



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS C-V  
DES CIENCIAS AGROPECUARIAS**



**Evaluación de microorganismos de montaña en el agroecosistema maíz  
(*Zea mays* L.) de la región Frailesca, Chiapas**

**TESIS**

**que para obtener el grado de**

**MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL**

**presenta**

**PAULINA MACÍAS COUTIÑO PS1880**

**Director de tesis**

**DR. FRANCISCO GUEVARA HERNÁNDEZ**

**Codirector de tesis**

**DR. VÍCTOR MANUEL RUÍZ VALDIVIEZO**

**Tecnológico Nacional de México, *Campus* Tuxtla Gutiérrez**

**Villaflores, Chiapas; febrero de 2022**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS, CAMPUS V.  
DIRECCIÓN**



Villaflores, Chiapas  
08 de febrero de 2022  
Oficio N° D/0069/22

**C. PAULINA MACÍAS COUTIÑO**  
MAESTRANTE EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL  
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V  
P R E S E N T E.

En atención a que usted ha presentado los votos aprobatorios del Honorable Jurado designado para su evaluación de posgrado, de la tesis titulada: **“Evaluación de microorganismos de montaña en el agroecosistema maíz (*Zea mays* L.) de la región Frailesca, Chiapas”**, por este conducto le comunico que se le autoriza la impresión del documento, de acuerdo a los lineamientos vigentes de la Universidad.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
“POR LA CONCIENCIA DE LA UNIVERSIDAD DE SERVIR”



**M. C. CARLOS ALBERTO VELÁZQUEZ SANABRIA**  
ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN

C. c. p. Archivo

CAVS\*marh.



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

## CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Paulina Macías Coutiño,  
Autor (a) de la tesis bajo el título de “Evaluación de microorganismos de montaña en el agroecosistema maíz (Zea mays L.) de la región Frailesca, Chiapas”,  
presentada y aprobada en el año 2022 como requisito para obtener el título o grado de Maestra en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 24 días del mes de febrero del año 2022.

  
Paulina Macías Coutiño

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

## AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por otorgar la beca para culminar mis estudios de posgrado y al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas (ICTIECH) que aportó el financiamiento complementario recibido a través del proyecto “Uso de microorganismos benéficos en el agroecosistema maíz (*Zea mays* L.) de la Frailesca, Chiapas”.

Al Dr. Francisco Guevara Hernández por su confianza y su apoyo para fortalecer mis capacidades como investigadora y académica.

Al Dr. Víctor Manuel Ruíz Valdiviezo por su valiosa codirección, por recibirme en su equipo del Laboratorio de Biología Molecular y facilitar la gestión para realizar el análisis de secuenciación masiva indispensables para culminar este trabajo.

Al Dr. Manuel La O Arias y a la Dra. Mariela B. Reyes Sosa por su valiosa asesoría y contribuir en los análisis estadísticos.

A mi equipo de trabajo de campo, Helen y Daniel Castro, que contribuyeron ampliamente en este trabajo, desde las faldas del Nambiyuguá hasta los 1800 m.s.n.m. Gracias por compartir los aprendizajes y las alegrías debajo del sol o de la luna maciza que nos encontraba trabajando.

A Lissy Rosabal, por contagiarme su entusiasmo y por las incontables veces que me leyó y escuchó para enriquecer la investigación con sus valiosos aportes.

A todo el equipo del laboratorio de Biología Molecular (TecNM, Tuxtla Gtz.) por recibirme y aportar su experiencia, en especial, a mi amigo Wilbert Gtz. por toda su dedicación y paciencia conmigo. La excelencia de su trabajo los respalda.

A la Red de Estudios para el Desarrollo Rural, A. C., por compartir sus experiencias y su colaboración siempre.

A mis colegas de la 13va. generación, en especial, a mis amigas frailescanas haciendo ciencia y que me llenan de admiración.

Al profesor Adolfo, al Lic. Daniel y a don Octavio<sup>†</sup>, quienes admiro por su labor campesina, gracias por su participación activa en esta investigación y compartir sus saberes sobre la milpa.

A mi madre y a mi padre, mis amores. A Alessandra y a Luis, siempre conmigo.

A nuestra pequeña familia que construimos *cerca del nuevo fin*, gracias por estar.

# CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Hipótesis .....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1 El cultivo de maíz en la región Frailesca .....	3
2.2 El suelo en la actividad agrícola.....	4
2.3 Microorganismos del suelo .....	6
2.4 Consorcios microbianos.....	7
2.5 Biofertilizantes.....	7
2.6 Microorganismos de montaña (MM) .....	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1 Localización del área de estudio.....	11
3.1.1 Ubicación de sitios de estudio.....	11
.....	12
3.2 Preparación de los biofertilizantes.....	12
3.2.1 Colecta de microorganismos o fuente de inóculo.....	14
3.2.2 Reproducción de MM en estado sólido.....	14
3.2.3 Activación de MM en medio líquido .....	14
3.3 Caracterización físicoquímica de los MM .....	15
3.4 Análisis de secuenciación masiva de los consorcios microbianos.....	15
3.4.1 Extracción de ADN metagenómico.....	15
3.4.2 Secuenciación mediante Illumina MiSeq.....	16
3.4.3 Análisis bioinformático de librerías metagenómicas .....	17
3.5 Muestreo de suelos .....	17
3.6 Análisis físicoquímico de suelos.....	18
3.7 Establecimiento del experimento.....	18
3.8 Diseño experimental.....	18

3.9 Tratamientos evaluados .....	19
3.10 Tipificación de las parcelas por manejo agronómico .....	20
3.11 Variables evaluadas .....	21
3.11.1 Variables de crecimiento .....	21
3.11.2 Componentes de biomasa y rendimiento .....	21
3.12 Análisis estadístico.....	21
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>21</b>
4.1 Extracción de ADN y Variantes de Secuencias de Amplicones (ASVs) .....	22
4.2 Caracterización fisicoquímica de los microorganismos de montaña (MM) .....	27
4.3 Caracterización fisicoquímica de los suelos .....	27
4.3.1 pH del suelo .....	31
4.3.2 Clase textural.....	31
4.3.3 Densidad aparente .....	31
4.3.4 Materia orgánica .....	32
4.3.5 Fósforo.....	34
4.3.6 Capacidad de intercambio catiónico .....	34
4.3.7 Los cationes básicos (K, Ca, Mg) .....	35
4.3.8 Nitrógeno.....	35
4.4 Crecimiento y desarrollo vegetativo .....	37
4.4.1 Altura de planta .....	37
4.4.2 Diámetro de tallo.....	37
4.4.3 Área foliar .....	37
4.5 Componentes de biomasa.....	41
4.5.1 Biomasa fresca.....	41
4.5.2 Biomasa seca .....	43
4.6 Rendimiento de grano .....	46
4.7 Reflexiones finales.....	48
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>6. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>51</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>67</b>
7.1 Entrevistas semiestructuradas a productores.....	67

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos evaluados .....	19
Cuadro 2. Dosis de aplicación de los microorganismos de montaña (MM) .....	20
Cuadro 3. Concentración de las muestras por duplicado del ADN de los consorcios de microorganismos de montaña: MM <sub>1</sub> (La Sepultura), MM <sub>2</sub> (La Frailescana) y MM <sub>3</sub> (Nambiyugua). .....	22
Cuadro 4. Características físicoquímicas de los microorganismos de montaña (MM) a 30 días de activación .....	28
Cuadro 5. Propiedades físicoquímicas del suelo de las parcelas experimentales. ....	29
Cuadro 6. Altura (cm) de la planta de maíz .....	38
Cuadro 7. Diámetro de tallo (cm) de la planta de maíz.....	39
Cuadro 8. Área foliar (cm <sup>2</sup> ) de la planta de maíz .....	40
Cuadro 9. Peso de biomasa fresca a los 90 días después de siembra .....	42
Cuadro 10. Peso de biomasa seca a los 90 días después de siembra .....	44
Cuadro 11. Rendimiento del cultivo de maíz (t ha <sup>-1</sup> ) .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de los municipios de Villaflores y Villa Corzo, Chiapas. Fuente: Delgado-Ruiz <i>et al.</i> (2018).....	11
Figura 2. Ubicación de los sitios de estudio en los municipios de Villa Corzo y Villaflores, Chiapas. Fuente: elaboración propia. ....	12
Figura 3. Ubicación de los agroambientes para la obtención de inóculos: Reserva de la biósfera “La Sepultura” (REBISE), La Frailescana (APRN) y Cerro Nambiyuguá. Fuente: elaboración propia. ....	13
Figura 4. Microorganismos de montaña (MM) después de 30 días de activación: (de izquierda a derecha) MM <sub>1</sub> = La Frailescana; MM <sub>2</sub> = REBISE; MM <sub>3</sub> = Nambiyuguá; T = testigo. ....	15
Figura 5. Muestras por triplicado para la extracción de ADN: REBISE (S1, S2 y S3) correspondientes a MM <sub>1</sub> , La Frailescana (F1, F2 y F3) extraídos de MM <sub>2</sub> y del cerro Nambiyuguá (N1, N2 y N3) compuestas por MM <sub>3</sub> .....	16
Figura 6. Distribución de los tratamientos en campo de acuerdo al diseño experimental de cuadro latino. ....	19
Figura 7. Phylum de bacterias más abundantes determinado por el gen 16s ARNr entre los tratamientos MM <sub>1</sub> (La Sepultura), MM <sub>2</sub> (La Frailescana) y MM <sub>3</sub> (Nambiyuguá).....	23
Figura 8. Mapa de calor de agrupación de abundancia de los 20 géneros de bacterias más abundantes determinado por el gen 16s ARNr entre los tratamientos MM <sub>1</sub> (La Sepultura: S1, S2 y S3), MM <sub>2</sub> (La Frailescana: F1, F2 y F3) y MM <sub>3</sub> (Nambiyuguá: N1, N2 y N3). El valor de cada caja de color es la abundancia relativa de los ASVs. La parte superior representa el árbol de agrupación de los ASVs. Datos transformados log X+1. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 9. Índices de biodiversidad de los consorcios microbianos, donde MM <sub>1</sub> (La Sepultura: S1, S2 y S3), MM <sub>2</sub> (La Frailescana: F1, F2 y F3) y MM <sub>3</sub> (Nambiyuguá: N1, N2 y N3). ....	26
Figura 10. Análisis de escalamiento multidimensional y SIMPER (similaridad) de las propiedades fisicoquímicas del suelo correspondientes a los diferentes tipos de manejo agronómico con base en la distancia euclídeana. ....	30
Figura 11. Peso total de biomasa fresca (BF) en los diferentes sistemas de manejo (AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto) .....	43
Figura 12. Peso total de biomasa seca (BS) en los diferentes sistemas de manejo (AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto) .....	45



## RESUMEN

El agroecosistema maíz de la región Frailesca, Chiapas, tiende a la baja en su productividad como resultado de la intensificación por superficie de área cultivada para alcanzar altos rendimientos, lo que representa costos elevados para los productores locales y daños al ambiente, particularmente, la degradación fisicoquímica y biológica de los suelos. Ante ello, los microorganismos de montaña (MM) representan una propuesta agroecológica que aprovecha la interacción sinérgica de consorcios microbianos, como biofertilizantes, para incorporarlos a unidades de producción agrícola y dinamizar la transición hacia agroecosistemas sostenibles. La investigación se dividió en tres etapas, cuyo objetivo fue contribuir al estudio de los efectos del uso de los MM en el agroecosistema maíz de la región Frailesca, Chiapas. El estudio se realizó en los municipios de Villaflores y Villa Corzo en tres sistemas de producción tipificados por manejo agronómico: agroecológico (AG), convencional (CN) y mixto (MX). Primero, se realizó un análisis del gen 16s ARNr de tres consorcios microbianos (llamados MM) mediante secuenciación masiva por Illumina MiSeq y un análisis bioinformático para identificar la diversidad y estructura de los consorcios microbianos procedentes de tres ecosistemas de montaña. Estos se obtuvieron mediante la técnica de activación y reproducción de MM, y se identificaron como tratamientos: MM<sub>1</sub> (Área de Protección de Recursos Naturales “La Frailescana”), MM<sub>2</sub> (Reserva de la Biosfera “La Sepultura”) y MM<sub>3</sub> (Cerro Nambiyuguá, municipio de Villaflores). Como segunda etapa, se analizó el efecto de los tratamientos sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo a través de dos muestreos (antes y después del experimento). Finalmente, se evaluaron los efectos de los MM y un testigo sobre el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de maíz. Se usó un diseño experimental de Cuadro Latino 4x4 y se aplicaron los consorcios microbianos a los 15 y 35 días después de siembra (DDS) con las concentraciones de 50% (solución al 50% concentrado de MM + 50 % agua) y a los 60 DDS al 70% (solución al 70% concentrado de MM + 30 % agua). Se evaluó altura de planta, diámetro de tallo, área foliar, biomasa fresca y seca y rendimiento total. Dentro de los tratamientos de MM los filos predominantes fueron *Firmicutes*, *Proteobacterias* y *Bacteroidetes*. Entre los géneros con mayor abundancia destacaron: *Acetobacter* con una abundancia relativa entre 30-40% dentro del tratamiento MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub>, y *Lentilactobacillus* con una abundancia entre 30-90% en el tratamiento MM<sub>2</sub>; los cuales pueden estar asociadas a efectos positivos sobre el desarrollo del cultivo de maíz y el rendimiento agrícola. Los índices de diversidad de las comunidades bacterianas señalaron que MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> obtuvieron mayor diversidad que MM<sub>2</sub>. Los índices de diversidad para las comunidades bacterianas entre los diferentes tratamientos señalaron mayor diversidad en los tratamientos MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub>. Se encontró una mejora en el suelo respecto a algunas propiedades fisicoquímicas, sin embargo, se recomienda la evaluación en varios ciclos de cultivo para que estos niveles se consideren estables. Destacó el aumento de fósforo en el sistema AG y de materia orgánica en el sistema MX. Se obtuvieron diferencias significativas en altura de planta, diámetro de tallo e índice de área foliar del maíz, particularmente, en el sistema AG donde destacó el tratamiento MM<sub>3</sub>. Se reportaron valores significativos en la producción de biomasa fresca, particularmente, en el peso de tallo con los tratamientos MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> en los sistemas MX y CN. Se observó que MM<sub>1</sub> fue altamente significativo respecto al peso seco de hojas, tallo y mazorca en el sistema CN, con valores de 47.9, 112 y 195.7 g, respectivamente, y destacó el peso total por encima del testigo. En el rendimiento total, se observó una tendencia entre los consorcios que indica que los consorcios MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> tienen mejores efectos sobre el cultivo, particularmente, en el sistema AG con valores estadísticamente significativos de 8.69 y 9.06 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

En conclusión, los consorcios microbianos mejoraron el crecimiento y la producción de biomasa del cultivo de maíz, de los cuales MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> fueron los que obtuvieron los mayores efectos estadísticamente significativos entre los tratamientos, los cuales podrían adaptarse mejor a las condiciones de los sistemas de cultivo o compartir características similares con las poblaciones presentes en estos sistemas.

**Palabras claves:** maíz, microorganismos de montaña, metagenómica, crecimiento vegetal, rendimiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el grano más importante de México: forma parte de la identidad cultural y es un pilar en la dieta alimenticia de sus pobladores. Históricamente, la región Frailesca del estado de Chiapas, ha sido una de las principales zonas dedicadas a la producción de maíz en el estado y destaca con un rendimiento promedio de  $3.44 \text{ t ha}^{-1}$ , por encima de la media estatal de  $1.66 \text{ t ha}^{-1}$ . En el 2020 la Frailesca aportó 36, 528 toneladas de la producción total del estado, de los cuales, los municipios de Villaflores y Villa Corzo han aportado más del 40% de la producción (SIAP, 2020).

Sin embargo, el agroecosistema maíz de la región presenta una tendencia a la baja en su productividad, mientras que los altos rendimientos se deben, principalmente, a una intensificación por superficie de área cultivada. Martínez-Aguilar *et al.* (2021) reportaron que más del 90% de los productores de la Frailesca utilizan un manejo agronómico convencional que se caracteriza por la aplicación de insumos externos como los paquetes tecnológicos, los cuales incluyen semillas comerciales, agroquímicos y maquinaria pesada para realizar las labores culturales.

Las consecuencias sociales y ambientales de este alto uso de energía industrial representan, por un lado, entre el 15-35% de los costos totales de la producción; por otro lado, está asociado a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), así como a la creciente degradación fisicoquímica y biológica de los suelos (Guevara-Hernández *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2018).

Los suelos de la región Frailesca presentan un aumento de acidez del suelo por el uso indiscriminado de fertilizantes, particularmente, los nitrogenados; pérdida de nutrientes por lixiviación; aumento de toxicidad por concentración de elementos, como el aluminio; compactación, y alteración de las comunidades microbianas del suelo (Martínez-Aguilar *et al.* 2020). En este sentido, es importante el estudio de la diversidad y estructura de estas comunidades, las cuales determinan la funcionalidad de los ecosistemas y tienen un papel fundamental en los ciclos de nutrientes del suelo (Shao *et al.* 2019).

Por lo anterior, los microorganismos de montaña (MM) se identificaron como una alternativa agroecológica que pretende aprovechar la asociación benéfica e interacción sinérgica de diferentes especies de microorganismos como consorcios microbianos, los cuales son colectados y cultivados de sistemas edáficos poco perturbados, como los bosques, para incorporarlos a unidades de producción agrícola (Ney *et al.*, 2020; Castro-Barquero y González-Acuña, 2021). Para ello, es importante coleccionar inóculos provenientes de bosques cercanos a los sitios de producción agrícola adaptados a las condiciones de la zona (Castro *et al.*, 2015).

Los MM, al ser elaborados a partir de insumos locales, representan una tecnología de bajo costo y su uso varía para diferentes sistemas productivos. Ante ello, es necesario contribuir al conocimiento de los efectos del uso de los MM en el agroecosistema maíz para dinamizar la transición hacia sistemas de producción sostenibles (Altieri y Nicholls, 2007).

### **1.1 Objetivo general**

Contribuir al estudio de los efectos del uso de microorganismos de montaña en el agroecosistema maíz de la región Frailesca, Chiapas.

- a) Identificar la diversidad y estructura de los consorcios microbianos procedentes de tres ecosistemas de montaña.
- b) Analizar el efecto de los consorcios microbianos sobre las propiedades físicoquímicas del suelo.
- c) Evaluar los efectos de los consorcios microbianos sobre el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de maíz.

### **1.2 Hipótesis**

- a) Al menos un consorcio microbiano mejora las propiedades físicoquímicas de los suelos cultivados.
- b) Mediante la evaluación del potencial de los microorganismos de montaña al menos un consorcio microbiano tiene efectos positivos en los parámetros de crecimiento y rendimiento del maíz.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El cultivo de maíz en la región Frailesca

El maíz (*Zea mays* L.) es el grano más importante de México, es una de las especies más cultivadas y con mayor distribución en el país debido a que es la base de la alimentación mexicana y se vincula con la cosmovisión de los pueblos originarios (D'Alessandro y González, 2017).

En el territorio chiapaneco, se encuentra una gran cuenca que atraviesa el río Grijalva entre las montañas de la Sierra Madre de Chiapas al sur y las Montañas Centrales al norte, conocida como Depresión Central, y es ahí donde se localizan los municipios de Villaflores y Villa Corzo (León *et al.*, 2004). Cuando el territorio formaba parte del señorío chiapaneca en tiempos prehispánicos, la región se caracterizaba por sus suelos fértiles e irrigados, razón por la cual se mantuvo en disputa hasta el asentamiento de los frailes dominicos durante la época de la colonia. En este proceso de construcción socioterritorial la región adquirió el nombre de “la Frailesca”, derivado de la presencia económica y religiosa de los dominicos, así como una cultura productiva centrada en el maíz.

Desde entonces se desarrolló una importante economía agropecuaria en la región y con la llegada de la Revolución Verde los campesinos chiapanecos, productores de granos básicos, comenzaron a tecnificar la producción agrícola a través de créditos gubernamentales, lo que elevó considerablemente el rendimiento de granos (Camacho, 2008). De ahí que la Frailesca fue reconocida nacionalmente como el “granero de Chiapas” e, incluso, el “tercer granero de México” (Molinari, 2012). Actualmente, aún con el neoliberalismo, el maíz no ha dejado de formar parte de la vida y cultura campesina (León *et al.*, 2004; González, 2016).

A pesar de tener una producción importante a nivel nacional y estatal, los productores de la Frailesca no pueden competir con las grandes transnacionales como Estados Unidos. Esta crisis rural, sobre todo a partir del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), ha afectado en los sistemas productivos más importantes (Villafuerte-Solis, 2015). La especialización regional en el cultivo de maíz hace dependientes a los campesinos de su comercialización, de tal manera que la crisis ha reducido la producción básicamente para auto consumo (Molinari, 2012).

En el cultivo del maíz se observa una disminución en los rendimientos y volúmenes de producción como resultado de la combinación de varios factores, entre ellos la eliminación de los precios de garantía y el incremento en las cuotas de importación. Como parte de esta problemática los productores se ven afectados por la descapitalización y el aumento de la pobreza (León *et al.* 2004).

Sin embargo, las estadísticas nacionales reflejan que, durante el 2018, el 82% de la superficie cultivable de Chiapas se aprovechó para la siembra de maíz con una producción de 1 081 114 t, mientras que la Frailesca se posicionó en el segundo lugar de producción con 193 381.5 t, de las cuales, Villaflores aportó el 34% de la producción. Además, esta región destaca con un rendimiento promedio de maíz de 3.44 t ha<sup>-1</sup>, por encima de la media estatal que corresponde a 1.66 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2020).

Para alcanzar estos rendimientos se emplea un alto consumo de energía industrial y recursos no renovables, los productores de maíz optan por la aplicación de insumos externos y tecnologías asociadas al manejo agronómico convencional (Martínez-Aguilar *et al.*, 2021) con el fin de obtener mejores resultados, como semillas mejoradas, el uso indiscriminado de fertilizantes y la maquinaria pesada para las labores del campo (Guevara *et al.*, 2018). Los insumos agroquímicos y el pago de obra externa que se asocia a estas tecnologías, son los conceptos de costos que mayor afectan a los sistemas de producción de maíz (Guevara *et al.*, 2015).

Aguilar (2010), reportó que el 88% de los productores de maíz aplica fertilizantes y 76% usa insecticidas y herbicidas, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y, a largo plazo, la pérdida de la fertilidad del suelo que conduce a la baja capacidad productiva del agroecosistema (Martínez *et al.*, 2021).

En este sentido, el agroecosistema maíz de la Frailesca representa una importante actividad económica a través de diferentes factores tecnológicos y socioeconómicos. Al respecto, Martínez *et al.* (2021) identificaron tres grandes grupos de sistemas de manejo en la Frailesca: convencional, agroecológico y mixto. Es decir, desde aquellos que promueven los ciclos agroecológicos de regeneración-regulación (Altieri, 2002) hasta los centrados en el productivismo que fomentan un proceso lineal y extractivo. La identificación de estos tres tipos de manejo nos ayudará a crear estrategias efectivas para sus condiciones particulares ante el panorama actual de la baja productividad de los sistemas de producción de maíz.

## **2.2 El suelo en la actividad agrícola**

El suelo es un recurso natural no renovable que alberga una extensa biodiversidad y forma parte esencial del funcionamiento de los ecosistemas. La errónea suposición de considerar al suelo como un recurso renovable lo coloca lejos de las prioridades en materia de políticas públicas debido a que no se considera un bien directamente consumible (SEMARNAT, 2021). Se estima que se necesitan 100 años para formar una capa de suelo de 1 cm de espesor (Guevara *et al.*, 2012). De acuerdo con la FAO<sup>1</sup> (2021), la degradación del suelo se refiere a

---

<sup>1</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

un cambio en su salud lo que resulta en una baja capacidad del ecosistema para producir los servicios ecosistémicos que brinda normalmente.

