factors in the avocado value chain (pp. 7–14).
- Valle-Guadarrama, S., Saucedo-Veloz, C., Peña-Valdivia, C. B., Corrales-García, J. J. E., Chávez-Franco, S. H., & Espinosa-Solares, T. (2002). Skin Permeance and Internal Gas Composition in ‘Hass’ Avocado (*Persea americana* Mill.) Fruits. *Food Science and Technology International*, 8(6), 365–373. <https://doi.org/10.1106/108201302031477>
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Vidales, F. J. A. (2007). *Memorias del Curso de Plagas y Enfermedades*. Morelos, México: FIRA Morelos.
- Vidales-Fernández. (2009). Contaminación por Agroquímicos. En J. Rentería Ánima & L. Reyes Muro (Eds.),

Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán (Primera Ed, pp. 45–46). Uruapan, Michoacán: INIFAP.

- Vidal-Zepeda, R. (1990). “Precipitación media anual” Escala 1:4000000. En *Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol II*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Villafán Vidales, K. B. (2006). *Competitividad, Reconversión Productiva y Mercado Internacional del aguacate orgánico Michoacano, 2004-2006* (tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Villanueva Tomas, L., & Arturo Zepeda Anaya, J. (2016). La Producción de Aguacate en el Estado de Michoacán y sus efectos en los índices de pobreza, el cambio del uso de suelo y la migración. *Revista Mexicana Sobre Desarrollo Local, 2(1)*, 1–12. Recuperado de <http://www.fao.org/statistics/es>
- Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma, 15(1)*, 1–19. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(76\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(76)90066-5)
- Wu, X., Liu, H., Fu, B., Wang, Q., Xu, M., Wang, H., Liu, G. (2017). Effects of land-use change and fertilization on N₂O and NO fluxes, the abundance of nitrifying and denitrifying microbial communities in a hilly red soil region of southern China. *Applied Soil Ecology, 120*, 111–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.004>
- Yee Wha, J. E., Fortis Hernández, M., & Salazar Sosa, E. (2003). Desarrollo humano para una agricultura orgánica. En E. Salazar Sosa, M. Fortis Hernández, A. Vázquez Alarcón, & C. Vázquez Vázquez (Eds.), *Agricultura Orgánica* (pp. 1–17). México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. & Facultad de Agricultura y Zootecnia, UJED.
- Yuan, Z., Jiang, S., Sheng, H., Liu, X., Hua, H., Liu, X., & Zhang, Y. (2018). Human Perturbation of the Global Phosphorus Cycle: Changes and Consequences. *Environmental Science and Technology, 52(5)*, 2438–2450. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03910>
- Zeller, V., Bahn, M., Aichner, M., & Tappeiner, U. (2000). Impact of land-use change on nitrogen mineralization in subalpine grasslands in the Southern Alps. *Biology and Fertility of Soils, 31(5)*, 441–448. <https://doi.org/10.1007/s003740000200>
- Zhang, H., Shi, L., Wen, D., & Yu, K. (2016). Soil potential labile but not occluded phosphorus forms increase with forest succession. *Biology and Fertility of Soils, 52(1)*, 41–51. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1053-9>