En la región Frailesca los suelos presentan una naturaleza ácida por el tipo de material parental; dicha propiedad tiende a aumentar ante la poca disponibilidad de materia orgánica y la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) que influye en el pH de los suelos cultivables, los cuales se someten al uso indiscriminado de fertilizantes, en particular, los amoniacales (López *et al.*, 2019).

Los cambios en las prácticas tradicionales de cultivo y el uso excesivo de agroquímicos han provocado una creciente degradación física, química y biológica de los suelos de la Frailesca. En cultivos de maíz de los Altos de Chiapas, Álvarez y Anzueto (2004) encontraron que la baja actividad microbiana del suelo se relaciona con la pérdida de las reservas orgánicas, el aumento de acidez y la disminución de cationes básicos del suelo. Además, los resultados demostraron una correlación positiva entre el número de bacterias y de actinomicetos con el porcentaje de arcillas y con el magnesio (Mg) intercambiable.

Al respecto, Martínez-Aguilar *et al.* (2020) observaron que los sistemas convencionales, mixtos y agroecológicos del agroecosistema maíz presentan suelos con un pH promedio de 5.18, así como bajos contenidos de materia orgánica. Además, demostraron que el sistema convencional presenta menor abundancia y diversidad microbiana en comparación con el sistema agroecológico.

Los estudios indican que la degradación de los suelos en la Frailesca está relacionada con las prácticas antropogénicas poco sostenibles que conlleva el sistema de producción de maíz. Sin embargo, las prácticas agroecológicas como la rotación de cultivos, la incorporación de residuos de materia orgánica, entre otros, pueden ayudar a recuperar la vida microbiana del suelo y, a su vez, los procesos ecológicos que fomentan la interacción de la planta, el suelo y los microorganismos para mejorar la fertilidad del suelo (Altieri y Nicholls, 2007). Los suelos fértiles y resilientes constituyen el primer paso para la transición a agroecosistemas sostenibles (Blanco-Canqui y Francis, 2016).

Así mismo, la degradación de los suelos es uno de los mayores retos que enfrenta el sector agrícola a nivel nacional (Etchevers *et al.*, 2016), ya que representa una limitación para lograr la seguridad alimentaria, lo que aumenta las condiciones de pobreza y el abandono del campo por migración o falta de interés. En 2012, 48.6% de las unidades de producción agrícola presentaron que la pérdida de fertilidad de los suelos es el principal problema para el desarrollo de actividades agropecuarias (INEGI<sup>2</sup>, 2012). Lo anterior, puede ser una de las causas del

---

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

abandono de 1.4 millones de unidades de producción agropecuarias en el país, entre 1991 y 2007 (Cotler-Ávalos y Cuevas-Fernández, 2017).

Resulta pertinente diseñar sistemas bajo un enfoque de agricultura regenerativa y sostenible en el tiempo, es decir, que conserve el potencial de los recursos naturales sin degradarlos, que reduzca los costos de producción y se abran nuevas oportunidades laborales con diversas fuentes de ingreso para los pequeños productores.

### **2.3 Microorganismos del suelo**

La investigación sobre los microorganismos ha cobrado mayor interés para contribuir a la seguridad alimentaria, mitigar el cambio climático y contrarrestar los daños ambientales (Kumar y Verma, 2018) provocados por las prácticas del agroextractivismo, que persigue a la naturaleza como un conjunto de reservas disponibles, y en este contexto, la palabra que se antepone como verdad es la productividad (Dussel, 2011).

Los microorganismos son seres unicelulares microscópicos, pertenecientes a la vida más primitiva del planeta y forman parte de todos los sistemas vivos que conforman la vida del planeta; aquellos presentes en el suelo tienen un papel fundamental en la sostenibilidad de los agroecosistemas (Chaparro *et al.*, 2012). La vida microbiana edáfica es responsable de regular ciclos biogeoquímicos que crean las condiciones necesarias para que las plantas crezcan saludables y tengan nutrientes disponibles todo el tiempo (Bonilla *et al.*, 2002). Bajo el enfoque agroecológico, se pueden aprovechar para restaurar el equilibrio ecológico de los suelos y dinamizar la transición hacia sistemas más sostenibles (Altieri y Nicholls, 2007).

Una microbiota saludable en el suelo es de importancia crítica para los procesos biogeoquímicos, incluyendo la formación del suelo, su fertilidad y el almacenamiento de carbono (Larsbrink *et al.*, 2019). El reciclaje de materia orgánica en el suelo debido, en gran parte, a la respiración microbiana, es vital para el ciclo del carbono y a la biodiversidad aérea de los macroorganismos (Bargett y van der Putten, 2014).

Los microbios que conforman la rizósfera, es decir, el área alrededor de las raíces de las plantas, aprovechan las excreciones radiculares de la planta, polímeros compuestos de carbono (aminoácidos, azúcares, hormonas, vitaminas, ácidos orgánicos, etc.), como una fuente de energía. En una forma de simbiosis, los microorganismos comparten antibióticos a las plantas contra patógenos, esto sucede como un mecanismo de defensa ante organismos antagónicos para proteger su espacio vital en la rizósfera donde encuentran las condiciones vitales para obtener sus alimentos; entre más nutrición, más microbiota y más defensa ante patógenos (Ferrera y Alarcón, 2001). Por ejemplo, las micorrizas arbusculares que colonizan las raíces de las plantas forman una extensa red de micelio en el suelo y mejoran la capacidad vegetal para aprovechar el agua y los nutrimentos (Smith y Read, 2008).



Otro ejemplo de la asociación planta-microorganismo con grandes aportes a la agricultura es la que tiene lugar entre las leguminosas y las bacterias fijadoras de nitrógeno (*Azospirillum*, *Derxia*, *Pseudomonas*, *Beijerenckia*, *Azotobacter*, *Entherobacter*, etc.). Por acción de las bacterias, dentro de las raíces se forman nódulos donde se lleva a cabo el proceso de la fijación de N. La planta le otorga los carbohidratos necesarios a las bacterias que habitan los nódulos radiculares y las bacterias fijan nitrógeno para las plantas (Brock, 2015).

Por ello, estos organismos son importantes para el estudio de la fertilidad de los suelos; los mecanismos que desempeñan para metabolizar sus alimentos tienen un uso potencial para el aprovechamiento en el sector agrícola. Entre las funciones metabólicas de interés destacan la fijación de nitrógeno (N); la solubilización de nutrientes poco disponibles para las plantas, como el fósforo (P); la producción de hormonas reguladoras del crecimiento para las plantas, entre otros (Pandey y Yarzabal, 2019).

## **2.4 Consorcios microbianos**

Un consorcio microbiano es una asociación natural, de dos o más poblaciones microbianas de diferentes especies, que actúan conjuntamente como una comunidad dentro de un sistema complejo en una simbiosis estrecha, es decir, todos los miembros son beneficiados (Brock, 2015). La asociación refleja estilos de vida sinérgicos donde el crecimiento y el flujo cíclico de nutrientes es más efectiva que en poblaciones individuales (Ochoa-Carreño y Montoya-Restrepo, 2010).

Los consorcios microbianos mantienen la compatibilidad metabólica y ecológica toda vez que las transformaciones ambientales que se generen permitan que ellos coexistan cercanamente. Así mismo, la vida en asociación puede generar mayor resistencia a las fluctuaciones del ambiente y promover la estabilidad de todos los componentes.

## **2.5 Biofertilizantes**

Vassey (2003) definió el término de biofertilizante como “una sustancia que contiene microorganismos vivos que, cuando se aplica a las semillas, a la superficie de las plantas o al suelo, coloniza la rizósfera o el interior de la planta y estimula el crecimiento al incrementar la distribución o disponibilidad de nutrientes esenciales a la planta hospedadora”. Los consorcios de MM usados en el presente trabajo se adaptan a esta definición por lo que, en adelante, para términos prácticos se puede hacer referencia a los MM como consorcios microbianos o biofertilizantes.

Por otro lado, el desarrollo de las plantas está controlado por varios factores, como la solución del suelo y el contenido de nutrientes. La aplicación de fertilizantes inorgánicos junto con genotipos mejorados de plantas ha incrementado el rendimiento de los cultivos. Por ejemplo,

bacterias del género *Bacillus* pueden influir positivamente en el peso de grano de soya y aumentar significativamente la productividad del maíz (Alves *et al.*, 2021).

Sin embargo, los altos rendimientos en maíz exigen alta demanda de insumos químicos, en su mayoría N, P y potasio (K). El uso indiscriminado del N inorgánico, por ejemplo, puede llevar a la acidificación del suelo y a la eutrofización de los ríos a mantos acuíferos por la lixiviación del  $\text{NO}_3^-$ , el producto final del proceso de nitrificación (Khan y Mohammad, 2014).

El N inorgánico en el suelo contribuye a la emisión de uno de los más potentes GEI, el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). En la nitrificación, el  $\text{NH}_4^+$  se oxida en el suelo bajo condiciones aerobias a  $\text{NO}_2^-$  y luego a  $\text{NO}_3^-$ . Por ello, el  $\text{N}_2\text{O}$  es producido y en condiciones anaeróbicas el  $\text{NO}_3^-$  puede ser reducido a  $\text{N}_2\text{O}$  y/o  $\text{N}_2$  (Kuypers, Marchant y Kartal, 2018).

Los biofertilizantes pueden reducir el empleo excesivo de fertilizantes químicos (Velasco *et al.*, 2001; Alarcón *et al.*, 2002). Estos pueden conformarse de microbios promotores del crecimiento vegetal para aumentar el desarrollo vegetativo y el rendimiento agrícola (González y Fuentes, 2017). Además, el estudio de las comunidades microbianas ha contribuido a descubrir los efectos potenciales en la biorremediación de suelos y otros ecosistemas, como el agua, afectados por contaminantes residuales. De esta manera se puede incidir de manera positiva en la fertilidad del suelo desde la acción de los microorganismos para mineralizar nutrientes mediante la secreción de enzimas y ácidos orgánicos (Nadeem *et al.*, 2013), así como la síntesis de hormonas reguladoras de crecimiento.

De forma indirecta, el uso de biofertilizantes puede aumentar la calidad de los frutos obtenidos; al estar disponibles los nutrientes en cantidades suficientes, en el momento que la planta lo necesita, las propiedades organolépticas pueden mejorar e incrementar el rendimiento de los frutos. La disponibilidad de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), por ejemplo, permite que las cáscaras tengan mayor resistencia en la etapa de madurez, y la presencia de K se refleja en más aporte de carbohidratos a las hojas, es decir, en un aumento de la producción (Jiménez-Gómez *et al.*, 2017). Así también, estudios han reportado un mayor contenido nutricional en los frutos, como el aumento de antioxidantes, vitaminas y minerales (Dursun *et al.*, 2010; Yildirim *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2014).

El uso de ciertos microbios debe contemplar su factibilidad: el potencial benéfico, las condiciones del sitio donde se aplica, el tipo de cultivo y la competencia ante microorganismos nativos. El aislamiento de microorganismos, la detección de características deseables, la selección de cepas eficientes para la aplicación en campo, y la producción de inóculos en formulaciones adecuadas son algunos de los pasos importantes para el desarrollo sustentable de la tecnología (Pandey y Yarzabal, 2019).

El uso de los biofertilizantes conlleva un conocimiento amplio de la biología de la planta y de los microorganismos, así como de los factores ambientales y aspectos económicos de su

aplicación. Un estudio realizado en montañas de clima frío utilizó dos inoculantes de bacterias (*Azotobacter chroococcum* y *Azospirillum brasilense*), aislados originalmente de regiones más calientes. El resultado fue que los inoculantes, efectivos en mayores temperaturas, no tuvieron buen desempeño aplicado a regiones alpinas de menor temperatura (Pankaj *et al.*, 2012). Esto comprueba que una determinada cepa de microorganismos puede funcionar de manera diferente dependiendo de factores como las especies de plantas y cultivares, las características del suelo, las condiciones climáticas, la depredación por otros microorganismos y la competencia con microorganismos nativos mejor adaptados (Saharan y Nehra, 2011).

El fracaso de muchos ensayos se ha atribuido a las bajas tasas de supervivencia de microbios exógenos cuando se aplican a suelos de otras localidades. La selección de los microorganismos a utilizar, así como las condiciones del sitio es un elemento determinante en el éxito del uso de microorganismos alóctonos (Ferrera y Alarcón, 2001).

Los microorganismos usados en los biofertilizantes deben ser prospectados, aislados e identificados a partir de comunidades microbianas que colonizan naturalmente el ambiente específico donde serán utilizados (Velázquez *et al.*, 2016). Los experimentos basados en campo son esenciales para confirmar el potencial real de los recursos microbianos del suelo (Pandey y Yarzabal, 2019).

Si la sustentabilidad es el verdadero objetivo, es preferible implementar prácticas culturales para favorecer el aumento de la actividad microbiana autóctona de un sitio (Ferrera y Alarcón, 2001). En los sitios de alto grado de perturbación por erosión o contaminantes residuales, los inoculantes microbianos resultan ser una tecnología alternativa con potencial para la recuperación de los suelos a largo plazo.

## **2.6 Microorganismos de montaña (MM)**

Los suelos de montaña son yacimientos ricos de biodiversidad y suministran servicios ecosistémicos, por lo que ha aumentado el interés en el estudio de estos ecosistemas (Tewari *et al.*, 2017). En estos depósitos de diversidad microbiana, se pueden encontrar degradadores de materia orgánica, recicladores de nutrientes, fijadores de nitrógeno, micorrizas arbusculares, entre otros grupos funcionales con usos potenciales en la agricultura.

Se puede nombrar a los microorganismos de montaña (MM) como una solución concentrada de consorcios microbianos que son colectados y cultivados de suelos de bosques poco perturbados cerca de los sitios de producción agrícola, u otros sistemas productivos (Chiari, 2015), donde son elaborados y aplicados como bioles o biofermentos (Umaña *et al.*, 2017). Los MM, también llamados microorganismos eficientes locales (Ney *et al.*, 2020.), provienen de una adaptación, a manera artesanal, de la tecnología creada por Teruo Higa en la década de 1970 quien aisló microorganismos benéficos del suelo para reemplazar el uso de

fertilizantes sintéticos (Higa y Wididana, 1991), los cuales se comercializaron con el nombre de “microorganismos eficientes” (EM, por sus siglas en inglés). De acuerdo con Higa y Parr (1994), los EM contienen organismos que interaccionan benéfica y sinérgicamente como bacterias ácido lácticas (BAL), levaduras y bacterias fototróficas (Higa, 2000).

Los MM se constituyen de hongos, actinomicetos y bacterias con la capacidad de producir compuestos más sencillos, a partir de estos polímeros, para la disponibilidad de un grupo más extenso de organismos del suelo. Daly y Stewart (1999) encontraron que 1 mL de concentrado de EM contiene un mínimo de  $10^5$  organismos viables de especies, incluyendo *Streptomyces*, *Streptococcus*, *Propionibacterium*, entre otros, y un número no especificado de *Lactobacillus* sp., *Rhodopseudomonas* sp. y *Streptomyces griseus*. Algunos estudios han encontrado que los EM tienen potencial para aumentar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos por su capacidad para mejorar la fotosíntesis; producir sustancias bioactivas, como hormonas y enzimas; controlar enfermedades del suelo y acelerar la descomposición de materiales de lignina en el suelo (Daly y Stewart, 1999; Formowitz *et al.*, 2007; Javaid *et al.*, 2008). También se ha documentado que la aplicación de estos consorcios puede incrementar la eficiencia de la toma y el aprovechamiento de nutrientes (Khaliq *et al.*, 2006; Bajwa, 2011).

Con el tiempo, se comenzó a promover la técnica artesanal de los MM a pequeños productores a través de la extracción de suelo y hojarasca de suelos de montaña, en áreas con baja perturbación, seguido de un proceso de fermentación con recursos locales para la reproducción de los microorganismos.

Estos microorganismos están libres de manipulación genética y pueden ser encontrados en los ecosistemas naturales de montaña, donde abundan los microorganismos saprófitos que degradan rápidamente la materia orgánica, haciendo disponible los nutrientes que la conforman. Entre los usuarios de esta tecnología se acepta que la mejor fuente de inóculo son los bosques cercanos a los sitios de producción agrícola, ya que presentan microorganismos adaptados a las condiciones de la zona (Castro *et al.*, 2015).

Campos-Martínez *et al.* (2014) señalaron que la aplicación de MM en el suelo influyó en algunas propiedades, como el incremento de la materia orgánica, el pH y el contenido de N y K. Acosta (2011) demostró un gran potencial para aplicaciones foliares de MM en tomate, y supone que al usar cepas de MM nativas de una localización geográfica cercana a la zona de cultivo se obtienen mejores resultados.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización del área de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en los municipios de Villa Corzo y Villaflores de la región Frailesca, Chiapas (Figura 1). El clima que predomina es cálido subhúmedo (lluvias en verano) ( $Aw_1$ ) (w) (i') g, con precipitación pluvial media anual de 1 200 mm, distribuidos en los meses de mayo a noviembre, con una temperatura promedio de 22 °C y una altitud media de 591 msnm (INEGI, 2013).

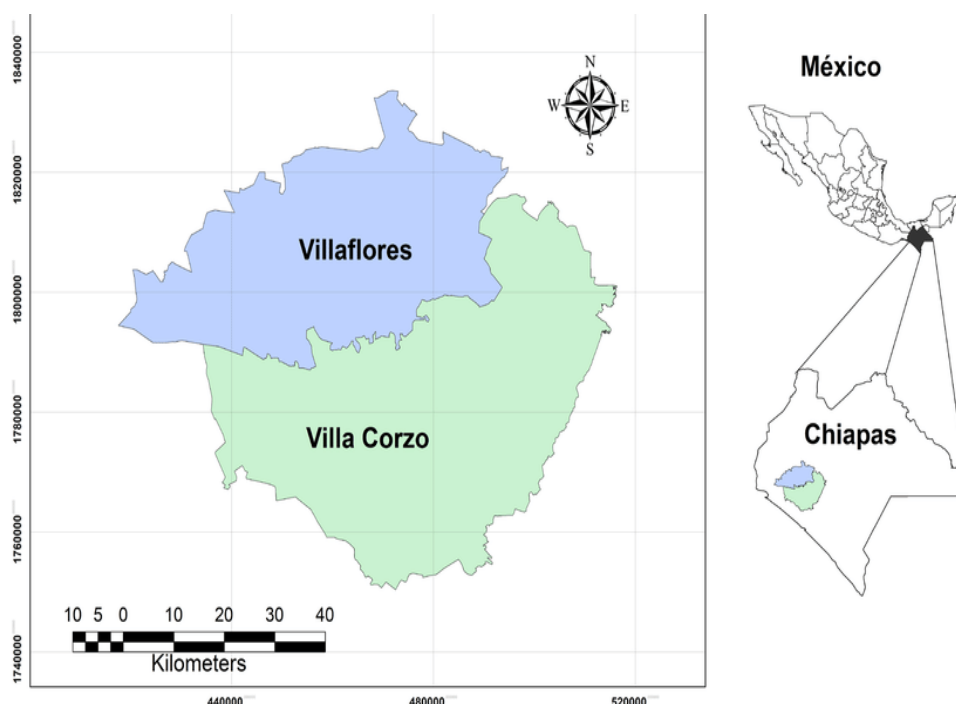


Figura 1. Localización geográfica de los municipios de Villaflores y Villa Corzo, Chiapas.  
Fuente: Delgado-Ruiz *et al.* (2018)

##### 3.1.1 Ubicación de sitios de estudio

Se seleccionaron tres sitios de estudio (Figura 2) con base en su representatividad por tipo de manejo agronómico propuesto por Martínez-Aguilar *et al.* (2021): agroecológico (AG), convencional (CN) y mixto (MX).

En Villaflores se establecieron dos parcelas, una correspondiente al manejo AG que se localizó en la ranchería San Joseíto Alcaparrosa, en el predio “Solo Dios”, entre 16°17'5.55" latitud Norte y 93°16'1.96" longitud Oeste y se ubica a 587 m.s.n.m., propiedad del Lic. Daniel López González. La segunda parcela, asociada al manejo MX, se ubicó en el ejido Calzada Larga

entre 16°20'28.77" de latitud Norte y 93°19'5.62" de longitud Oeste a 709 m.s.n.m., propiedad del señor Octavio Cruz Martínez<sup>†</sup>.

En Villa Corzo se ubicó el sistema CN en el km 7.7 carretera Villa Corzo-Villaflores entre 16°12'43.12" de latitud Norte y 93°15'51.36" de longitud Oeste a 567 m.s.n.m., propiedad del maestro Adolfo Arroyo Vila.

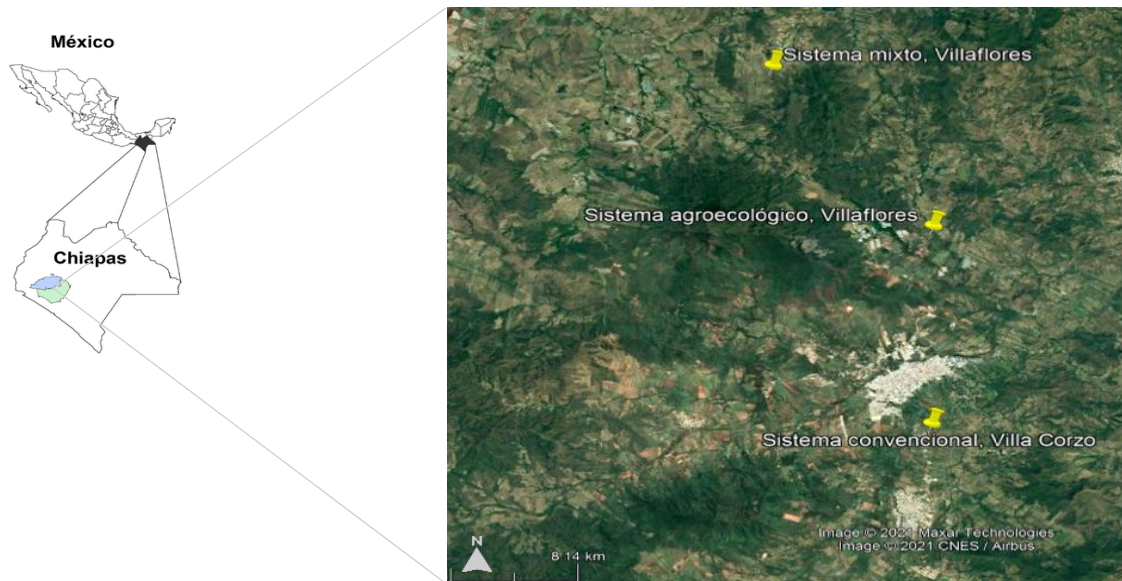


Figura 2. Ubicación de los sitios de estudio en los municipios de Villa Corzo y Villaflores, Chiapas. Fuente: elaboración propia.

### 3.2 Preparación de los biofertilizantes

Los consorcios de microorganismos utilizados como biofertilizantes en este experimento se prepararon bajo la adaptación de la técnica de Suchini Ramírez (2012) de reproducción y activación de MM con el uso de recursos locales disponibles.

Con base en lo propuesto por Castro *et al.* (2015), quienes señalaron que las mejores fuentes de inóculo son los sitios cercanos a las unidades de producción agrícola, se seleccionaron tres montañas (Figura 3) dentro de la Frailesca para la obtención de los inóculos de MM: las áreas núcleo del Área de Protección de Recursos Naturales (APRN) “La Frailesca”, el Cerro “Nambiyugua<sup>3</sup>” y la Reserva de la Biósfera “La Sepultura” (REBISE), que por su estado de conservación presentan escasa actividad antropogénica. Estas áreas se encuentran ubicadas en los municipios de Villaflores y Villa Corzo; las áreas forman parte de un corredor biológico

<sup>3</sup> Vocablo en lengua chiapaneca. Se compone de las palabras *nambi*-mono y *nyhouhuá*-brujo (Aguilar Penagos, 2012: 723). La pronunciación ha cambiado en algunos ejidos del municipio, pasando desde Nambiyugua hasta Nambiyigua debido a la confusión en la articulación de la palabra.

natural constituido por las Áreas Naturales Protegidas federales el Ocote, La Sepultura, el Triunfo y la Encrucijada (SEMARNAT, 2019).

### a) Caracterización fisiográfica de las montañas

Se realizó la caracterización de estas montañas a través de métodos etnográficos como la observación directa en campo, documentación con fotografías y exploración (Borgnia *et al.*, 2006).

El área de colecta de la RESIBE se encuentra en el ejido “Villahermosa II”, Villaflores, entre 16°14'30.2" latitud Norte y 93°36'56.2" latitud Oeste. Este sitio se caracteriza por el bosque mesófilo de montaña donde predominan árboles en diferentes estratos, con abundancia de helechos y epífitas. En los puntos de muestreo se registró una altura promedio de 1608 m. s. n. m. y una temperatura media de 26.3 °C con 58.5% de humedad relativa.

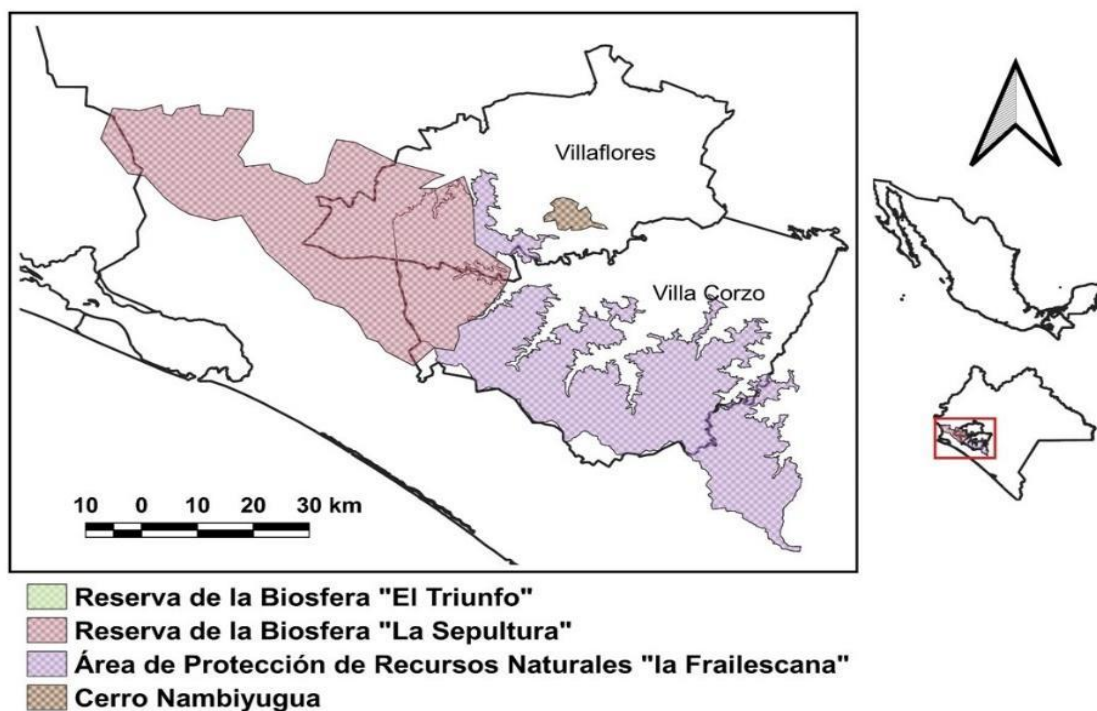


Figura 3. Ubicación de los agroambientes para la obtención de inóculos: Reserva de la biósfera “La Sepultura” (REBISE), La Frailescana (APRN) y Cerro Nambiyugua. Fuente: elaboración propia.

El sitio de muestreo en el APRN “La Frailescana” se ubica en el ejido Juan Sabines en Villa Corzo. La colecta de hojarasca se realizó en el ecosistema de bosque mesófilo de montaña caracterizada por una vegetación compuesta principalmente de palmas, epífitas, encinos

(*Quercus skinneri*, *Quercus peduncularis*), palo de víbora, helecho arborescente (*Cyathea fulva*), palma camedora (*Chamaedorea quezalteca*) y cícada (*Ceratozamia mirandae*). La fauna se compone de reptiles como garrobo (*Ctenosaura similis*), boa (*Boa constrictor*), culebra real coralillo (*Lampropeltis triangulum*); mamíferos como el jaguar (*Panthera onca*), tapir (*Tapirus bairdii*), y aves residentes y migratorias como pavón (*Oreophasis derbianus*), pajuil (*Penelopina nigra*), entre otros. En este sitio se registró una altitud que oscila en los 1845 m. s. n. m. y una temperatura media de 22 °C con 62.7% de humedad relativa.

Los puntos de muestreo correspondientes al cerro Nambiyugá se ubicaron a 630 m. s.n. m. a 16° 16' 34" N y 93° 17' 07" latitud oeste. De acuerdo con Cepeda *et al.* (2010) el cerro se encuentra dentro de la región florística Costa Pacífica y resguarda pino, encino y selva baja caducifolia. La vegetación varía debido a la existencia de dos tipos de climas diferentes conforme a la variación de altura: clima tropical con lluvia todo el año y clima tropical con lluvia de verano. Sin embargo, donde se realizó la colecta predomina el clima cálido subhúmedo con temporales en veranos, lo que favorece el desarrollo de la selva baja caducifolia.

### **3.2.1 Colecta de microorganismos o fuente de inóculo**

En abril de 2020 se levantó un muestreo por cinco de oros en las diferentes montañas y por cada sitio de muestreo se colectó una mezcla compuesta de mantillo (hojarasca en descomposición y suelo) a 0-10 cm de profundidad.

### **3.2.2 Reproducción de MM en estado sólido**

La técnica de reproducción se adaptó de acuerdo a los recursos locales disponibles para asegurar una fuente sólida de microorganismos que puedan ser activados posteriormente, en este sentido, se sustituyó el salvadillo de arroz por maíz molido.

Para ello se procedió a la elaboración de una mezcla de 25 kg de la muestra compuesta, 20 kg de melaza, 50 kg de maíz molido y agua al 60%, la cual se mantuvo en condiciones semiaeróbicas durante 30 días en contenedores herméticos de 200 L. Este procedimiento se realizó tres veces, en cada repetición se usó diferente fuente de hojarasca (inóculo microbiano); es decir, el material proveniente de las diferentes montañas para obtener tres productos sólidos.

### **3.2.3 Activación de MM en medio líquido**

La técnica de activación de MM se realizó al finalizar el proceso de reproducción de los MM, es decir, 30 días después de su reproducción semiaeróbica. Para ello, se colocó 20 kg de MM sólidos en un costal y se almacenó en un contenedor con 180 L de agua y 20 kg de melaza en un contenedor con capacidad de 200 L sellado herméticamente. Posterior a un periodo de 30 días se obtuvieron tres productos de MM líquidos o activados (biofertilizantes) por cada sitio



de muestreo (Figura 4), a partir de ahora llamados: MM<sub>1</sub> (REBISE), MM<sub>2</sub> (La Frailescana), MM<sub>3</sub> (Nambiyugua).



Figura 4. Microorganismos de montaña (MM) después de 30 días de activación: (de izquierda a derecha) MM<sub>1</sub> = La Frailescana; MM<sub>2</sub> = REBISE; MM<sub>3</sub> = Nambiyuguá; T = testigo.

### 3.3 Caracterización físicoquímica de los MM

Se tomaron 500 ml de muestra por cada MM en medio líquido elaborado (MM<sub>1</sub>, MM<sub>2</sub> y MM<sub>3</sub>), y se enviaron al laboratorio de análisis Fertilab ® en Celaya, Guanajuato. Se determinó pH (NMX-FF-109-SCFI-2007); materia orgánica, carbono orgánico y cenizas por calcinación; micro y macronutrientes por digestión en microondas (P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, B, S), humedad (método gravimétrico) y relación carbono nitrógeno (base seca).

### 3.4 Análisis de secuenciación masiva de los consorcios microbianos

#### 3.4.1 Extracción de ADN metagenómico

Se colectaron tres muestras con tres repeticiones de cada MM líquido (MM<sub>1</sub>, MM<sub>2</sub> y MM<sub>3</sub>), depositadas en tubos cónicos centrífuga Falcon™ de 50 ml, las cuales se transportaron inmediatamente al laboratorio de Biología Molecular del Tecnológico Nacional de México, *Campus* Tuxtla Gutiérrez, donde se almacenaron en un equipo de ultracongelación a -80 °C.

Estas muestras se nombraron de acuerdo a su material de origen (Figura 5): REBISE (S1, S2 y S3) correspondientes a MM<sub>1</sub>, La Frailescana (F1, F2 y F3) extraídos de MM<sub>2</sub> y del cerro

Nambiyuguá (N1, N2 y N3) compuestas por MM<sub>3</sub>. Posteriormente, se llevó a cabo la extracción del ADN metagenómico de las comunidades microbianas mediante el protocolo QIAGEN™, de la cual se obtuvo el ADN por duplicado, descritas en adelante como muestras X y Y.



Figura 5. Muestras por triplicado para la extracción de ADN: REBISE (S1, S2 y S3) correspondientes a MM<sub>1</sub>, La Frailescana (F1, F2 y F3) extraídos de MM<sub>2</sub> y del cerro Nambiyuguá (N1, N2 y N3) compuestas por MM<sub>3</sub>

Se analizó la pureza y concentración del ADN con *NanoDrop™ One* (ThermoFisher Scientific, Waltham, MA, EUA), esto con el fin de cumplir los requerimientos solicitados por el servicio de secuenciación masiva de *Illumina MiSeq*, cuyo volumen de concentración requerido debe ser entre 1-10 µg mL<sup>-1</sup>. A partir de este procedimiento, 2µL del ADN aislado se mezclaron con el gel *SYBR Safe DNA*, se procedió a realizar la electroforesis en 1% de gel agarosa y se visualizó mediante el UV *Transilluminator 2000* (BIO-RAD Laboratories Inc., CA, EUA).

El ADN extraído se almacenó a -20°C hasta su requerimiento para la amplificación del gen 16s ARNr por la reacción en cadena por polimerasa (PCR) con el fin de evaluar la presencia de inhibidores, como ácidos húmicos, de las enzimas implicadas en la secuenciación. Después de ejecutar la PCR, para la separación de ADN, se determinó que los amplicones (ASVs) fueron aptos para su secuenciación.

### 3.4.2 Secuenciación mediante Illumina MiSeq

El ADN total extraído de las muestras MM<sub>1</sub>, MM<sub>2</sub> y MM<sub>3</sub> fueron secuenciados en la central de analítica 'CGEB-Integrated Microbiome Resource (IMR)' de la Universidad de Dalhousie (Halifax, NS, Canadá), a través de la plataforma de secuenciación masiva de nueva generación *Illumina MiSeq*. Para la construcción de las librerías metagenómicas, se usaron los cebadores bacterianos de la región V4-V5 del gen 16s rRNA, mediante los oligonucleótidos 515F (5'-

GTGYCAGCMGCCGCGGTAA-3') y 926R (5'-CCGYCAATTYMTTTRAGTTT-3') y (Walters *et al.*, 2016).

### 3.4.3 Análisis bioinformático de librerías metagenómicas

De acuerdo con el protocolo de Gutiérrez-Sarmiento *et al.*, (2020), se analizó la calidad y la longitud de las secuencias mediante FastQC de las lecturas crudas de paired-ends. Se utilizaron las herramientas *USearch* y *VSearch* para el análisis genómico progresivo. Las lecturas hacia adelante (*forward*) y en reversa (*reverse*) se fusionaron para obtener la secuencia consenso con la herramienta *Fastq\_mergepairs*. Posteriormente, las secuencias se cortaron a 19 pares de base (pb) a la izquierda y 20 pb a la derecha de cada secuencia, respectivamente, de acuerdo a la longitud de pb de los cebadores usados.

Se utilizó el filtro de calidad con  $\pm 10\%$  de la longitud de secuencia esperada con base a la longitud de los cebadores usados. Todas las secuencias similares fueron integradas a una secuencia representativa y se descartaron las que no pasaron el filtro. Además, con la herramienta *unoise3* se removieron aquellas secuencias con error o que no fueron definidas. Se creó una tabla con las Variantes de Secuencias de Amplicón (ASV) asignadas con un umbral de al menos 0.001% de representación. Finalmente, se comparó la tabla de AVS con una tabla de conteo con un umbral de similitud de 0.99; de esta manera, se realizó la asignación taxonómica de las ASV de las secuencias con referencia en la base de datos de 16s ARNr ribosomal SILVA.

Después de calcular el porcentaje total de los ASVs obtenidos, se filtraron aquellos con una abundancia relativa menor a 0.1%.

### 3.5 Muestreo de suelos

El muestreo de suelos se realizó dos veces en cada sitio de estudio; el primero antes del establecimiento del experimento y el segundo al finalizar el experimento de campo. Esto con la finalidad de analizar la relación de los tipos de manejo agronómico de los agroecosistemas y la aplicación de consorcios microbianos como posibles factores que pueden afectar la degradación física y química de los suelos.

#### a) Antes de establecer el experimento

Durante el primer muestreo se ubicó a la parcela respecto al norte y se calculó la pendiente de forma visual con ayuda de un transportador. La parcela se dividió por secciones de variaciones físicas y se tomaron las muestras por el método cinco de oros a una profundidad de 0-30 cm. Con la ayuda de una pala se obtuvieron 15 submuestras; a partir de ellas se obtuvo una muestra compuesta representativa de 1.5 kg que, posteriormente, se empaquetó en bolsa de polietileno y se etiquetó para su identificación.

Este procedimiento se realizó con base en el manual técnico de muestreo de suelos del laboratorio Fertilab® ubicado en Celaya, Guanajuato, en el cual se enviaron las muestras para el análisis fisicoquímico.

## **b) Después del experimento**

Al finalizar el experimento, se realizó el segundo muestreo siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. A diferencia del primero, se obtuvieron dos muestras compuestas: una representativa de los tratamientos con MM y otra ejemplar de los tratamientos sin MM. Las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno y fueron debidamente etiquetadas. Las seis muestras totales, dos por parcela, se enviaron a Fertilab® para el análisis correspondiente.

### **3.6 Análisis fisicoquímico de suelos**

La interpretación de los resultados se estableció con base en los procedimientos analíticos autorizados por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF<sup>4</sup>, 2002).

Se determinaron la textura, pH (1:2 agua), densidad aparente, pH (electrométrico), materia orgánica (%), capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo disponible, azufre, cationes cambio, micronutrientes, entre otros. Algunas de estas variables también fueron estudiadas por Martínez-Aguilar *et al.* (2020).

### **3.7 Establecimiento del experimento**

Durante un ciclo productivo primavera-verano del 2020 se establecieron tres experimentos de campo bajo condiciones de temporal en los diferentes sitios de estudio, cada uno con diferente tipo de manejo agronómico: agroecológico (AG), convencional (CN) y mixto (MX), con base en la caracterización de Martínez-Aguilar *et al.* (2021). En este sentido, el experimento se realizó de acuerdo a las prácticas de manejo locales que acostumbra el productor en su parcela para contrastar y discutir la respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de los biofertilizantes en las condiciones particulares de cada sistema.

### **3.8 Diseño experimental**

Se utilizó el diseño experimental de cuadro latino de 4x4 lo que conformó un total de 16 unidades experimentales (UE). Cada UE tuvo una dimensión de cinco por cinco metros lineales (25 m<sup>2</sup>), con una separación entre tratamientos y repeticiones de cinco metros (Figura 4) y fueron constituidas por seis surcos de cinco metros de largo y 0.8 m entre filas.

---

<sup>4</sup> Diario Oficial de la Federación

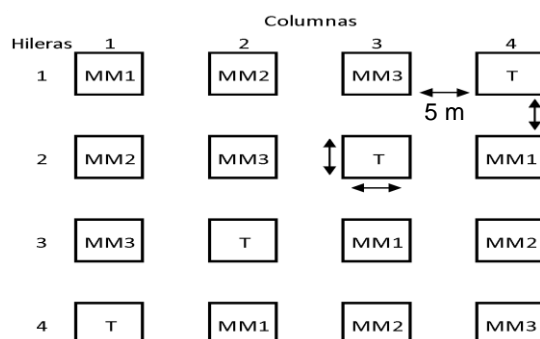


Figura 6. Distribución de los tratamientos en campo de acuerdo al diseño experimental de cuadro latino.

### 3.9 Tratamientos evaluados

Los tratamientos descritos en el Cuadro 1 se distribuyeron aleatoriamente en las UE. El testigo correspondió al manejo tradicional que acostumbra el productor según el tipo de sistema; es decir, se siguieron las prácticas de manejo locales que acostumbra el productor en su parcela para contrastar y discutir la respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de los biofertilizantes en las condiciones particulares de cada sistema.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados

Sistema	Simbología	Tratamientos evaluados
AG, CN y MX	MM <sub>1</sub>	MM de la “RESIBE
AG, CN y MX	MM <sub>2</sub>	MM de APRN “La Frailescana
AG, CN y MX	MM <sub>3</sub>	MM de Cerro Nambiyugá
AG		Composta + Sulfato de amonio
CN	T	Sulfato de amonio
MX		Urea con Potasio (2:1)

AG = sistema agroecológico; CN=sistema convencional; MX = sistema mixto; MM = Microorganismos de Montaña.

Durante el experimento, los productores participaron activamente en la aplicación de los tratamientos, según la dosis que se indica en el Cuadro 2, así como en el seguimiento del desarrollo del cultivo hasta la cosecha. Los MM se aplicaron tres veces en cada parcela; las primeras dos aplicaciones coincidieron con el día que el productor aplicó el fertilizante químico que acostumbra conforme al manejo agronómico, a excepción del sistema CN donde el productor sólo fertilizó una vez (sulfato de amonio) a los 20 DDS. La tercera aplicación se realizó en el establecimiento de la floración del maíz.

Cuadro 2. Dosis de aplicación de los microorganismos de montaña (MM)

Aplicación	DDS	Dosis de fertilización de MM
1	20	50% (Sol. 50% concentrado de MM + 50% de agua)
2	40	50% (Sol. 50% concentrado de MM + 50% de agua)
3	60-65	75% (Sol. 75% concentrado de MM + 25% de agua)

DDS = Días después de siembra

### 3.10 Tipificación de las parcelas por manejo agronómico

La tipificación de los agroecosistemas en cada sitio de estudio se determinó de acuerdo a las variantes tecnológicas invertidas en el manejo agronómico incluyendo el uso de maquinaria agrícola; uso y cantidad de fertilizantes químicos, otros agroquímicos y prácticas de conservación del suelo; con base en lo propuesto por Martínez *et al.* (2020): convencional, agroecológico y mixto. Para ello, se aplicaron entrevistas semiestructuradas (Anexo 7.2) a los propietarios de los sitios de estudio, las cuales respondieron a 20 variables agrupadas en cuatro rubros: datos generales, características y evolución del agroecosistema, información general de la producción agrícola y la capacidad de adopción tecnológica.

En el sistema AG, con una pendiente de 5%, no se utilizó maquinaria para las labores culturales; se sembró la variedad Pioneer® 4082W el día 23 de junio; se fertilizó con una mezcla de composta y sulfato de amonio los días 12 de julio y 21 de agosto, y para el control del gusano cogollero se aplicó un macerado de cal con ajo.

En el sistema MX, con una pendiente estimada del 15%, el productor incorporó el 30% del rastrojo de la cosecha anterior y aplicó herbicidas diferentes (2, 4-D y glifosato) desde 20 días antes de la siembra. El siete de junio sembró por esquepe el híbrido Pioneer® 4082W con una separación de 20 cm entre planta y 80 cm entre surcos. Posteriormente, utilizó Potrero 101® (2, 4-diclorofenox) con Picloram+2,4-D para un cuarto control de malezas el 27 de julio. La fertilización se realizó dos veces, los días 29 de junio y 27 de julio, con urea y potasio (2:1).

En el sistema CN se calculó una pendiente del 10%. La preparación del terreno inició el 26 de mayo con un sistema de quema y rastrojo manual; posteriormente, se realizó un paso de arado y dos de rastra con maquinaria. El primero de julio se sembró la variedad Zarco® V-526 de forma mecanizada a una distancia entre plantas de 20 cm y de 80 cm entre surcos y se obtuvo una densidad de población de 125, 000 plantas ha<sup>-1</sup>. Se aplicó 125 mL de glifosato y el ingrediente activo 2,4-D Amina a los dos DDS y el control de plagas se efectuó con Paraquat

(27.6%) y diuron (10%) a una dosis de 140 mL entre los 35-40 DDS. La fertilización se realizó una vez con sulfato de amonio (21-00-00 + 24S) el 25 de julio.

### **3.11 Variables evaluadas**

Se evaluaron variables de crecimiento (altura de planta, diámetro de tallo, índice de área foliar), biomasa fresca y seca, y rendimiento total con base en la metodología reportada por Verhulst *et al.* (2012).

#### **3.11.1 Variables de crecimiento**

La parcela útil evaluada fue 10 plantas al azar por tratamiento para mediciones fisiológicas (altura de la planta, área foliar) y morfológicas (diámetro del tallo).

Se midió altura de planta con el uso de cinta métrica desde el nivel del suelo hasta el nudo de inserción de la última hoja de la planta. El diámetro de tallo se obtuvo con la ayuda de un vernier para medir el diámetro en el primer entrenudo. Para calcular el índice de área foliar se midió con cinta métrica el largo y ancho de las cuatro hojas de mayor madurez, y los valores obtenidos se multiplicaron por la constante 0.75 (Corral *et al.*, 2014).

#### **3.11.2 Componentes de biomasa y rendimiento**

A los 90 DDS se estimó la producción de biomasa a través de un muestreo destructivo de dos plantas al azar por parcela útil en cada tratamiento. Después de evaluar los componentes de la planta en peso fresco, las muestras se llevaron al laboratorio de Nutrición Animal de la Facultad de Ciencias Agronómicas, *Campus V*, UNACH para evaluar peso seco (estufa de aire forzado a 60° C por 72 horas).

Se estimó el rendimiento total con el cálculo de peso de 100 granos, porcentaje de humedad (14%), densidad de siembra y granos por mazorca.

### **3.12 Análisis estadístico**

Los índices de diversidad alfa con base en las variantes de secuencias de amplicones (ASVs) se obtuvieron con el *software* R Studio (versión 1.3.1093). Se realizó un ANOVA para un diseño de Cuadro Latino y la comparación de medias por la prueba de Duncan ( $p \leq 0.05$ ) con el paquete estadístico Statistica, versión 10.

Se utilizó el *software Primer-e V7* para los análisis de los datos microbianos; se aplicó la transformación  $\log X + 1$  para repartir los pesos y visualizar mejor las diferencias entre las muestras y se realizó el análisis estadístico de similitud SIMPROF. Los datos de las propiedades fisicoquímicas se estandarizaron y normalizaron para, posteriormente, aplicar un análisis multiestadístico de escalamiento no paramétrico multidimensional y el SIMPROF, con base en la distancia euclídeana.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Extracción de ADN y Variantes de Secuencias de Amplicones (ASVs)

Los resultados de la extracción de ADN de las muestras analizadas se presentan en el Cuadro 3, en él se puede apreciar que se cumple con los requerimientos para la realización de la secuenciación. Los resultados obtenidos, en cuanto a calidad y cantidad del ADN, corresponden a lo reportado por Gutiérrez-Sarmiento *et al.* (2020), el cual resulta apropiado según el protocolo seguido para la obtención de ADN en el tipo de muestras bajo estudio.

Cuadro 3. Concentración de las muestras por duplicado del ADN de los consorcios de microorganismos de montaña: MM<sub>1</sub> (La Sepultura), MM<sub>2</sub> (La Frailescana) y MM<sub>3</sub> (Nambiyugua).

	Muestra	Concentración	Porción	Porción	Muestra	Concentración	Porción	Porción
	X	µg mL <sup>-1</sup>	260/280	260/230	Y	µg mL <sup>-1</sup>	260/280	260/230
MM <sub>1</sub>	S1	2.2	1.9	0.43	S1	2	1.61	0.52
	S2	2	1.4	0.38	S2	2.4	1.68	0.37
	S3	1.9	1.91	0.4	S3	2.3	1.49	0.62
MM <sub>2</sub>	F1	2.2	1.43	0.53	F1	0.8	1.04	1.31
	F2	1.3	1.31	0.58	F2	1	1.49	0.87
	F3	2.8	1.65	0.24	F3	5.2	1.39	0.4
MM <sub>3</sub>	N1	2.3	1.77	0.19	N1	1.2	1.65	0.31
	N2	2.7	1.82	0.34	N2	0.6	1.33	0.5
	N3	1.8	1.36	0.34	N3	1.9	1.29	0.63

A partir del análisis de secuenciación masiva, se obtuvieron un total de 144 261 secuencias que correspondieron a las regiones hipervariables V4-V5 del gen 16s ARNr. La alineación hacia adelante y en reversa de los pares resultó en un consenso de 103, 297 datos exitosos que se traslaparon a lo largo de las lecturas.

En las Figuras 5 se presenta la abundancia de ASVs reportadas por las clasificaciones taxonómicas de *phylum* en los diferentes tratamientos de MM. El *phylum* más abundante fue *Firmicutes* entre los tres tratamientos con una abundancia relativa entre el 50-90%, seguido del *phylum Proteobacteria* con una abundancia relativa menor al 40%. Tchuissu *et al.* (2018) analizaron la estructura microbiana de la rizósfera de cultivo de maíz, donde *Firmicutes* y *Proteobacteria* fueron potenciales promotores del crecimiento vegetal; este último destaca en el funcionamiento ecológico y metabólico del suelo debido a su contribución en la fijación de nitrógeno, descomposición y formación de humus (Johnston-Moje *et al.*, 2016; Mashiane *et al.*, 2018).



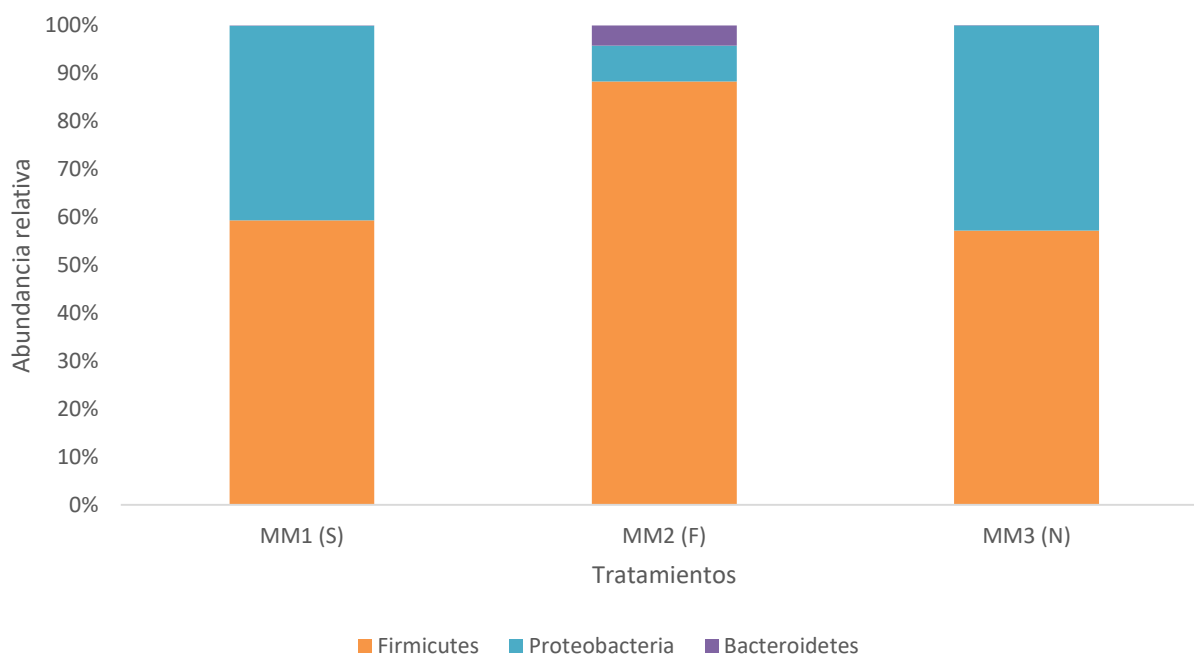


Figura 7. Phylum de bacterias más abundantes determinado por el gen 16s ARNr entre los tratamientos MM<sub>1</sub> (La Sepultura), MM<sub>2</sub> (La Frailescana) y MM<sub>3</sub> (Nambiyugua).

Piromy et al. (2011) analizaron el efecto de la inoculación de microorganismos benéficos sobre la estructura de las comunidades microbianas de la rizósfera del cultivo de maíz y reportaron que bacterias *Firmicutes* aparecieron en la quinta semana de crecimiento y desaparecieron en la semana ocho. En otro estudio, Qiao et al. (2013) encontraron una alta diversidad de bacterias hidrolíticas y fermentativas con gran abundancia de *Firmicutes* (48.3%), *Bacteroidetes* (7.7%) y *Proteobacteria* (7.2%) en un reactor anaeróbico compuesto por rastrojo de maíz.

Por otro lado, en la Figura 6 se observa el mapa de calor de agrupación de abundancia de los 20 géneros de bacterias más abundantes determinado por el gen 16s ARNr entre los tratamientos, donde destaca la alta abundancia relativa de bacterias ácido lácticas (BAL). De acuerdo con el árbol de agrupaciones en la parte superior de la figura, se forman 3 grupos estadísticamente similares, el primer grupo F1 y F2, el segundo S2 y S3 y el tercero N1 y N2. Los resultados obtenidos demuestran que la estructura y abundancia microbiana es diferente entre los MM dependiendo de su origen.

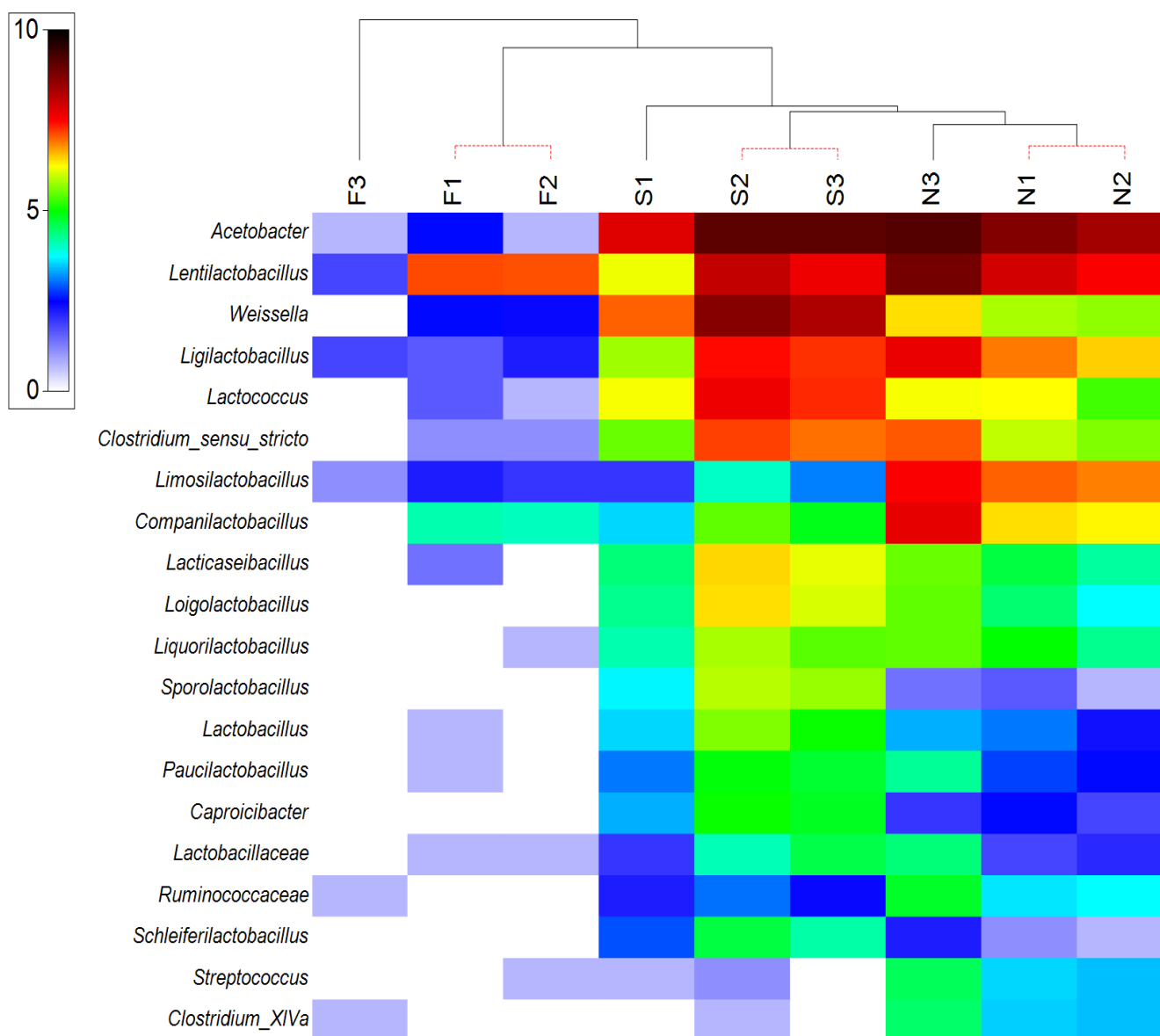


Figura 8. Mapa de calor de agrupación de abundancia y SIMPROF (análisis estadístico de similitud) de los 20 géneros de bacterias más abundantes determinado por el gen 16s ARNr entre los tratamientos MM<sub>1</sub> (La Sepultura: S1, S2 y S3), MM<sub>2</sub> (La Frailescana: F1, F2 y F3) y MM<sub>3</sub> (Nambiyuguá: N1, N2 y N3). El valor de cada caja de color es la abundancia relativa de los ASVs. La parte superior representa el árbol de agrupación de los ASVs. Datos transformados log X+1.

Entre los géneros con mayor abundancia destacan, principalmente, dos bacterias: *Acetobacter* con una abundancia relativa entre 30-40% dentro del tratamiento MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub>, y *Lentilactobacillus* con una abundancia entre 30-90% en el tratamiento MM<sub>2</sub>. Similar a lo

reportado por Park *et al.* (2021), quienes encontraron mayor presencia de los géneros *Lactobacillus* y *Lentilactobacillus parabuchneri* en microorganismos eficientes coreanos (KEM, por sus siglas en inglés), a estos géneros se les atribuye el potencial para remover materiales tóxicos de la basura y promover el crecimiento vegetal. Asimismo, Daly y Stewart (1999) encontraron en EM cepas de *Streptococcus lactis* y *Lactobacillus* sp., pueden mejorar la diversidad microbiológica de los suelos, lo cual aumenta su calidad, así como el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos (Higa y Parr, 1994).

Por otra parte, *Acetobacter diazotrophicus* es un diazótrofo endofítico (Vessey *et al.*, 2003) que se ha aislado del cultivo del maíz y se ha estudiado ampliamente su asociación con otros cultivos de importancia económica (Dibut-Álvarez *et al.*, 2021). Por ejemplo, la inoculación foliar y al suelo con esta bacteria en el cultivo de camote logró incrementar en un 30-40% el largo de plantas, el diámetro del tallo, el número de hojas y el diámetro del tubérculo, en comparación con las plantas controles; así como en un 48-51% el rendimiento agrícola (Dibut *et al.*, 2009). Jogaiah *et al.* (2010) reportó que la inoculación de dos cepas del género *Acetobacter* en una gramínea (*Pennisetum glaucum*) tuvo efectos positivos sobre su crecimiento y ofreció la mayor protección contra enfermedades, en comparación con otras bacterias, en un 39.2% y 22.3%, respectivamente.

Las relaciones endófitas se presentan eficientes como sistema planta-microorganismos, debido a que no se presentan pérdidas por lixiviación, arrastre, volatilización, etc., por lo que las ganancias metabólicas y energéticas en función de las células representan rendimientos superiores (Dibut *et al.*, 2009).

Por otro lado, las BAL son bacterias gram positivas, facultativas y anaeróbicas que residen comúnmente en sustratos ricos en carbohidratos, los cuales fermentan en ácidos orgánicos, y también tienen la capacidad de producir péptidos con actividad antimicrobiana, como bacterosinas clase I y la nisina (Lamont *et al.*, 2017; Morocho y Leiva, 2019), lo que puede restringir la diversidad de poblaciones microbianas dentro de su ambiente por efecto antagónico.

Lo anterior se debe principalmente a que estas bacterias son ácido-tolerantes, por lo que algunas son capaces de crecer en valores extremos de pH, pero la mayoría crece entre 4 y 4.5 (Souza *et al.*, 2015), por ejemplo, *Lactobacillus*, *Lactococcus* y *Streptococcus*. Esto les permite sobrevivir en ambientes donde otras bacterias no pueden sobrevivir. También son microaerófilas, tienen buen desarrollo en ambientes con un 5% de CO<sub>2</sub> y la temperatura óptima para su reproducción oscila en 30° C (Londoño *et al.*, 2015). Tanto las BAL como las levaduras son comúnmente encontrados en los MM y, en menor cantidad, se encuentran bacterias fotosintéticas, actinomicetos y otros tipos de microorganismos que pueden ser compatibles mutuamente y coexistir dentro de consorcios microbianos (Higa, 1994).

La bibliografía antes descrita, sugiere que las bacterias presentes en los MM bajo estudio pueden tener un potencial como promotores de crecimiento vegetal, lo cual representa una alternativa para disminuir progresivamente la cantidad de agroquímicos en la agricultura. Sin embargo, es difícil predecir los efectos positivos de los microorganismos descritos asociados al cultivo de maíz, sobre todo, con la inoculación de poblaciones de microorganismos en su mayoría anaeróbicos. Su respuesta puede depender en el tipo de manejo agronómico, tipo y cantidades de agroquímicos presentes y las diferentes condiciones ambientales asociadas a los agroecosistemas.

## 4.2 Riqueza y diversidad de la comunidad bacteriana entre los consorcios microbianos

Los índices de diversidad (Figura 7) para las comunidades bacterianas entre los diferentes tratamientos señalaron mayor diversidad en los tratamientos MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub>, con valores entre 2 y 3, mientras que MM<sub>2</sub> se mantuvo debajo de 1.5 en el índice de Shannon, de la misma manera que se puede apreciar esta tendencia en el mapa de calor de la Figura 6. Así también, por el índice de Simpson se observó que la dominancia de los pesos se repartió en pocos géneros en la muestra F<sub>3</sub>, más cercano al uno, a diferencia de F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub>, correspondientes a MM<sub>2</sub>, asimismo en las muestras MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> la dominancia de los pesos se reparte en pocos géneros, tal como se observó en el mapa de calor de la Figura 8.

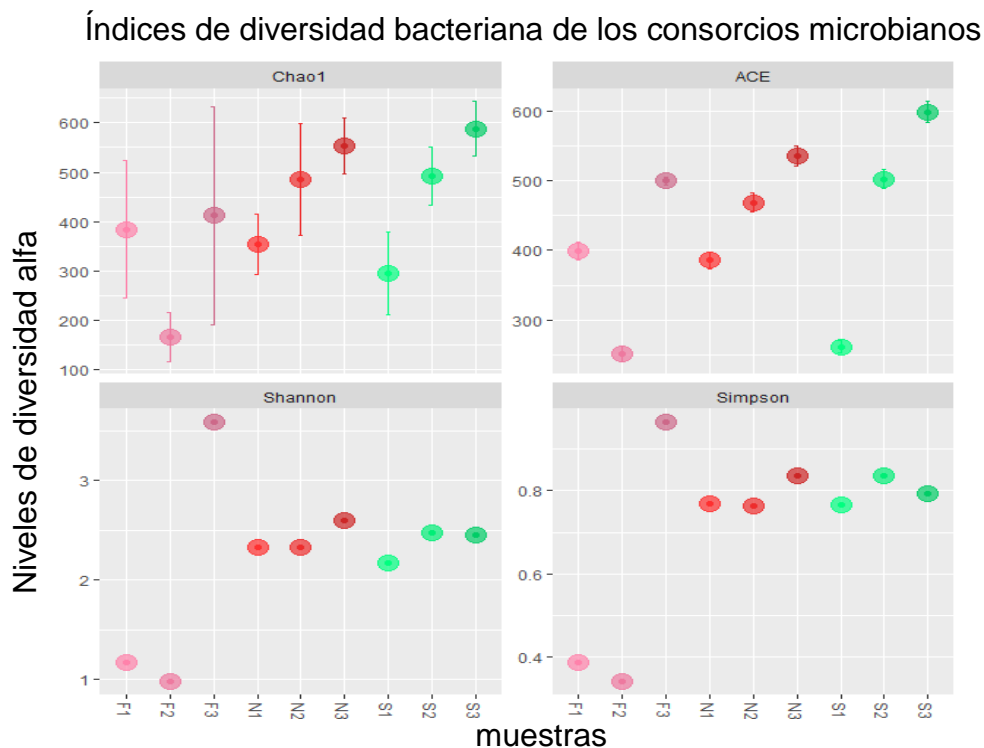


Figura 9. Índices de biodiversidad de los consorcios microbianos, donde MM<sub>1</sub> (La Sepultura: S1, S2 y S3), MM<sub>2</sub> (La Frailescana: F1, F2 y F3) y MM<sub>3</sub> (Nambiyuguá: N1, N2 y N3).

#### **4.2 Caracterización fisicoquímica de los microorganismos de montaña (MM)**

Durante la etapa de activación surgen cuestionamientos sobre los procedimientos para favorecer el crecimiento de poblaciones microbianas de interés agrícola. Los atributos fisicoquímicos de los MM se muestran en el Cuadro 4, donde indica que el MM activado más ácido fue el tratamiento MM<sub>2</sub>. Los valores obtenidos de pH coinciden con lo encontrado por Castro-Barquero y González-Acuña (2021) quienes evaluaron a los 12 días después de la activación de los MM; sin embargo, también reportaron que el pH aumentó en días posteriores con inyecciones de aire, hasta llegar a un pH mayor a 7 después de los 30 días de activación. Según estos autores, en procesos anaeróbicos (tapa hermética para evitar entrada de aire) el pH disminuye a valores menores a 4 y la acidez comienza a disminuir a partir de los 40 días de activación, pero cuando hay condiciones semiaeróbicas se controla la acidificación del proceso.

En este sentido, el tratamiento MM<sub>1</sub>, al obtener mayor pH, favoreció el crecimiento de las poblaciones de microorganismos, principalmente las BAL, puesto que el pH inferior a 4 inhibe el crecimiento de estas (*op. cit.*). Por el contrario, en el caso del tratamiento MM<sub>2</sub> se detectó menor diversidad de poblaciones microbianas, lo que coincide con los autores mencionados, quienes mostraron que una menor presencia de oxígeno, si bien, puede beneficiar el crecimiento de BAL, puede afectar el crecimiento de bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadores de fósforo. Por otro lado, la conductividad eléctrica puede afectar el crecimiento de los consorcios microbianos (Yana *et al.*, 2015). Generalmente, los EM se aplican con una fuente de carbono o energía, como la melaza (Daly y Stewart, 1999); sin embargo, utilizar menor cantidad de melaza en la activación permite un mejor desarrollo de las poblaciones de levaduras y lactobacilos (Castro-Barquero y González-Acuña, 2021). Así también, Castro *et al.* (2015) obtuvieron valores similares de P y Fe en MM<sub>2</sub> y MM<sub>3</sub>.

De acuerdo con estos estudios, las condiciones de elaboración pueden inferir en la dinámica de las comunidades microbianas de los MM, por ejemplo, la disponibilidad de aireación puede reducir el tiempo de fermentación, así como la acidez del MM activado; además, pueden ser utilizados como fuente de nutrientes al ser reforzados con otros nutrientes, como roca fosfórica o K (Castro-Barquero y González-Acuña, 2021).

#### **4.3 Caracterización fisicoquímica de los suelos**

En el Cuadro 5 se presentan los resultados obtenidos de dos muestreos realizados en los tres sistemas de manejo y las determinaciones se dividen en tres componentes, es decir, los resultados obtenidos antes del establecimiento del experimento (primer muestreo) y los alcanzados después del experimento (segundo muestreo). Estos últimos se dividen en dos muestras representativas, las UE con aplicación de MM y aquellas donde no se aplicó MM en el sitio de estudio como testigo (T).

Cuadro 4. Características físicoquímicas de los microorganismos de montaña (MM) a 30 días de activación

Variable	Método	Unidad	Microorganismos de Montaña (MM)		
			Sepultura MM <sub>1</sub>	Frailescana MM <sub>2</sub>	Nambiyugá MM <sub>3</sub>
pH	NMX-FF-109-SCFI-2007	-	4.86	3.55	4.01
CE	NMX-FF-109-SCFI-2007	dS <sup>-1</sup> m	10.9	10	10.5
Materia orgánica	Calcinación	%	2.04	3.95	3.41
P	Digestión en microondas / ICP	%	0.0061	0.01	0.01
K	Digestión en microondas / ICP	%	0.41	0.39	0.49
Ca	Digestión en microondas / ICP	%	0.11	0.09	0.13
Mg	Digestión en microondas / ICP	%	0.07	0.07	0.08
Na	Digestión en microondas / ICP	%	0.0085	0.0084	0.0098
Fe	Digestión en microondas / ICP	ppm	122	40.5	31.2
Zn	Digestión en microondas / ICP	ppm	1.02	1.55	1.42
Mn	Digestión en microondas / ICP	ppm	30.7	5.39	4.09
Cu	Digestión en microondas / ICP	ppm	0.005	0.04	0.08
B	Digestión en microondas / ICP	ppm	0.56	0.47	0.82
S	Digestión en microondas / Turbidimetría	%	0.1	0.09	0.1
Humedad	Método gravimétrico	%	96.9	95	95.4
Cenizas	Calcinación	%	1.08	1.05	1.17
Relación C/N	Base seca		13.9	22.8	21.8
Carbono orgánico	Calcinación	%	1.18	2.29	1.98

CE = conductividad eléctrica

Cuadro 5. Propiedades fisicoquímicas del suelo de las parcelas experimentales.

Variable	Unidad	Agroecológico			Convencional			Mixto		
		Antes	Después MM	T	Antes	Después MM	T	Antes	Después MM	T
pH	-	5.2	5.53	5.25	5.04	5.58	5.92	5.2	5.53	5.25
Densidad aparente (Da)	g cm <sup>3</sup> <sup>-1</sup>	1.39	1.35	1.41	1.29	1.26	1.38	1.25	1.35	1.36
M.O.	%	1.45	1.41	2.37	1.5	0.86	1.16	1.05	1.54	1.34
P-Bray	ppm	10.3	49.5	4.02	36.4	35.9	25.3	35.1	33.4	12
K	cmol+ kg <sup>-1</sup>	92.1	72.4	34.3	94.8	38	47.2	90.7	60.2	51.2
Ca	cmol+ kg <sup>-1</sup>	604	1014	350	1160	521	1109	944	892	1379
Mg	cmol+ kg <sup>-1</sup>	62.8	212	47.7	183	87.9	182	180	160	255
Na	cmol+ kg <sup>-1</sup>	7.29	21.7	22	11	14.3	18.5	18.9	22.8	28.6
Fe	ppm	72.3	75.3	71.4	66	66.4	47	63.1	49.3	33.2
Zn	ppm	1.92	0.31	0.11	2.3	0.31	0.15	2.28	0.1	0.21
Mn	ppm	14.9	32.6	4.73	36.7	19.8	18.1	16	22.2	16.8
Cu	ppm	0.42	0.45	0.18	0.34	0.41	0.32	0.48	0.4	0.25
B	ppm	0.11	0.1	0.12	0.12	0.2	0.11	0.11	0.1	0.13
Al	ppm	44	115	11.8	152	25.4	36.7	20	98	36.7
S	ppm	1.58	1.46	1.46	1.58	1.46	1.46	1.58	1.46	36.7
N-NO <sub>3</sub>	ppm	8.1	6.97	33.7	14.6	8.31	6.53	12.9	4.9	2.23
CIC	cmol+ kg <sup>-1</sup>	4.5	8.88	2.46	10	3.85	7.73	6.72	7.61	9.83
Clase textural		Franco arenoso			Franco arenoso			Franco arenoso		

Antes = primer muestreo; Después = segundo muestreo; MM = con Microorganismos de Montaña; T = testigo (sin MM); CIC = capacidad de intercambio catiónico

A partir del análisis de escalamiento multidimensional y SIMPROF (similaridad) en las propiedades fisicoquímicas del suelo correspondientes a los diferentes tipos de manejo agronómico (Figura 10), se puede deducir que, dentro de los agrupamientos, existe mayor similitud entre los sistemas MX y AG. Esto puede ser debido a que en ambos sistemas los productores enfatizan su manejo hacia una mejor conservación del suelo, por ejemplo, no se realiza la quema y se conserva hasta un 30% del rastrojo anterior de la cosecha para mantener cubierto el suelo.

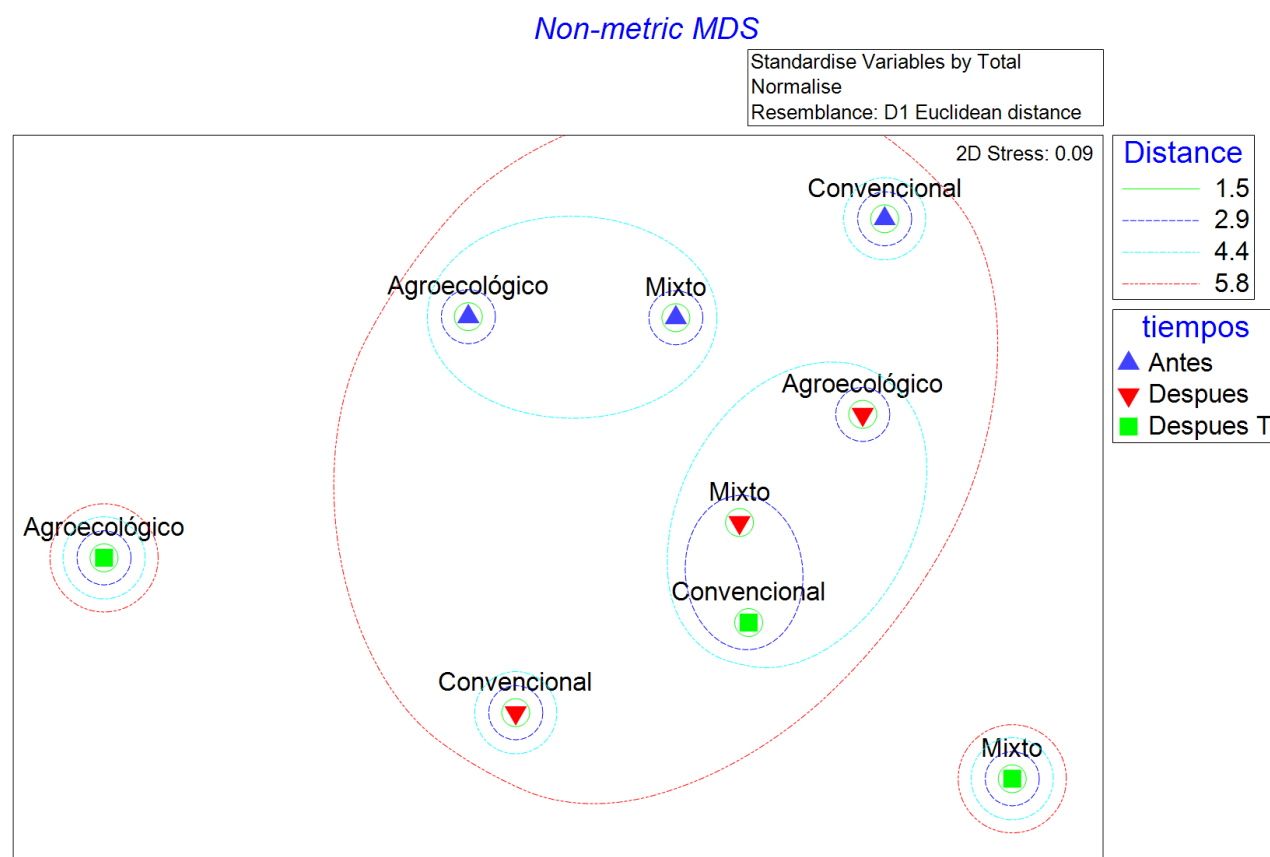


Figura 10. Análisis de escalamiento multidimensional y SIMPER (similaridad) de las propiedades fisicoquímicas del suelo correspondientes a los diferentes tipos de manejo agronómico con base en la distancia euclidiana.

El análisis puede sugerir que, después del establecimiento del cultivo, es decir, posterior a la toma de nutrientes por parte de la planta, se puede observar que en el sistema MX (segundo muestreo), el contenido de nutrientes en el suelo quedó similar al suelo testigo del sistema CN.



#### 4.3.1 pH del suelo

Los valores de pH en el suelo indican una acidez con valores de 5.2 (Cuadro 5); sin embargo, en los suelos en donde se aplicó los MM, muestran un aumento del pH de 5.5. Con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos de las UE se mantuvieron en un nivel moderadamente ácido, esto demostró una acidez generalizada en los suelos cultivados con maíz en la Frailesca de acuerdo con otros autores (López *et al.*, 2019; Martínez-Aguilar *et al.*, 2020). Estos resultados coinciden con Castro *et al.* (2015) en donde encontraron un comportamiento similar con MM aplicados al suelo en un sistema de rotación de soya-tomate.

Como se ha mencionado, los suelos de la región son ácidos y esta propiedad puede incrementar o disminuir de acuerdo al tipo de cultivo y a las condiciones de manejo. La acidez de los suelos puede aumentar, en parte, por acción de las raíces de las plantas al absorber nutrientes, por la lixiviación que produce el movimiento de cationes a capas inferiores con el arrastre del agua (Espinosa y Molina, 1999) y, por otra parte, por el uso indiscriminado de agroquímicos (Estrada, 2014), como los fertilizantes nitrogenados, particularmente, los amoniacales. A través del proceso de nitrificación se produce un exceso de hidrógeno ( $H^+$ ) en el suelo, este proceso puede darse naturalmente en un suelo bien aireado a manera que las plantas tomen nitrato ( $NO_3^-$ ) para su nutrición (Espinosa y Molina, 1999).

Los suelos ácidos se caracterizan por presentar toxicidad por  $Al^{+3}$  y  $Mg^{+2}$  y deficiencia de  $Ca^{+2}$  o  $Mg^{+2}$  (Tasistro, 2012), particularmente, la presencia de aluminio ( $Al^{+3}$ ) en la solución del suelo ocurre cuando el pH es menor de 5.3 (Espinosa y Molina, 1999). En conjunto, estos elementos afectan los rendimientos de maíz lo que conlleva a elevadas aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y, por lo tanto, los costos de producción (Pizaña *et al.*, 2019). En el 2007 se reportó que el 40% de la superficie de la región Frailesca afectada por la acidez provocó pérdidas entre 800-1400 kg en el rendimiento de grano de maíz (Mendoza *et al.*, 2007).

#### 4.3.2 Clase textural

La textura franco-arenosa que presentan los tres sitios de estudio son típicos de suelos tropicales; sin embargo, entre más arenoso sea un suelo menor será su capacidad de retención de agua (Camas *et al.*, 2012). La textura del suelo determina otras características como densidad aparente, espacio poroso, capacidad de retención y humedad del suelo. En ese sentido, las partículas de arcilla junto con el humus son los ingredientes activos del suelo, ya que forman el esqueleto del mismo. Los suelos que presentan las mejores condiciones tanto físicas como químicas para un buen crecimiento, desarrollo y producción de las plantas son los de texturas más finas (Ortiz y Ortiz, 1990). Además, si no realizan prácticas de conservación del suelo para disminuir la degradación, en poco tiempo el suelo perderá su capacidad productiva (Martínez *et al.*, 2019). Sin embargo, estas clases texturales tienen condiciones apropiadas para el crecimiento del cultivo de maíz (López *et al.*, 2019).

#### 4.3.3 Densidad aparente

En el segundo muestreo de suelos, se presentó un aumento de la densidad aparente ( $D_a$ ) en los suelos testigo de los tres sistemas y un descenso en aquellos con aplicación de MM en los sistemas AG y CN. La  $D_a$  osciló entre 1.29 y 1.41 g cm<sup>-3</sup>, estos resultados están asociados a los suelos franco arenosos, propios de los sitios de estudio.

Doran y Parkin (1994) mencionaron que la  $D_a$  del suelo es un buen indicador de propiedades importantes como la compactación, porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, lo que condiciona la circulación de agua y aire en el suelo, los procesos de establecimiento de las plantas (emergencia, enraizamiento) y el manejo del suelo, características que se deben considerar para el establecimiento de cultivos básicos, como el maíz, frijol y calabaza en las regiones tropicales (Aguilar, 1991). De acuerdo con López *et al.* (2018), en función de la interacción entre la clase textural y la  $D_a$ , la clase de compactación de estos sitios es considerada “sin problema” al presentar valores de  $D_a$  <1.4 en suelos franco arenosos, es decir, son apropiados para el crecimiento adecuado de las raíces del cultivo.

Esta propiedad varía con la condición estructural del suelo y puede ser afectada por el cambio de uso de suelo, la maquinaria agrícola, la compactación por la ganadería y el clima. Por ejemplo, Loroña *et al.* (2018) encontraron baja eficiencia de biorremediación en suelos franco-arenosos con el uso de microorganismos eficaces (EM) y encontraron que la remoción de hidrocarburos fue menor con el aumento de la densidad aparente en diferentes tipos de uso de suelo. El aumento de la densidad aparente se debe a la compactación provocada por la rotura de los agregados del suelo (Montagnini y Jordan, 2002). Así mismo, Qin *et al.* (2004) señalaron que en suelos franco arenosos el sistema de labranza convencional permitió un mayor desarrollo radicular en comparación a una labranza mínima y que con esta última práctica la densidad aparente fue superior en la capa de 0-25 cm.

#### 4.3.4 Materia orgánica

Según las determinaciones de la NOM-021-SEMARNAT-2000, antes de la aplicación de MM en el sistema MX se encontró un nivel bajo de materia orgánica y, posteriormente, aumentó a un nivel moderado, así como para el caso del testigo. Martínez-Aguilar *et al.* (2020) encontraron que los sistemas AG, CN y MX contienen en promedio 3.5%, 2.58% y 3.45% de materia orgánica, respectivamente. Sin embargo, sólo en el sistema MX se percibió un aumento de 0.5% de materia orgánica después de la aplicación de los MM, similar a lo reportado por Campo-Martínez *et al.* (2014), quienes encontraron un aumento de la materia orgánica con la aplicación de MM al suelo en la producción de acelga.

Un mecanismo por el cual los EM incrementan el crecimiento vegetal es a través del aumento del porcentaje de la mineralización de la materia orgánica (Daly y Stewart, 1999; Pedraza *et*

*al.*, 2010). Esta dinámica de transformación de la materia orgánica se traduce en una mayor o menor disponibilidad de nutrientes y sustancias bioactivas para cubrir las necesidades del cultivo (Labrador *et al.*, 2002), y promueve la estabilización de los residuos recalcitrantes en humus.

De acuerdo con Martínez-Aguilar *et al.* (2020) el manejo AG está asociado con los ácidos húmicos que, al ser polímeros de estructura compleja, se relacionan con procesos de degradación y humificación lentos. Incorporar el rastrojo de la cosecha anterior y mantener una cubierta permanente en el suelo, como en los sistemas AG y MX, suministra la principal fuente de carbono para los microorganismos que transforman la materia orgánica en elementos solubles y sustancias húmicas aprovechables para las plantas (Labrador *et al.*, 2002), lo que influye en el desarrollo vegetal y producción de biomasa.

De acuerdo con lo reportado, después de la aplicación de EM existe un incremento de microorganismos del suelo que son benéficos para el crecimiento de las plantas y da lugar a una mayor mineralización de la materia orgánica; la supresión de patógenos del suelo, y el incremento del rendimiento y calidad de los cultivos (Asia-Pacific Natural Agriculture Network, 1995; Pedraza *et al.*, 2010). En cambio, la baja materia orgánica que presentó el sistema CN puede estar relacionado con la aireación del suelo y remoción de la fracción orgánica derivados del manejo agronómico, como el arado y la rastra, que permiten acelerar la descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos (Primavesi, 1984; León-Nájera *et al.*, 2006).

Cabe destacar que en el sistema CN el primer muestreo se realizó antes de comenzar con la preparación del suelo y fue el único sistema donde se realizó una quema por lo que los niveles de materia orgánica fueron más bajos en el segundo muestreo. Estas prácticas, incluyendo la no incorporación de otras fuente de materia orgánica, generan un reciclaje insuficiente de residuos orgánicos, que ha traído como consecuencia, un deterioro progresivo del suelo que evidencia una gestión insostenible de la tierra, en virtud que la MO se relaciona con todos los aspectos del suelo, como estabilidad de la estructura, capacidad de retener agua, aireación, contenido y disponibilidad de nutrientes, pH, capacidad de intercambio catiónico (Benzing, 2001; Carter, 2002; López *et al.*, 2019).

El uso eficiente de los microorganismos involucra no sólo la cantidad de ellos presente en el suelo, sino la participación activa en la dinámica de la transformación de los elementos en nutrientes necesarios para la funcionalidad del agroecosistema (Roling, 2007). La actividad metabólica depende, en parte, de la concentración y disponibilidad de los compuestos a utilizar, así como de las condiciones de la rizósfera, determinada por las propiedades físicoquímicas y biológicas del suelo (Pedraza *et al.*, 2010).

#### 4.3.5 Fósforo

Con base en la interpretación de la NOM-021-SEMARNAT-2000, en el sistema AG los suelos contienen niveles bajos de P, pero con la aplicación de los MM se obtuvieron niveles altos con un aumento de 380%. Por otro lado, en los sistemas CN y MX la disponibilidad de P disminuyó en un 2-5%, pero en los suelos testigo se observó una reducción del 31% y 65%, respectivamente. Chaudhary *et al.* (2021) encontraron un aumento en la disponibilidad de P en la rizósfera de maíz bajo el efecto de *Bacillus* sp. como bioinoculante. Destaca que en el sistema MX se encontró niveles altos de P excepto en el testigo correspondiente al segundo muestreo. Similar a los reportado por Piyadasa *et al.* (1995), quienes indicaron un incremento en las concentraciones de N y P como resultado de la aplicación de EM en comparación con el testigo.

Lo anterior sugiere que la respuesta del P en el suelo a la aplicación de los MM se puede atribuir a la presencia de microorganismos solubilizadores de P en los consorcios microbianos; o bien, la incorporación de los MM y la interacción con el suelo y demás microbiotas presentes, favorecen la presencia y el aumento de los microorganismos solubilizadores de P, por lo que el uso de los MM tiene un impacto positivo para el P biodisponible. Este elemento es uno de los nutrientes indispensables para el buen desarrollo de los cultivos, sin embargo, sólo el 0.1% del P en el suelo está disponible para las plantas (Zhu *et al.*, 2011).

Al respecto, Castro *et al.* (2015) observaron que el uso de activados líquidos de MM al suelo incrementó las concentraciones de P en la solución del suelo. Por otro lado, los niveles altos de P pueden favorecer la actividad de solubilizadores de P nativos de los suelos, como *Rhizobium* y *Agrobacterium* (Paredes-Mendoza y Espinosa-Victoria, 2010). El mecanismo más común entre los solubilizadores de fosfatos es la sintetización de ácidos orgánicos y liberación de aniones y enzimas (Wan y Wong, 2004; Tarafdar y Taday, 2011).

#### 4.3.6 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es baja para los tres sistemas de manejo, el valor de 10 es el más alto en el sistema CN. En este último, hay una disminución de CIC después de la aplicación de MM, similar a lo obtenido por Laruta y Fuentes (2021) en altas dosis de concentración de MM, lo que puede indicar un alto grado de mineralización de la MO y que los cationes de cambio (Ca, Mg, K y Na) fueron absorbidos por la planta, lixiviados o, en su defecto, por los mismos microorganismos presentes en los MM para su nutrición. De acuerdo a Chilon (2014), los valores de 10 - 12 meq/100 g se encuentran dentro de un rango de calificación media. A su vez Díaz *et al.* (2009), obtuvieron similares resultados sobre la CIC al cuarto mes, al evaluar la acción de los microorganismos eficientes en dosis de 5% de concentración, usando compost y mulch para la recuperación de suelos en plántulas de acacia; sin embargo, en la aplicación de EM sin la combinación de estos abonos no hubo aumento de CIC.

Con esta propiedad química se puede inferir el tipo de arcilla presente (DOF, 2002) y depende directamente de su complejo absorbente, como sustancias húmicas y arcillas (Labrador *et al.*, 2002). Generalmente en los suelos tropicales, pobres en cationes, con lixiviación fuerte y en presencia de alta solubilidad de los silicatos e hidróxidos de Fe y Al, se forman caolinitas. En suelos ácidos, el débil reabastecimiento de la solución de suelos arcillosos y arenosos con nutrientes se debe al complejo de cambio reducido (Primavesi, 1984).

Esto provoca que los fertilizantes químicos aplicados por el productor para aportar nutrientes no sean eficientes puesto que no hay suficientes aniones para retener los cationes debido a la lixiviación predominante (Martínez-Aguilar *et al.*, 2020). Por lo que recuperar la calidad del suelo a través del ciclado de nutrientes mediante procesos biológicos resulta importante en los suelos tropicales, donde la mayoría de las veces solamente el 50% del fertilizante es aprovechado por las plantas y el resto representa pérdidas económicas y contaminación ambiental (Saikia y Vanita, 2007).

#### **4.3.7 Los cationes básicos (K, Ca, Mg)**

Los tres sistemas de manejo son pobres en micronutrientes y deficientes en K (DOF, 2002). Ning *et al.* (2017) reportaron que a mayor aplicación de fertilizante químico (NPK, 15:15:15) disminuyó la disponibilidad de K en el suelo; sin embargo, con la combinación de fertilizante químico y orgánico la pérdida de K es menor, lo cual es importante a considerar debido a que este elemento, en el proceso de intercambio catiónico a nivel coloidal, es un activador de enzimas y se ubica en el sexto lugar de importancia en la composición de la materia seca en maíz con  $9.2 \text{ kg Mg}^{-1}$  (Morón *et al.*, 1996; Martínez-Aguilar *et al.*, 2020).

Destaca que la disponibilidad de Mg aumentó a un nivel alto después de la aplicación de los MM en el sistema AG y nivel medio en el sistema MX. Díaz *et al.* (2009) observaron que la combinación de EM con gallinaza aporta mayor contenido de Mg en el suelo, y por sí solos no funcionaron. Los niveles de  $\text{Ca}^{++}$  alcanzaron niveles moderados en los tres sistemas; su presencia puede aportar hasta 2.3 kg en una tonelada de biomasa seca de maíz (Alcántar *et al.*, 2016; Martínez-Aguilar *et al.*, 2020). Debido a las características de la arcilla caolinítica característica de los suelos ácidos tropicales, la capacidad de intercambio catiónico, como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y Na, es muy reducida (Primavesi, 1984). La abundancia de un solo elemento puede influir en la de otros cationes por competencia de intercambio o absorción catiónica de la planta. Además, la aplicación constante de fertilizantes nitrogenados influye en la disminución de los cationes básicos del suelo.

#### **4.3.8 Nitrógeno**

El  $\text{N-NO}_3$  se refiere a la concentración del N de los iones de  $\text{NO}_3^-$  presentes en la muestra. Se encontró un incremento de esta concentración en el suelo testigo del sistema AG. A pesar de

que puedan darse cambios en las cantidades de N a corto plazo, Hartemink (2003) considera que estos niveles deben ser continuos por al menos 10 años para considerarse estables. Se ha reportado que la aplicación prolongada de enmiendas orgánicas puede mejorar la disponibilidad de K, P extraíble y contenido de carbono orgánico, pero resulta diferente para el caso de N (Diacono y Montemurro, 2010). Ning *et al.* (2017) encontraron que la aplicación de un fertilizante químico (nitrogenado) y orgánico no tuvieron efectos significativos sobre el N disponible del suelo, pero redujo la disponibilidad de P y K, en comparación con una aplicación 100% de fertilizante químico, esto se puede explicar con los bajos contenidos de nutrientes de los MM.

Al respecto, Cristóbal-Acevedo *et al.* (2011) encontraron, después de ocho ciclos de cultivo de maíz, una mejora en la capa superficial del suelo (0-30 cm) en un sistema de manejo orgánico donde las reservas de N total incrementaron 40%, de las cuales 95% corresponden a las reservas de N inorgánico. En este mismo estudio, el sistema con manejo CN presentó una mayor disponibilidad de  $\text{NO}_3$ , amonio ( $\text{NH}_4$ ) y N mineral a una profundidad de 0-30 cm en el mismo periodo. Otras investigaciones señalan que el aporte de N a través de los residuos de cosecha y su incorporación en el suelo dentro del manejo orgánico puede reflejarse en 4 años, con menor acumulación de  $\text{NO}_3$  y bajas pérdidas por lixiviación (Stopes *et al.*, 2002; Miller *et al.*, 2008); esto último debido a que, aunque los  $\text{NO}_3$  son una de las formas disponibles para las plantas junto con el  $\text{NH}_4$ , pueden ser fácilmente lixiviados por escorrentías lo que tiene efectos negativos en los mantos acuíferos, como la eutrofización (Velazco *et al.*, 2009).

Las concentraciones en el suelo de N dependen de la actividad biológica por lo que pueden variar con los cambios de humedad y temperatura. Las diferencias en la humedad y la vegetación por cambios en los patrones de precipitación pueden dar lugar a resultados contrastantes con respecto a las respuestas de las comunidades microbianas (Jansson y Hofmockel, 2020).

En el escenario del cambio climático, se prevé que se produzcan mayores precipitaciones intensas en las regiones tropicales húmedas (IPCC<sup>5</sup>, 2015). A medida que aumenta la humedad del suelo, los poros del suelo comienzan a llenarse de agua y condiciones anaeróbicas, lo que genera condiciones propicias para la metanogénesis y la desnitrificación, y la potencial liberación de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), ambos potentes GEI (Jansson y Hofmockel, 2020). Recientemente, se ha descubierto que algunos microorganismos pueden oxidar amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a  $\text{NO}_3$  sin la generación de  $\text{N}_2\text{O}$  como subproducto (Xia *et al.*, 2018). Por lo anterior, resulta un reto importante entender los procesos metabólicos microbianos para

---

<sup>5</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

el manejo de las emisiones de GEI debido a la complejidad de estas comunidades dentro de las variaciones del suelo y el impacto del cambio climático.

#### **4.4 Crecimiento y desarrollo vegetativo**

##### **4.4.1 Altura de planta**

Se encontraron diferencias estadísticas significativas sobre la variable altura de planta (Cuadro 6) en el sistema AG, a los 35 y 60 DDS, y en el CN a los 90 DDS por efecto del tratamiento MM<sub>3</sub>. Estas medidas son comparables con lo reportado por Afanador-Barajas *et al.* (2021) quienes obtuvieron una altura de planta de 38.2 cm a los 44 dds con la aplicación de un consorcio con bacterias ácido lácticas en un campo de México con el híbrido Eagle® 215w. Por otro lado, Martínez *et al.* (2018) reportaron una altura de planta que osciló entre 190 a 232 cm en la Frailesca bajo un sistema CN. Este efecto se puede atribuir a la presencia de lactobacilos en los consorcios, estos pueden estimular el crecimiento de la planta al producir fitohormonas, como auxinas y citoquinas, que pueden estimular el elongamiento del tallo (González y Fuentes, 2017).

##### **4.4.2 Diámetro de tallo**

El sistema AG obtuvo mejor respuesta ante el efecto de los tratamientos; se encontraron diferencias estadísticas significativas durante las tres mediciones y destacó el consorcio MM<sub>3</sub> con los valores más altos de diámetro de tallo (Cuadro 7). Esto se puede explicar por un posible incremento de actividad biológica del suelo lo cual incide en un mayor contenido de materia orgánica y de absorción de nutrientes (Núñez, 2000), lo que coincide con López *et al.* (2008) quienes evaluaron el efecto de cepas fijadoras de nitrógeno (N<sub>2</sub>) y solubilizadoras de P sobre el crecimiento de maíz y encontraron valores entre 1.99 y 2.08 cm a los 60 dds. Esto indica que los valores reportados entre los consorcios son óptimos en los tres sistemas.

##### **4.4.3 Área foliar**

En el Cuadro 8 se observa que los tratamientos fueron estadísticamente significativos, particularmente, en los sistemas AG y CN. Nuevamente, MM<sub>3</sub> sobresale entre los consorcios; sin embargo, existe una amplia brecha comparado con los valores del T en los tres sistemas de maíz. Esto puede ser debido a las diferencias entre densidad de siembra ya que la evolución del índice del área foliar (IAF) es la que define la dinámica de intercepción de radiación solar por el cultivo. De existir variaciones del IAF se puede influir sobre la tasa de aparición y el tamaño de las hojas. Además, la tasa de expansión de las hojas depende sustancialmente de los nutrientes disponibles para la planta y del recurso hídrico (Martínez, 2015). Por otro lado, bajo la inoculación de la bacteria endófito *Acetobacter diazotrophicus* se reportaron efectos benéficos sobre indicadores de crecimiento y desarrollo de plantas en malanga y yuca (Dibut *et al.*, 2009).

Cuadro 6. Altura (cm) de la planta de maíz

Tratamiento		35 DDS		60 DDS		90 DDS	
		Media (cm)	EE	Media (cm)	EE	Media (cm)	EE
AG	MM <sub>1</sub>	26.96 b	1.341	57.13 b	3.065	214.12	11.85
	MM <sub>2</sub>	26.86 b	1.341	58.90 b	3.065	224.75	11.85
	MM <sub>3</sub>	<b>32.72 a</b>	1.341	<b>72.60 a</b>	3.065	229.50	11.85
	T	29.43 ab	1.341	67.73 a	3.065	220.75	11.85
Significancia		0.00671		0.00098		NS	
CN	MM <sub>1</sub>	28.96	2.36	99.50 b	7.46	292.5	12.83
	MM <sub>2</sub>	26.89	2.36	94.68 b	7.46	267.5	12.83
	MM <sub>3</sub>	29.43	2.36	96.44 b	7.46	282.7	12.83
	T	33.16	2.36	124.35 a	7.46	303.2	12.83
Significancia		NS		0.06272		NS	
MX	MM <sub>1</sub>	24.99 b	2.62	65.70 bc	4.77	213.63 b	9.88
	MM <sub>2</sub>	24.38 b	2.62	62.58 bc	4.77	223.13 b	9.88
	MM <sub>3</sub>	28.80 b	2.62	79.38 b	4.77	<b>256.63 a</b>	9.88
	T	39.73 a	2.62	124.60 a	4.77	282.00 a	9.88
Significancia		0.00997		0.00002		0.00305	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). NS = No significativo. EE = error estándar. AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto. DDS = Días después de siembra. MM1 = La Frailecana; MM2 = REBISE; MM3 = Nambiyuguá; T = testigo.



Cuadro 7. Diámetro de tallo (cm) de la planta de maíz

Tratamiento		15 DDS		35 DDS		60 DDS	
		Media (cm)	EE	Media (cm)	EE	Media (cm)	EE
AG	MM <sub>1</sub>	1.11 ab	0.040	1.72 b	0.048	1.89 b	0.053
	MM <sub>2</sub>	1.03 b	0.040	1.76 b	0.048	1.99 ab	0.053
	MM <sub>3</sub>	<b>1.20 a</b>	0.040	1.82 ab	0.048	2.03 ab	0.053
	T	1.07 b	0.040	1.95 a	0.048	2.08 a	0.053
Significancia		0.02809		0.00645		0.07713	
CN	MM <sub>1</sub>	0.59	0.05	2.01	0.10	2.40	0.08
	MM <sub>2</sub>	0.63	0.05	2.03	0.10	2.45	0.08
	MM <sub>3</sub>	0.71	0.05	2.12	0.10	2.50	0.08
	T	0.73	0.05	2.25	0.10	2.60	0.08
Significancia		NS		NS		NS	
MX	MM <sub>1</sub>	1.07	0.13	1.84 b	0.14	1.88	0.27
	MM <sub>2</sub>	1.17	0.13	1.62 b	0.14	2.47	0.27
	MM <sub>3</sub>	1.22	0.13	1.79 b	0.14	1.89	0.27
	T	1.52	0.13	2.35 a	0.14	2.49	0.27
Significancia		NS		0.02284		NS	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). NS = No significativo; EE = error estándar; AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto; DDS = días después de siembra; MM<sub>1</sub> = La Frailecana; MM<sub>2</sub> = REBISE; MM<sub>3</sub> = Nambiyugúá; T = testigo.

Cuadro 8. Área foliar (cm<sup>2</sup>) de la planta de maíz

Tratamiento		15 DDS		35 DDS		60 DDS	
		Media (cm <sup>2</sup> )	EE	Media (cm <sup>2</sup> )	EE	Media (cm <sup>2</sup> )	EE
AG	MM <sub>1</sub>	<b>84.32 a</b>	3.625	175.46 b	10.045	265.48 c	11.154
	MM <sub>2</sub>	67.47 b	3.625	178.57 b	10.045	289.95 bc	11.154
	MM <sub>3</sub>	73.31 b	3.625	<b>226.77 a</b>	10.045	313.01 ab	11.154
	T	71.44 b	3.625	190.74 b	10.045	334.40 a	11.154
Significancia		0.00942		0.00131		0.00017	
CN	MM <sub>1</sub>	27.21 ab	1.13	179.54 b	9.05	531.96 ab	14.53
	MM <sub>2</sub>	24.34 b	1.19	181.60 b	9.55	514.31 ab	15.34
	MM <sub>3</sub>	26.67 ab	1.13	193.60 ab	9.05	502.93 b	14.53
	T	30.35 a	1.14	214.14 a	9.16	560.32 a	14.72
Significancia		0.00475		0.03334		0.03764	
MX	MM <sub>1</sub>	92.92 b	5.01	192.73	9.68	297.71	15.90
	MM <sub>2</sub>	82.85 b	5.01	195.90	9.68	290.40	15.90
	MM <sub>3</sub>	<b>117.05 a</b>	5.01	240.10	9.68	326.77	15.90
	T	93.42 b	5.01	320.87	9.68	481.57	15.90
Significancia		0.00003		NS		NS	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). NS = No significativo; EE = error estándar; AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto; DDS = días después de siembra; MM<sub>1</sub> = La Frailecana; MM<sub>2</sub> = REBISE; MM<sub>3</sub> = Nambiyugá; T = testigo.

## 4.5 Componentes de biomasa

### 4.5.1 Biomasa fresca

En el Cuadro 9 se presentan diferencias significativas para los sistemas CN y MX con los valores más altos en el T, particularmente, en el peso fresco de tallo por efecto de los consorcios MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub>. Un potencial incremento en el desarrollo de la planta puede ser debido a la actividad de los microorganismos que se aplicaron y la combinación de los nutrientes presentes en los biofertilizantes (Afanador-Barajas *et al.*, 2021). De acuerdo a Javaid y Bajwa (2011) quienes reportaron que el desarrollo de biomasa de una leguminosa fue 70 y 50% mayor en las etapas de floración y madurez, respectivamente, con el uso de EM.

Sin embargo, las características fisicoquímicas de los biofertilizantes (Cuadro 4) indican bajo contenido en nutrientes por lo que no se puede atribuir los efectos positivos a un suministro adecuado de nutrientes a la planta por parte de los MM. Lo anterior sugiere considerar futuras investigaciones en la evaluación de la respuesta del maíz al contenido de nutrientes de la planta, como en otros estudios (Das *et al.*, 2007) e, incluso, el análisis de antagonismos entre microorganismos para determinar si alguno puede presentar inhibición dentro de los consorcios.

La importancia de esta variable radica en el aprovechamiento de los productores para su uso potencial en alimentación para el ganado; Cusicanqui y Lauer (1999) mencionaron que el rendimiento de forraje de maíz depende de los genotipos y densidad de población; aunque al aumentar esta última disminuyen la digestibilidad y la cantidad de proteína (Ayvar *et al.*, 2020).

Incrementar las densidades de siembra o una distribución espacial uniforme puede permitir que los cultivos tengan una cobertura del entresurco en menor tiempo, por lo que habrá mayor intercepción de la radiación solar, por lo tanto, mayor producción de biomasa, mientras no haya limitación nutricional o hídrica (Martínez, 2015).

En la Figura 9 se ilustra el peso total de biomasa fresca, sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los consorcios, pero hay una tendencia que indica que se obtuvo mayor peso con el tratamiento MM<sub>3</sub>.

Cuadro 9. Peso de biomasa fresca a los 90 días después de siembra

Tratamiento		Hojas (g)		Tallo (g)		Mazorca (g)		Raíz (g)	
		Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE
A G	MM <sub>1</sub>	93.25	8.69	222.87	18.13	200.12	23.18	89.37	17.97
	MM <sub>2</sub>	88.00	8.69	167.87	18.13	158.62	23.18	66.62	17.97
	MM <sub>3</sub>	99.50	8.69	223.12	18.13	214.37	23.18	90.43	17.97
	T	89.87	8.69	187.62	18.13	194.87	23.18	77.75	17.97
Significancia		NS		NS		NS		NS	
C N	MM <sub>1</sub>	138.38	12.06	418.50 ab	32.71	327.63	37.82	154.38	63
	MM <sub>2</sub>	124	12.06	295.75 b	32.71	286.50	37.82	74.13	63
	MM <sub>3</sub>	135.63	12.06	364.25 ab	32.71	252.38	37.82	232.50	63
	T	162.38	12.06	433.25 a	32.71	382.13	37.82	227.13	63
Significancia		NS		0.05789		NS		NS	
M X	MM <sub>1</sub>	90.88 b	13.23	232.38 ab	37.37	201.88	44.7	78.1 b	23.15
	MM <sub>2</sub>	75.88 b	13.23	171.88 b	37.37	212.00	44.7	72.8 b	23.15
	MM <sub>3</sub>	114.38 b	13.23	228.38 ab	37.37	247.50	44.7	102.8 ab	23.15
	T	172.63 a	13.23	353.13 a	37.37	340.25	44.7	171.00 a	23.15
Significancia		0.00284		0.04156		NS		0.05198	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). NS = No significativo; EE = error estándar; AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto; DDS = días después de siembra; MM<sub>1</sub> = La Frailescana; MM<sub>2</sub> = REBISE; MM<sub>3</sub> = Nambiyugá; T = testigo.

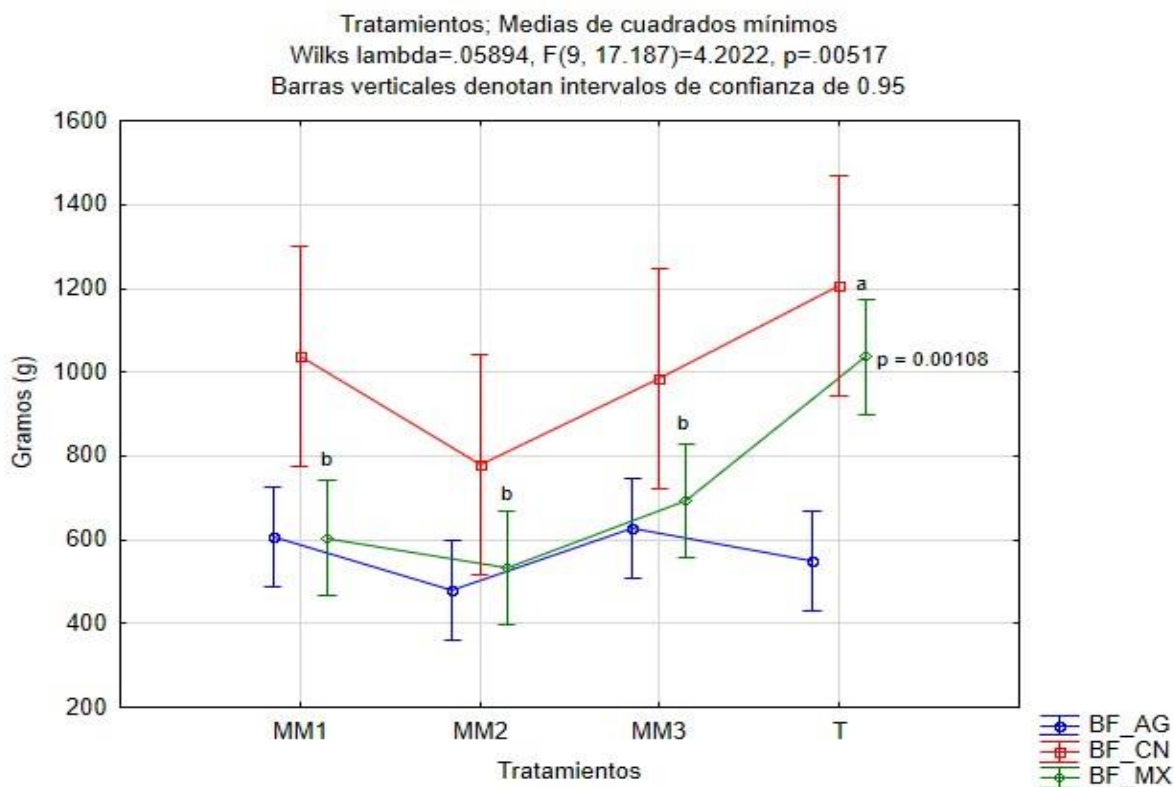


Figura 11. Peso total de biomasa fresca (BF) en los diferentes sistemas de manejo (AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto)

#### 4.5.2 Biomasa seca

En el sistema AG la biomasa seca (Cuadro 10) no presentó diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo, se observó una tendencia que el tratamiento MM<sub>3</sub> aportó una mayor cantidad de biomasa seca de follaje y raíz. En el sistema CN el tratamiento MM<sub>1</sub> fue altamente significativo respecto al peso de hojas, tallo y mazorca, seguido del tratamiento MM<sub>3</sub> en peso de hojas y tallo. Pérez-Luna *et al.* (2012) encontraron resultados similares en maíz amarillo con la aplicación de Humus y *Azospirillum* en Teopisca, Chiapas.

El maíz tiene una alta capacidad en producción de biomasa y elevado índice de cosecha; alrededor de la mitad de su peso seco en biomasa aérea corresponde a órganos reproductivos. Esto se debe a una elevada tasa fotosintética y a una adecuada estructura del cultivo (Martínez, 2015).

Cuadro 10.      Peso de biomasa seca a los 90 días después de siembra

Tratamiento		Hojas (g)		Tallo (g)		Mazorca (g)		Raíz (g)	
		Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE
AG	MM <sub>1</sub>	26.45	2.65	55.51	5.10	89.42	17.17	34.07	7.80
	MM <sub>2</sub>	23.75	2.65	39.79	5.10	71.22	17.17	24.62	7.80
	MM <sub>3</sub>	27.36	2.65	50.38	5.10	100.41	17.17	34.01	7.80
	T	23.63	2.65	43.43	5.10	96.45	17.17	23.84	7.80
Significancia		NS		NS		NS		NS	
CN	MM <sub>1</sub>	47.95 a	2.55	112 a	9.58	195.71 a	21.59	85.95	13.47
	MM <sub>2</sub>	37.96 b	2.55	72.14 b	9.58	125.84 b	21.59	35.95	13.47
	MM <sub>3</sub>	41.48 ab	2.55	96.25 ab	9.58	99.95 b	21.59	62.09	13.47
	T	48.31 a	2.55	103.59 ab	9.58	198.49 a	21.59	81.60	13.47
Significancia		0.04762		0.07629		0.02212		NS	
MX	MM <sub>1</sub>	26.10 b	3.30	51.17 b	2.92	89.98 c	5.04	29.42 b	9.44
	MM <sub>2</sub>	17.72 b	3.30	43.42 b	2.92	59.36 d	5.04	23.56 b	9.44
	MM <sub>3</sub>	28.11 b	3.30	48.25 b	2.92	109.54 b	5.04	37.85 b	9.44
	T	40 a	3.0	74.85 a	2.92	130.32 a	5.04	73.43 a	9.44
Significancia		0.00731		0.00015		0.00002		0.01899	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). NS = No significativo; EE = error estándar; AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto; DDS = días después de siembra; MM<sub>1</sub> = La Frailecana; MM<sub>2</sub> = REBISE; MM<sub>3</sub> = Nambiyugúá; T = testigo.

En la Figura 10 se observa un mayor volumen de peso total de biomasa seca en el sistema CN, donde el consorcio MM<sub>1</sub> sobresalió con una diferencia estadística significativa, aún por encima del T.

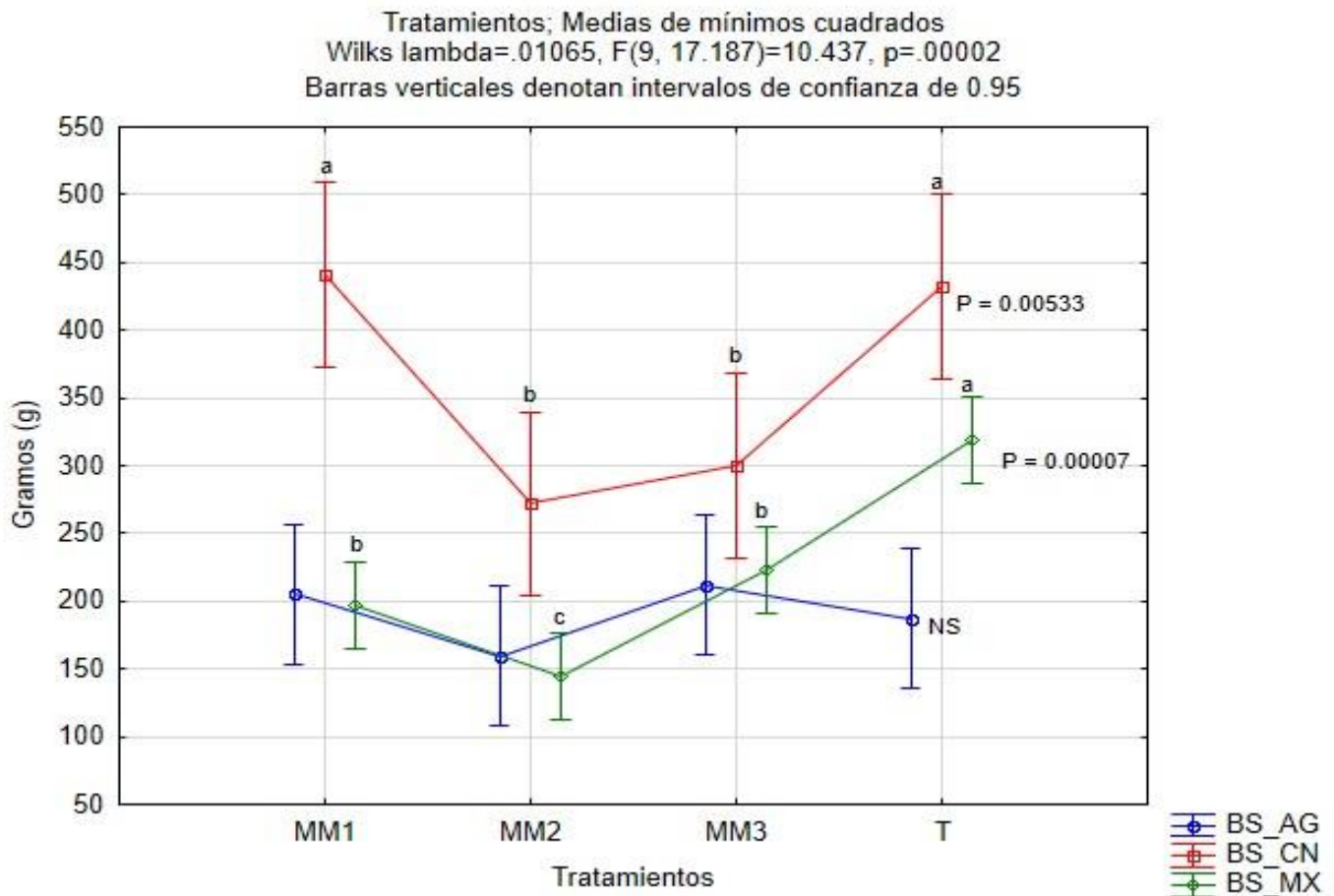


Figura 12. Peso total de biomasa seca (BS) en los diferentes sistemas de manejo (AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto)

Con base en los resultados del análisis de secuenciación, se sabe que en la estructura de la comunidad bacteriana en los biofertilizantes predominaron diferentes géneros tal como *Lactobacillus* y *Acetobacter*. Se ha documentado la capacidad de ambos géneros para estimular el crecimiento vegetal en gramíneas, frutales y hortalizas (Dibut *et al.*, 2009; Jogaiah *et al.*, 2010; Prabudoss, 2011); además, las BAL tienen un amplio espectro para producir ácido indol-3-acético (IAA) (Mohite, 2013; Lamont *et al.*, 2017). Javaid (2011) aplicó un biofertilizante con BAL, a un suelo con enmienda de estiércol de corral, que mejoró el crecimiento de raíces y la biomasa aérea en arroz (*Oriza sativa* L.). Varios autores reportaron que la aplicación de *Lactobacillus plantarum* incrementó el largo de las raíces y la altura de la planta como el

*Lycopersicon esculentum* (Limanska *et al.*, 2013) e indujo la germinación de cereales y el crecimiento vegetal (Quattrini *et al.*, 2018).

Es difícil apuntar a un factor en específico que pueda estimular el crecimiento de la planta cuando un biofertilizante se aplica al suelo. Por ejemplo, aunque se ha demostrado que *Lactobacillus* es un bioestimulante para el desarrollo vegetativo sus mecanismos permanecen inciertos (Lamont *et al.*, 2017). De un cultivo de estas BAL sólo algunas tienen propiedades para mejorar los cultivos (Lutz *et al.*, 2012) y en la misma planta se pueden producir cambios morfológicos diferentes (Rzhevskaya *et al.*, 2014).

El éxito de los biofertilizantes en diferentes agroecosistemas puede estar influenciado de diferentes factores, como los que se estudian en esta investigación, además de otros como la composición de exudados de raíces, la microbiota nativa, las condiciones climáticas, etc. (Santos y Parra, 2020). Para los productores, la producción de biomasa seca es importante porque representa un insumo que se puede producir dentro de la parcela y un porcentaje puede ser utilizado como alimento para el ganado, con contenidos reducidos de aceites y proteína y un alto porcentaje de carbono que lo hace más económico en cuanto a la energía necesaria para producir su materia seca, en comparación con otros cultivos como la soya o el girasol (Martínez, 2015). El resto de los residuos de cosecha puede ser incorporado al suelo como un aportador de carbono por excelencia, al tiempo que protege al suelo de la erosión e incrementa la actividad biológica.

Tanto la biomasa total fresca como la seca, ofrecen una tendencia de los resultados que los productores pueden obtener en el rendimiento final del maíz, tal es el caso de los tratamientos MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> que demostraron mejores efectos sobre la producción de biomasa en el cultivo.

#### **4.6 Rendimiento de grano**

La Frailesca destaca con un rendimiento promedio de 3.44 t ha<sup>-1</sup>, por encima de la media estatal de 1.66 t ha<sup>-1</sup>. En el Cuadro 11 se observan rendimientos superiores a la media regional y estatal. La fertilización química aporta los requerimientos nutricionales necesarios de N para la planta, por lo tanto, el tratamiento testigo obtuvo mayores rendimientos dentro de los tres sistemas de manejo y fue estadísticamente diferente en los sistemas AG y MX. Martínez *et al.* (2018) encontraron rendimientos de 5.9 t ha<sup>-1</sup> con una combinación de fertilización química y biofertilización de *Azospirillum brasilense*.

Sin embargo, entre los consorcios, hay una tendencia que indica que MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> tienen mejores efectos sobre el cultivo, particularmente, en el sistema AG. Este efecto puede atribuirse a un mayor crecimiento de las raíces y a una mayor producción de biomasa aérea por la estimulación de los microorganismos benéficos, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación. Para futuras investigaciones, se puede sugerir el uso de los MM en



combinación con abonos orgánicos, por ejemplo, Khaliq *et al.* (2006) encontraron un incremento en el rendimiento del algodón en un 23% en comparación con tratamientos con abonos sin EM.

Cuadro 11. Rendimiento del cultivo de maíz (t ha<sup>-1</sup>)

Tratamiento	Sistema AG		Sistema CN		Sistema MX	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE
MM <sub>1</sub>	8.69 ab	0.83	7.47	0.43	8.15 b	0.27
MM <sub>2</sub>	8.54 b	0.83	7.21	0.43	7.17 c	0.27
MM <sub>3</sub>	9.06 ab	0.83	8.26	0.43	7.99 bc	0.27
T	9.78 a	0.83	8.07	0.43	9.98 a	0.27
Significancia	0.10979		NS		0.00031	

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Duncan,  $p \leq 0.05$ ). NS = No significativo; EE = error estándar; AG = agroecológico; CN = convencional; MX = mixto; DDS = días después de siembra; MM<sub>1</sub> = La Frailescana; MM<sub>2</sub> = REBISE; MM<sub>3</sub> = Nambiyugá; T = testigo.

Varios estudios demuestran que el uso de consorcios microbianos permite incrementar el rendimiento de grano. Al respecto, Caballero-Medano (2014) encontró un aumento entre 5 – 30% y, en promedio, para México un incremento de 26% bajo diferentes tipos de suelo, clima y variedad de cultivo. Así también, se ha encontrado que la inoculación al suelo y foliar de *Acetobacter diazotrophus* en cultivos de camote logró un incremento de 48-51% en el rendimiento agrícola (Dubati *et al.*, 2009).

Cabe mencionar que la estructura de las comunidades microbianas de los MM es similar a los EM comerciales, los cuales tienen potencial para mejorar la productividad de los cultivos. Hu y Qi (2013) reportaron que los rendimientos de trigo en parcelas bajo el efecto de EM fueron de 3.9% y 14.04% mayores que en parcelas tratadas con composta y fertilizantes de N y P, respectivamente; y sugieren que la aplicación a largo plazo de estos microorganismos puede

inferir en la estructura de las comunidades de los nematodos, cuyo aumento de población en el suelo se correlaciona con el rendimiento de granos y la producción de biomasa. Otros estudios han reportado que el uso de EM mejoraron el rendimiento de cultivos, hasta 29% en cebolla, 31% en frijoles y 23% en maíz (Daly y Stewart, 1999).

#### **4.7 Reflexiones finales**

De acuerdo a los resultados de la investigación se observaron diferentes respuestas sobre el suelo y el maíz entre los diferentes tipos de agroecosistemas. Es muy difícil predecir el comportamiento de una especie en particular y que incluso se vuelva predominante en un ambiente altamente competitivo como el suelo, las condiciones del ambiente son factores que determinan la dinámica de los ecosistemas hacia un equilibrio ecológico.

Dentro de los tratamientos, MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> presentaron mejores efectos sobre el rendimiento final del maíz en los sistemas AG y MX; sin embargo, sobresalieron los valores en el testigo. Esto puede estar relacionado a una mayor capacidad de adaptación de las estructuras microbianas en suelos con mayor cantidad de materia orgánica, donde se propicia la liberación de secreciones bacterianas, micelios y actividad enzimática microbiana para la formación de agregados en el suelo; y que, a su vez, contribuye a una microbiota saludable, la cual es vital para que sucedan los procesos biogeoquímicos, como la formación de suelo, la fertilidad del suelo y el almacenamiento de carbono (Bardgett y van der Putten, 2014). Sin embargo, la conversión de sistemas de producción con manejo convencional a agroecológico requiere de la diversificación de especies y el manejo orgánico del suelo (Altieri y Nicholls, 2007).

Por ello, resulta indispensable implementar prácticas de manejo agroecológicas, como la rotación de gramíneas con leguminosas, que garanticen un balance positivo de nutrientes y el uso eficiente de los recursos del sistema suelo-planta, disminuyendo la degradación de la materia orgánica (Grandy *et al.*, 2006; Sisti *et al.*, 2004). Por ejemplo, mantener una cubierta de materia orgánica sobre el suelo, como la práctica de incorporación de rastrojo, provee la principal fuente de carbono lábil de la cual los microorganismos obtienen la mayor parte de su energía (Pedraza *et al.*, 2010). Así como los diseños espaciales y temporales que promuevan las sinergias entre la biodiversidad arriba y debajo del suelo (Altieri y Nicholls, 2007).

En este sentido, combinar abonos orgánicos con MM puede acelerar la asimilación de nutrientes desde las raíces. A largo plazo, los procesos microbianos pueden contribuir a mejorar la calidad del suelo que, además de sostener la productividad agrícola y prevenir la contaminación del agua y el aire, podría presentar valores superiores a los encontrados en el testigo donde hubo aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos, como en el caso del sistema AG.

Por ejemplo, Prabudoss (2011) reportó que al combinar la fertilización química (NPK) con la inoculación de *Acetobacter* (*Gluconacetobacter diazotrophicus*) aumentó significativamente los parámetros de crecimiento y rendimiento en gramíneas, como la caña de azúcar y otros cultivos ricos en azúcares. Con base en lo anterior, es posible reducir la aplicación entre un 25-50% de fertilizantes químicos, así como la reducción de costos de producción que conlleva su utilización.

Una vez que se elimine progresivamente la utilización de insumos químicos y se sustituyan por alternativas ecológicas y estrategias de manejo integral de los componentes del ecosistema, se puede avanzar al rediseño de los agroecosistemas (Gliessman, 1998) de tal forma que el reciclaje de energía se mueva dentro del sistema dejando a un lado el modo de producción agroextractivista, centrada en el productivismo. Si bien, los resultados obtenidos con la aplicación de los tratamientos no demuestran ser contundentes, es ampliamente recomendable continuar con evaluaciones posteriores en el uso de MM en el cultivo de maíz.

También se pueden considerar otros estudios, como los de Castro-Barquero y González-Acuña (2021) quienes evaluaron los factores clave que afectan la calidad de la fase líquida de MM, tales como el tiempo de activación, aireación, presencia de nutrientes, entre otros. Esto con el fin de optimizar la calidad de los consorcios microbianos y adecuar las proporciones más eficientes para un mejor aprovechamiento de los mismos.

## 5. CONCLUSIONES

Dentro de los biofertilizantes de MM se encontró bacterias del género *Acetobacter* y *Lentilactobacillus* que pueden estar asociadas a efectos positivos sobre el desarrollo del cultivo de maíz y el rendimiento agrícola.

Los MM aplicados al suelo no presentaron mejoras significativas sobre las propiedades fisicoquímicas en un ciclo de cultivo. Es necesario evaluar el efecto sobre el suelo en un periodo de tiempo mayor a cinco años para observar una tendencia en el comportamiento de los MM sobre el suelo.

Los consorcios microbianos mejoraron el crecimiento y la producción de biomasa del cultivo de maíz, de los cuales MM<sub>1</sub> y MM<sub>3</sub> fueron los que obtuvieron los mayores efectos estadísticamente significativos entre los tratamientos, los cuales podrían adaptarse mejor a las condiciones de los sistemas de cultivo o compartir características similares con las poblaciones presentes en estos sistemas.

## 6. LITERATURA CITADA

- Acosta-Almánzar, H. A. (2011). *Microorganismos eficientes de montaña: evaluación de su potencial bajo manejo agroecológico de tomate en Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). p. 23-25.
- Aguilar-Jiménez, C. E., Tolón-Becerra, A. y Lastra-Bravo, X. (2011). Evaluación integrada de la sostenibilidad ambiental, económica y social del cultivo de maíz en Chiapas, México. (U. N. Cuyo, Ed.) *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 43(1), 155-174.
- Alarcón, A., Davies, F. T., Egilla, J. N., Fox, T. C., Estrada-Luna, A. A. y Ferrera-Cerrato, R. (2002). Short term effects of *Glomusclaroideum* and *Azospirillum brasilense* on growth and root acid phosphatase activity of *Carica papaya* L. under phosphorus stress. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 44, 31-37.
- Alori, E. T., Dare, M. O., y Babalola, O. O. (2017). Microbial inoculants for soil quality and plant health. (E. Lichtfouse, Ed.) *Sustainable Agriculture Reviews*, 281-307.
- Alori, E. T., Glick, B. R. y Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, 971.
- Altieri, M. A. (2002). Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentable. En: SARANDON, SJ. *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*. Buenos Aires
- Altieri, M. y Nicholls, C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*, 16(1), 3-12. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/133>
- Álvarez-Solís, J. D., y Anzueto-Martínez, J. (2004). Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los Altos de Chiapas. *Agrociencia*, 38, 13-22.
- Asia-Pacific Natural Agriculture. (1995). EM Application Manual for APNAN Countries, M. Shintani (ed.) 1st. edn. Asia-Pacific Natural Agriculture Network, Bangkok, Thailand.
- Ayvar-Serna, S., Díaz-Nájera, J. F., Vargas-Hernández, M., Mena-Bahena, A., Tejeda-Reyes, M. A. y Cuevas-Apresa, Z. (2020). Rentabilidad de sistemas de producción de grano y forraje de híbridos de maíz, con fertilización biológica y química en trópico seco. *Terra Latinoamericana*, 38, 91-16. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38il.507>

- Bajsa, N.; Morel, M. A.; Braña, V. y Castro-Sowinski, S. (2013). The effect of agricultural practices on resident soil microbial communities: focus on biocontrol and biofertilization. *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere*, 2, 687-700.
- Bardgett, R. D., y van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511. doi:10.1038/nature13855
- Benzing, A. (2001). Agricultura orgánica. Fundamentos para la región Andina. Neckar-Verlag, Villingen-Schwenningen, Alemania. 682 p.
- Bhardwaj, D. P., Lundquist, P. y Alstrom, S. (2008). Arbuscular mycorrhizal fungal spore-associated bacteria affect mycorrhizal colonization, plant growth and potato pathogens. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 2494-2501.
- Blanco-Canqui, H., y Francis, A. C. (2016). Building resilient soils through agroecosystem redesign under fluctuating climatic regimes. *Journal of soil and water conservation*, 71(6), 127-133.
- Bonilla-Correa, C. R., Gómez-López, E. D. y Sánchez-de Pragger, M. (2002). *El suelo: los organismos que lo habitan*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Borgnia, M., Maggi, A. M., Arriaga, M., Aued, B., Vilá, B. L. y Cassini, M. H. (2006). Caracterización de la vegetación en la Reserva de Biósfera Laguna Blanca (Catamarca, Argentina). (Asociación Argentina de Ecología, Ed.) *Ecología Austral*, 16, 29-45.
- Caballero-Mellado J. (2014). *El género Azospirillum*. Programa de Ecología Molecular y Microbiana, Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno. UNAM.
- Camacho Velázquez, D. (2008). *La lucha sigue y sigue: organización popular en la Frailesca*. México: UNAM.
- Campos-Martínez, A., Acosta-Sánchez, R. L., Morales-Velasco, S. y Prado, F. A. (2014). Evaluación de microorganismos de montaña (MM) en la producción de acelga en la Meseta. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(1), 79-87.
- Carter, M. R. (2002). Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*, 94(1), 38-47.
- Castro B., L., Murillo R, M., Uribe L., L. y Mata C., R. (2015). Inoculación al suelo con *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum oryzae*, *Bacillus subtilis* y microorganismos de montaña y su efecto sobre un sistema de rotación soya-tomate bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 21-36.

- Castro-Barquero, L. y González-Acuña, J. (2021). Factores relacionados con la activación líquida de microorganismos de montaña (MM). *Agronomía Costarricense* 45(1), 81-92.
- Cepeda G., M. F., Lasch, C., Núñez, J. O., Morales, M. y González, J. (2010). *Planeación para la conservación del cerro Nambiyuguá: un esfuerzo conjunto para su protección*. Mérida, The Nature Conservancy, USDA, CONANP.
- Chaparro, J., Sheflin, A., Manter, D., y Vivanco, J. (2012). Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. *Biology and fertility of soils*, 48, 489-499.
- Chaudhary, P., Sharma, A., Chaudhary, A., Khatri, P., Gangola, S., Maithani, D. (2021). Illumina based high throughput analysis of microbial diversity of maize rhizosphere treated with nanocompounds and *Bacillus* sp. *Applied Soil Ecology*, 159: 103836
- Chávez-Díaz, I. F., Zelaya-Molina, L. X., Cruz-Cárdenas, C. I., Rojas-Anaya, E., Ruíz-Ramírez, S. y Santos-Villalobos, S. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1423-1436.
- Compant, S., Clément, C. y Sessitsch, A. (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizosphere and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 669-678.
- Cotler-Ávalos, H., y Cuevas-Fernández, M. L. (2017). *Estrategias de conservación de suelos en agroecosistemas de México*. CDMX, México: Fundación Río Aonte, I.A.P.
- Cristóbal-Acevedo, D., Álvarez-Sánchez, M. E., Hernández-Acosta, E., y Améndola-Massiotti, R. (2011). Concentración de nitrógeno por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 325-332.
- D'Alessandro, R. y González, A. A. (2017). La práctica de la mila, el ch'ulel y el maíz como elementos articuladores de la cosmovisión sobre la naturaleza entre los tzeltales de Tenejapa en los Altos de Chiapas. *Estudios culturales mayas*, 50, 271-297.
- Daly, M. J. y Stewart, D. P. C. (1999). Influence of "Effective Microorganisms (EM) on Vegetable Production and Carbon Mineralization – A Preliminary Investigation. *Journal Sustainable Agricultural*, 14, 15-25. DOI: 10.1300/J064v14n02\_04
- Das, K., Dang, R., Shivananda, T. N. y Sekeroglu, N. (2007). Influence of bio-fertilizers on the biomass yield and nutrient content in *Stevia rebaudiana* Bert. grown in Indian subtropics. *Journal of Medicinal Plants Research*, 1(1), 005-008.

- Das, K., Katiyar, V. y Goel, R. (2003). 'P' solubilization potential of plant growth promoting *Pseudomonas* mutants at low temperature. *Microbiological Research*, 158, 359–362.
- de-Bashan, L. E., Holguin, G., Glick, B. R. y Bashan, Y. (2007). Bacterias promotoras de crecimiento en plantas para propósitos agrícolas y ambientales. En: Ferrera-Cerrato, R. y Alarcón, A. *Microbiología Agrícola: hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico, planta-microorganismo* (pp. 170-224). Ciudad de México, México: Editorial Trillas.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Reich, P. B., Jeffries, T. C., Gaitan, J. J., Encinar, D., Berdugo, M., Campbell, C. D. y Singh, B. K. (2016). Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 7(1), 1-8.
- Diacono, M. y Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos*. Recuperado el 18 de noviembre de 2019, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC050674/>
- Díaz Barragán, O. A., Montero Robayo, D. M. y Lagos Caballero, J. A. (2009). Acción de microorganismos eficientes sobre la actividad de intercambio catiónico en plántulas de acacia (*Acacia melanoxylon*) para la recuperación de un suelo del municipio de Mondoñedo, Cundinamarca. *Colombia Forestal*, 12: 141-160.
- Díaz-Raviña, M., Acea, M. J., y Carballas, T. (1993). Microbial biomass and its contribution to nutrients concentrations in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25, 25-31.
- Díaz-Rodríguez, A. M., Salcedo, L. A., Felix, C. M., Parra-Cota, F. I., Santoyo, G., Puente, M. L. Bhattacharya, D., Mukherjee, J. y De los Santos, V. S. (2021). The current and future role of microbial culture collections in food security worldwide. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 614739.
- Dibut, B., Martínez-Viera, R., Ortega, M., Ríos, Y., Tejeda, G., Planas, L. y Rodríguez, J. (2009). Situación actual y perspectiva de las relaciones endófitas planta-bacteria. Estudio de caso *Gluconacetobacter diazotrophicus* – Cultivos de importancia económica. *Cultivos Tropicales*, 30(4), 16-23.
- Dibut, B., Martínez-Viera, R., Ortega, M., Ríos, Y., Tejeda, G., Planas, L. y Rodríguez, J. (2009). Situación actual y perspectiva de las relaciones endófitas planta-bacteria. Estudio de caso



Gluconacetobacter diazotrophicus-Cultivos de Importancia Económica. *Cultivos Tropicales*, 30(4), 16-23.

Dibut-Álvarez, B. L., Ortega-García, M. y Ríos-Rocafull, Y. (2021). Estudio de la asociación Gluconacetobacter diazotrophicus-viandas tropicales. Efecto sobre el rendimiento en condiciones de extensión. *Cultivos Tropicales*, 42(3), e03.

Espinosa, J. y Molina, E. (1999). La acidez y encalado de suelos. International Plant Nutrition Institute. Quito, Ecuador.

Etchevers, J. D., Saynes, V., y Sánchez, M. (2016). Manejo sustentable del suelo. En D. M. Martínez-Carrera y J. Ramírez-Juárez. *El sistema agroalimentario de México* (pp. 63-79). Colegio de Postgraduados, AMC, CONACYT-UPAEP-IMINAP.

Ferrera, R., y Alarcón, A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *CIENCIA ergo-sum*, 8(2), 175-183. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=104/10402108>

Formowitz, B., Elango, F., Okumoto, S., Müller, T. y Buerkert, A. (2007). The role of “effective microorganisms” in the composting of banana (*Musa ssp.*) residues. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170: 649-656. DOI: 10.1002/jpln.200700002

Gajbhiye, M. H. y Kapadnis, B. P. (2016). Antifungal activity producing lactic acid bacteria as biocontrol agents in plants. *Biocontrol Science and Technology*, 26, 1451-1470.

Galdámez, J., Aguilar, C. E., Jiménez, A., Gutiérrez, S., y Mendoza y Martínez, F. B. (2008). *Evolución y perspectivas de la producción de maíz en el estado de Chiapas, México*. II Seminario de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos. Sostenibilidad e Indicadores.

García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, 35(2), 125-138.

Giassi, V., Kiritani, C. y Kupper, K. C. (2016). Bacteria as growth-promoting agents for citrus rootstocks. *Microbiological Research*, 190, 46-54.

González Esponda, J. (2016). *De la finca al ejido: historia que narra la fundación de ejidos en el primer valle de la Frailesca, 1915-1940*. Universidad Autónoma de Chiapas.

González F., H. y Fuentes M., N. Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 17-31. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173401.60>.

- Grandy, A. S., Robertson, G.P., Thelen, K.D. (2006). Do productivity and environmental trade-offs justify periodically cultivating No-till cropping systems? *Agronomy Journal*, 98:1377-1383.
- Guevara, M., C. Aguilar, C. Arroyo, F. González y J. Larson. (2012). La diversidad de los datos sobre los suelos de México: perfiles y clases, escalas y modelos continuos. Conabio. *Biodiversitas*, 105, 13-16.
- Guevara-Hernández, F., Rodríguez-Larramendi, L. A., Hernández-Ramos, M. A., Pinto-Ruiz, R. y Reyes-Muro, L. (2015). Eficiencia energética y económica del cultivo de maíz en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera "La Sepultura", Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1929-1941.
- Gutiérrez-Sarmiento, W., Sáyago-Ayerdi, S. G., Goñi, I., Gutiérrez-Miceli, F. A., Abud-Archila, M., Rejón-Orantes, J. C., Rincón-Rosales, R., Peña-Ocaña, B. A. y Ruíz-Valdiviezo, V. M. (2020). Changes in intestinal microbiota and predicted metabolic pathways during colonic fermentation of mango (*Mangifera indica* L.) –based bar indigestible fraction. *Nutrients*, 12(683), 1-18.
- Hartemink, A. E. (2003). *Soil fertility decline in the tropics with case studies on plantations*. CABI Publishing. England.
- Higa, T. y Parr, J. F. (1994). Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment. International Nature Farming Research Center. Atami, Japan.
- Higa, T. y Wididana, P. (1991). The concepts and theories of effective microorganisms. En *Proceedings of the first international conference on Kyusei nature farming* (pp. 118-124). US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Hu, C. y Qi, Y. (2013). Effective microorganisms and compost favor nematodes in wheat crops. *Agronomy for Sustainable Development*. 33, 573-579. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0130-9>
- Ibarra-Villarreal, A., Gándara-Ledezma, A., Godoy-Flores, A., Díaz-Rodríguez, A. M., Parra-Cota, F. I. y De los Santos, V. S. (2021). Salt-tolerant bacillus species as promising strategy to mitigate the salinity stress in wheat (*Triticum turgidum* subsp. *Durum*). *Journal of Arid Environments*, 186, 104399.
- INEGI. (2012). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI. (2013). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía Anuario Estadístico y Geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). *Climate change 2014: synthesis report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Pachauri, R. y Meyer, L.).

Jansson K., J. y Hofmockel S., K. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*.

Javaid, A. (2011). Effects of biofertilizers combined with different soil amendments on potted rice plants. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71, 158-162.

Jogaiah, S., Shivanna, R. K., Gnanaprakash, P. H. y Hunthrike, S. S. (2010). Evaluation of plant growth-promoting Rhizobacteria for their efficiency to promote growth and induce systemic resistance in pearl millet against downy mildew disease. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 43(4), 368–378. doi:10.1080/03235400701806377

Johnston-Monje, D., Lundberg, D.S., Lazarovits, G., Reis, V.M. y Raizada, M.N. (2016). Bacterial populations in juvenile maize rhizospheres originate from both seed and soil. *Plant Soil*, 405 (1), 337–355.

Joshi. H.; Somduttand, C. P. y Mundra, S. L. (2019). Role of effective microorganisms (EM) in sustainable agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(3), 172-181.

Jousset, A., Rochat, L., Scheu, S., Bonkowski, M. y Keel, C. (2010). Predator-prey chemical warfare determines the expression of biocontrol genes by rhizosphere-associated *Pseudomonas fluorescens*. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, 76(15), 5263-5268.

Khaliq, A., Abbasi M. K. y Hussain, T. (2006). Effect of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganisms (EM) on seed cotton yield in Pakistan. *Bioresource Technology*, 97, 967–972. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.05.002

Khan, M. N. y Mohammad, F. Eutrophication: challenges and solutions. En *Eutrofización: causas, consecuencias y control*. Vol. 2 (eds. Ansari, A. y Gill, S.) 1-15. Springer.

Kibblewhite, M. G., Ritz, K., y Swift, M. J. (2015). Soil health in agricultural systems. *The Royal Society*, 363.

- Kumar, A., y Verma, J. P. (2018). Does plant-microbe interaction confer stress tolerance in plants: a review. *Microbiological Research*, 207, 41-52.
- Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K. y Kartal, B. 2018. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16, 263-276.
- Labrador Moreno, J. 2002. La materia orgánica en los agrosistemas. (2a. edición). Mundi-Prensa. Madrid, España. ISBN: 9788484760450
- Lamont, J. R., Wilkins, O., Bywater-Ekegård, M. y Smith, D. L. From yogurt to yield: potential applications of lactic acid bacteria in plant production. *Soil Biol. Biochem.* 111, 1-9.
- Larsbrink, J., y McKee, L. S. (2019). Bacteroidetes bacteria in the soil: Glycan acquisition, enzyme secretion, and gliding motility. *Advances in Applied Microbiology*. DOI:10.1016/bs.aambs.2019.11.001
- León López, A., Guzmán Gómez, E., López Martínez, F., Romaní Cortés, J., y Ruíz Meza, L. E. (2004). Relaciones de género en el acceso a la tierra: estudio de tres ejidos en situación de pobreza. Espacio autónomo, A. C. México. P. 49-87.
- Limanska, N., Ivanytsia, T., Basiul, O., Krylova, K., Biscola, V., Chobert, J. M., Ivanytsia, V., y Haertle, T. (2013). Effect of *Lactobacillus plantarum* on germination and growth of tomato seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 1587-1595.
- López Baez, W., Reynoso Santos, R., López Martínez, J., Villar Sánchez, B., Camas Gómez, R. y Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la región Fraylesca, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1): 65-79. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.848>.
- López Baez, W., Reynoso Santos, R., López Martínez, J., Villar Sánchez, B., Camas Gómez, R. y García Santiago, J. O. (2010). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(4). DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>
- López-Valdez, F. *et al.* (2011). A strain of *Bacillus subtilis* stimulates sunflower growth (*Helianthus annuus* L.) temporarily. *Scientia Horticultura*, 128 (4), 499-505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.02.006>
- Loroña Calderón, F., Gómez L., W., Jaco R., E., Reynaga L., C., Guiño S., M., Gamarra T., J., Díaz H., F., Huaman B., N., Rafael G., P., Mayte Q., J., Moran C., M., Carhuancho A., L. C. (2018). Eficiencia de la biorremediación de suelos contaminados con Diesel B5 mediante Microorganismos Eficaces (EM). *Cátedra Villareal*, 6(2): 189-209.

Lutz, M. P., Michel, V., Martínez, C. y Camps, C. (2012). Lactic acid bacteria as biocontrol agents of soil-borne pathogens. *Biological Control of Fungal and Bacterial Plant Pathogens*. IOBC-WPRS Bulletin. 78, 285-288.

Maier, M., Pepper, I., y C., G. (2009). *Environmental Microbiology*. San Diego: Academic Press.

Makarova, K., Slesarev, A., Rolf, Y., Sorokin, A., Mirkin, B., Koonin, E., Pavlov, A., Pavlova, N., Karamychev, V., Polouchine, N., Shakhova, V., Grigoriev, I., Lou, Y., Rohksar, D., Lucas, S., Huang, K., Goodstein, D. M., Hawkins, T., Plengvidhya, V., Welker, D., Hughes, J., Goh, Y., Benson, A., Baldwin, K., Lee, J-H., Díaz-Muñiz, I., Dosti, B., Smeianov, V., Wechter, W., Barabote, R., Lorca, G., Altermann, E., Barrangou, R., Ganesan, B., Xie, Y., Rawsthorne, H., Tamir, D., Parker, C., Breidt, F., Broadbent, J., Hutkins, R., O'Sullivan, D., Steele, J., Unlu, G., Saier, M., Klaenhammer, T., Richardson, P., Kozyavkin, S., Weimer, B., y Mills, D. (2006). Comparative genomics of the lactic acid bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 103: 15611-15616.

Martínez Aguilar, F. B., Guevara Hernández, F., La O Arias, M. A., Rodríguez Larramendi, L. A., Pinto Ruiz, R., y Aguilar Jiménez, C. E. (2020). Caracterización de productores de maíz e indicadores de sustentabilidad en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 1031-1042.

Martínez Álvarez, D. (2015). Ecofisiología del cultivo de maíz. En Gray, J. A. y Cruz Colazo, J. (Ed.), *El cultivo de maíz en San Luis* (7 – 31). INTA Ediciones.

Martínez Reyes, L., Aguilar Jiménez, C. E., Carcaño Montiel, M. G., Galdámez Galdámez, G., Gutiérrez Martínez, A., Morales Cabrera, J. A., Martínez Aguilar, F. B. y Gómez Padilla, E. (2018). Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra*, 1.

Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A., Reyes-Sosa, M. B y La O-Arias, M. A. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana* 38: 871-881. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>

Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., La O-Arias, M. A., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A. y Pinto-Ruiz, R. (2021). Tipificación socio-agronómica y energética de productores de maíz en la región Frailesca, Chiapas, México. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 38: 176-198. DOI: [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v38.n1.09](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n1.09)

Mashiane, R.A., Ezeokoli, O.T., Adeleke, R.A. y Bezuidenhout, C.C. (2018). Metagenomic analyses of bacterial endophytes associated with the phyllosphere of a Bt maize cultivar and its isogenic parental line from South Africa. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33, 80.

Mayer, J., Scheid, S., Widmer, F., Fließbach, A. y Oberholzer, H. R. (2010). How effective are “Effective microorganisms” (EM)? Results from a field study in temperate climate. *Applied Soil Ecology*, 46, 230-239.

Megali, L., Glauser, G. y Rasmann, S. (2013). Fertilization with beneficial microorganisms decreases tomato defenses against insect pests. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 649-656.

Mendes, R., Kruijt, M., de Bruijn, I., Dekkers, E., van der Voort, M., Schneider, J., Piceno, Y. M., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L., Bakker, P., y Raaijmakers, J. M. (2011). Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. *Science*, 332, 1097-1100.

Mendoza Pérez, S., Aguilar Jiménez, C. E., Galdámez Galdámez, J., Gutiérrez Martínez, A. y Martínez Aguilar, F. B. (2007). Los suelos ácidos en la producción agrícola de la región Frailesca, Chiapas, México. I Seminario de Cooperación y Desarrollo en Espacios Rurales Iberoamericanos. Sostenibilidad e Indicadores. *Almería*, 16-17.

Miller, P. R., D. E. Buschena, C. A. Jones, and J. A. Holmes. 2008. Transition from intensive tillage to no-tillage and organic diversified annual cropping systems. *Agronomy Journal*, 100: 591-599.

Mohite, B. (2013). Isolation and characterization of indole acetic acid (IAA) producing bacteria from rhizospheric soil and its effect on plant growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 638-649.

Molinari Medina, C. 2012. *Hay maíz, hay frijol, pero dinero no hay*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

Montagnini, F. y Jordan, C.F. (2002) Reciclaje de nutrientes. En: Guariguata, M.R., Kattan, G.H. (eds). *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Libro Universitario Regional. Cartago. 691 pp.

Morocho, M. T. y Leiva-Mora, M. 2019. Artículo de revisión: microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola*, 46(2): 93-103.

Morón, A., Martino, D. y Sawchik, J. (1996). *Manejo y fertilidad de suelos*. Serie Técnica No. 76. INIA. Montevideo, Uruguay. ISBN: 9974-38-063-4.

Navarro-Noya, Y. E., Jiménez-Aguilar, A., Valenzuela-Encinas, C., Alcántara-Hernández, R. J., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Ponce-Mendoza, A., Luna-Guido, M., Marsh, R. y Dendooven, L. (2014). Bacterial Communities in Soil Under Moss and Lichen-Moss Crusts. *Geomicrobiology Journal*, 2, 152-160. DOI:10.1080/01490451.2013.820236

Ney, L., Franklin, D., Mahmud, K., Cabrera, M., Hancock, D., Habteselassie, M., Newcomer, Q. y Dahala, S. (2020). Impact of inoculation with local effective microorganisms on soil nitrogen cycling and legume productivity using composted broiler litter. *Applied Soil Ecology*, 154, 103567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103567>

Ning, C., Gao, P., Wang, B., Lin, W., Jiang, N., y Cai, K. (2017). Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1819–1831. DOI:10.1016/s2095-3119(16)61476-4

Núñez, M. A. (2000). Manual de técnicas agroecológicas. 1ª edición. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. México.

Nuzzo, A., Satpute, A. Albrecht, U. y Strauss, S. L. (2020). Impact of soil microbial amendments on tomato rhizosphere microbiome and plant growth in field soil. *Microb. Ecol.* <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01497-7>

Ochoa-Carreño, D., y Montoya-Restrepo, A. (2010). Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y reflexión*, 18(2), 55-74.

Odum, E. (1971). *Fundamentals of ecology* (Tercera ed.). Philadelphia, Estados Unidos: W. B. Saunders.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (15 de agosto de 2021). *Portal de Suelos de la FAO*. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>

Pandey, A., y Yarzabal, L. (2019). Bioprospecting cold-adapted plant growth promoting microorganisms from mountain environments. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 643-657.

Panhwar, Q. A. Naher, U. A., Jusop, A. Othman, R., Latif, M. A. y Ismail, M. R. (2014). Biochemical and molecular characterization of potential phosphate-solubilizing bacteria in acid

sulfate soils and their beneficial effects on rice growth. *PLOS One*. 9(12): e97241. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097241>

Paredes-Mendoza, M. y Espinosa-Victoria, D. (2009). Ácidos orgánicos producidos por rizobacterias que solubilizan fosfato: una revisión crítica. *Terra Latinoamericana* 28(1): 61-70

Park, J., Xi, H., Kim, Y. y Kim, M. (2021). Complete genome sequence of *Lentilactobacillus parabuchneri* strain KEM. *Microbiology Resource Announcements*, 10: 20. DOI: <https://doi.org/10.1128/MRA.01208-20>

Pérez-Luna, Y. del C., Álvarez-Solís, J. D., Mendoza-Vega, J., Pat-Fernández, J. M. y Gómez-Álvarez, R. (2012). Influence of earthworm humus and biofertilizers in the growth and yield of maize. *Gayana Botánica*, 69 (Special issue): 15-22.

Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., y Bakker, P. A. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347-375.

Piromyou, P., Buranabanyat, B., Tantasawat, P., Boonkerd, N., y Teamroong, N. (2011). Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand. *European Journal of Soil Biology*, 47(1), 44-54. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2010.11.004

Piyadasa, E.R., Attanayake, K.B., Ratnayake, A.D.A., y Sangakkara, U.R. (1995). The role of effective microorganisms in releasing nutrients from organic matter. En: H.A.H. Sharifuddin, A.R. Anuar & M.F. Shahbuddin, (eds.) *Proceedings of the Second Conference on Effective Microorganisms* (EM), at Kyusei Nature Farming Center, Saraburi, Thailand, 7-14.

Pizaña Vidal, H. A.; Fletes Ocón, H. B., y González Cabañas, A. A. (2019). Agronegocios y campesinos maiceros en la Frailesca: vulnerabilidad y resistencias. *Eutopía, Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 15: 11-31.

Postma, J. Hok-A-Hin, C. G. y Van Veen, J. A. (1990). Role of microniches in protecting introduced *Rhizobium leguminosarum* biovar *trifolii* against competition and predation in soil. *Applied and Environmental Microbiology Journal*, 56(2): 495-502.

Prabudoss, V. (2011). A real multi beneficial endophytic diazotroph *Gluconacetobacter diazotrophicus* for sugarcane. *International Journal of Current Research*, 3(6), 103-106

Primavesi, A. (1984). Manejo ecológico del suelo. (Quinta edición). El Ateneo. Argentina.



ProNatura Sur, A. C. (2014). *Hacia una estrategia regional para la conservación de la biodiversidad en la Sierra Madre de Chiapas*. San Cristóbal de las Casas, México: ProNatura Sur, A. C.

Qiao, J.-T., Qiu, Y.-L., Yuan, X.-Z., Shi, X.-S., Xu, X.-H., y Guo, R.-B. (2013). Molecular characterization of bacterial and archaeal communities in a full-scale anaerobic reactor treating corn straw. *Bioresource Technology*, 143, 512–518. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.01

Quattrini, M., Bernardi, C., Stuknyte, M., Masotti, F., Passera, A., Ricci, G., Vallone, L., De Noni, I., Brasca, M., y Fortina, M. G. (2018). Functional characterization of *Lactobacillus plantarum* ITEM 17215: a potential biocontrol agent of fungi with plant growth promoting traits, able to enhance the nutritional value of cereal products. *Food Research International*, 106, 936-944.

Reddy, C. A. y Saravanan, R. S. (2013). Polymicrobial multi-functional approach for enhancement of crop productivity. *Advances in Applied Microbiology*, 82, 53-113.

Ritchie, S. W. y Hanway, J. J. (1982). *How a corn plant develops*. Iowa State University of Science and Technology. Cooperatives Extension Service Ames, Iowa. Special Report, 48.

Robles, B. H. (2010). *The long-term view: Comparing the result of Mexico's 1991 and 2007 Agricultural Censuses. Subsidizing Inequality: Mexican corn policy since NAFTA*. Centro de Investigación y Docencia Económicas. University of California Santa Cruz.

Rodríguez, R., y Redman, R. (2008). More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*, 59, 1109-1114.

Roling W. (2007). Do microbial numbers count? Quantifying the regulation of biogeochemical fluxes by population size and cellular activity. *FEMS Microbiology and Ecology*, 62:202-210.

Roper, M. M., y Smith, A. N. (1991). Straw decomposition and nitrogenase activity by free-living microorganisms from soil: effects of pH and clay content. *Soil Biology and Biochemistry*, 23, 275-283.

Rzhevskaya, V. S., Teplitskaya, L. M. y Oturina, I. P. (2013). Colonization of the rhizoplane of cucumber roots by microbial preparation “Embyko®”. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 4(2), 63-70. DOI: <https://doi.org/10.15421/02131>

Saharan, B. S., y Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, 21, 1-30.

Saikia, S. P. y Vanita, J. (2007). Biological nitrogen fixation with non-legumes: an achievable target or a dogma. *Current Science*, 92(3): 317-322.

Schenck zu Schweinsberg-Mickan, M. y Müller, T. (2009). Impact of effective microorganisms and other biofertilizers on soil microbial characteristics, organic-matter decomposition, and plant growth. *Z. Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 704-712. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800021>

SEMARNAT Y CP. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la república mexicana, escala 1:250 000*. Memoria Nacional 2001-2002. SEMARNAT y CP. México.

SEMARNAT. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018*. SEMARNAT. México. p. 175-217.

SIAP. (2017). *Chiapas. Infografía agroalimentaria. Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera*.

Sisti, C.P.J., Santos, H.P., Kochhann, R., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.S. (2004). Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional and zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Research*, 76:39-58.

Smith, S. E., y Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press, Cambridge.

Souza, R., Ambrosini, A. y Passaglia, L. M. P. 2015. Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology* 38, 401-419.

Steenhoudt, O., y Vanderleyden, J. (2000). *Azospirillum*, a free-living nitrogenfixing bacterium closely associated with grasses: genetic, biochemical and ecological aspects. *FEMS Microbiology Reviews*, 24, 487-506.

Stopes, C., E. I. Lord, L. Philipps y L. Woodward. (2002). Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice. *Soil Use Manage*. 18: 256-263.

Stotsky, G. (1997). Soil as an environment for microbial life. En J. D. Van Elsas, T. Trevors, & E. Wellington, *Modern Soil Microbiology* (pp. 1-20). Marcel Dekker, Inc.

Suchini, J. G. (2012). *Innovaciones agroecológicas para una producción agropecuaria sostenible en la región del Trifinio* (Primera ed.). Turrialba, C. R.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

- Tarafdar, J. C., Yadav, R. S. (2011). Hydrolysis of P fractions by phosphate and phytase producing fungi. *Agrochimica*, 55: 1-13.
- Tasitro, A. (2012). La acidez de los suelos. Instituto Internacional de Nutrición Vegetal (IPNI). Notas de conferencia. 108 p.
- Tchuisseu, G. V., Berger, B., Patz, S., Fankem, H., y Ruppel, S. (2018). Community structure and plant growth-promoting potential of cultivable bacteria isolated from Cameroon soil. *Microbiological Research*, 214, 47–59. DOI: 10.1016/j.micres.2018.05.008
- Tewari, V. P., Verma, R. K., y von Gadow, K. (2017). Climate change effects in the Western Himalayan ecosystems of India: evidence and strategies. *Forest Ecosystems*, 4(13), 24-32.
- Velasco V., J., Ferrera C., R., y Almaraz S., J. J. (2001). Vermicomposta, micorriza arbuscular y Azospirillum brasilense en tomate de cáscara. *Terra Lationamericana*, 19(3), 221-248.
- Velazco, K.; Nguera, N.; Jiménez, L.; Larreal, M., y Ettiene, G. (2009). Evaluación de nitratos y nitritos lixiviados en un sistema de pastoreo intensivo usando fertilizantes nitrogenados. *Rev. Fac. Agron.* 26(1): 23-38.
- Velázquez, E., Silva, L. R., Ramírez-Bahena, M. H., y Peix, A. (2016). Diversity of potassium-solubilizing microorganisms and their interactions with plants. En: V. S. Meena, B. R. Maurya, y R. S. Meena, *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture* (págs. 99-110). New Dheli: Springer.
- Verhulst, N., Sayre, K. D., y Govaerts, B. (2012). *Manual de determinación de rendimiento* No. 631.558 SAY. CIMMYT). Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), México.
- Vieira, S., Sikorski, J., Dietz, S., Herz, K., Schrumph, M., Bruelheide, H., Scheel, D., Friedrich, M. W., y Overmann, J. (2020). Drivers of the composition of active rhizosphere bacterial communities in temperate grasslands. *ISME J.* 14, 463-47.
- Villafuerte-Solis, Daniel. (2015). Crisis rural, pobreza y hambre en Chiapas. *LiminaR*, 13(1): 13-28.
- Wan, J. H. C. y Wong, M. H. (2004). Effects of earthworm activity and P-solubilizing bacteria on P availability in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 167: 209–213.
- Wang, M., Li, S., Chen, S., Meng, N., Li, X., Zheng, H., Zhao, C. y Wang, D. (2019). Manipulation of the rhizosphere bacterial community by biofertilizers is associated with mitigation of cadmium phytotoxicity. *Science of the Total Environment*. 649, 413-421.

- Xia, F., Wang, J., Zhu, T., Zou, B., Rhee, S. y Quan, Z. (2018). Ubiquity and diversity of complete ammonia oxidizers (comammox). *Applied and Environmental Microbiology*. ASM Journals. 84(24): e01390-18
- Xiong, W., Jousset, A., Guo, S., Karlsson, I., Zhao, Q., Wu, H., Kowchuk, G. A., Shen, Q., Li, R., y Geisen, S. (2018). Soil protist communities form a dynamic hub in the soil microbiome. *The ISME Journal, Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology*, 12(2), 634-638.
- Yadav, A. N. *et al.* (2014). Actinobacteria from rhizosphere: molecular diversity, distributions and potential biotechnological applications. En *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: Actinobacteria: diversity and biotechnological applications* (eds Singh, B. P. *et al.*) 13-41. Elsevier.
- Yana, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C. y Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research* 3(4): 316-323.
- Zhang, Y. *et al.* (2017). Fertilization shapes bacterial community structure by alteration of soil pH. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1325.
- Zhu, F., Qu, L., Hong, X. y Sun, X. (2011). Isolation and characterization of a phosphate-solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao Saltern on the coast of Yellow Sea of China. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 615032. DOI: 10.1155/2011/615032.

## 7. ANEXOS

### 7.1 Entrevistas semiestructuradas a productores

#### Sistemas de producción de maíz en la Región Frailesca, Chiapas

##### I. Datos Generales

Municipio: \_\_\_\_\_

Ejido: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Nombre del productor/a: \_\_\_\_\_

Edad: \_\_\_\_\_

1. Nivel de escolaridad alcanzado:

- 1) Primaria
- 2) Secundaria
- 3) Preparatoria
- 4) Licenciatura
- 5) Maestría

##### II. Características y evolución del sistema de producción de maíz

2. Tipo de tenencia

- 1) Ejidal
- 2) Comunal
- 3) Pequeña propiedad
- 4) Rentada
- 5) Otro

3. Superficie dedicada a la ganadería (ha): \_\_\_\_\_

De esta dedica a:

- 1) Potreros o agostaderos (ha) \_\_\_\_\_
- 2) Corraletas por número de vacas (m<sup>2</sup>) \_\_\_\_\_
- 3) Otros (ha): \_\_\_\_\_

4. Superficie dedicada al monte (forestal) (ha): \_\_\_\_\_

5. Superficie dedicada a la agricultura

- 1) Maíz \_\_\_\_\_
- 2) Frijol \_\_\_\_\_
- 3) Otros \_\_\_\_\_

6. ¿Cuántos años lleva sembrando maíz? \_\_\_\_\_

7. ¿Qué superficie ha sembrado de maíz en los últimos 5 años (ha)?

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

8. ¿Qué producción ha logrado de maíz en los últimos 5 años (toneladas)?

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

9. ¿Qué tipo de semilla usa para sembrar maíz?

1) Criolla: \_\_\_\_\_ ¿Cuáles variedades?: \_\_\_\_\_

2) Mejorada: \_\_\_\_\_ ¿Cuáles variedades?: \_\_\_\_\_

10. ¿Cómo realiza la siembra?

1) Manual

2) Mecanizada

11. Desde que siembra maíz, ¿ha usado la misma técnica para sembrarlo?

1) Si

2) No. ¿En qué cambió? \_\_\_\_\_

---

12. ¿Qué técnica realiza para sembrar el maíz?

1) Espeque

2) Mecanizada

3) Tracción animal

13. La pendiente de su parcela es:

1) Ladera

2) Llana

3) Mixta

### III. Información general de la producción agrícola

14. ¿Qué productos obtiene de su cultivo y qué uso le da?

PRODUCTOS	¿CUANTO OBTIENE?		¿QUE HACE CON SU PRODUCTO?				
	T/ha	Costales/ ha	Uso propio	Venta	Combustible del hogar	Molido para alimento del ganado	Agricultura de conservación
Grano							
Elote							
Rastrojo							
Olote							

15. ¿A quién vende y a qué precio?

PRODUCTO	¿A QUIEN VENDE?			CANTIDAD	PRECIO DE VENTA
	Con un vecino	Con intermediario (comercializador)	Con productor ganadero		
Grano					\$
Elote					\$
Rastrojo					\$
Olote					\$

16. ¿Qué uso le da al grano de maíz?

USOS	CANTIDAD	PRECIO DE COMPRA	PRECIO DE VENTA	OTROS USOS
Alimento familiar				
Alimentación de animales				
Subproductos que elabora				

17. ¿Cuál es su sistema de producción y cómo es el manejo?

SISTEMA DE PRODUCCIÓN	Manejo								
	Época de siembra	Forma de siembra			Orografía del terreno			Preparación de suelo	Fecha de siembra
		Espeque	Mecanizada	Tracción animal	Plano	Ladera	Ladera y plano		
Agroecológico	Riego								
	Temporal								
	Humedad residual								
Convencional	Riego								
	Temporal								
	Humedad residual								
Mixto	Riego								
	Temporal								
	Humedad residual								



18. ¿Qué actividades del cultivo de maíz hace y en que fechas lo realiza?

[illegible]

19. ¿Cómo realiza cada una de las actividades de su cultivo de maíz?

DESCRIPCION DE ACTIVIDADES – CULTIVO DE MAIZ		
ACTIVIDADES		FORMA DE HACERLO
Ronda (guarda raya)		
Quema		
Rastreo con residuos de cosecha anterior		
Rastreo sin residuos de cosecha anterior (AC)		
Chaporreo		
Adquisición de semillas (criolla/ mejorada)		
Aradura		
ACTIVIDADES		FORMA DE HACERLO
Riegos		
Siembra y surcado		
Control de malezas		
1° Fertilización		
Control de plagas		
2° Fertilización		
Cosecha		
ACTIVIDADES		FORMA DE HACERLO
Empacado		
Pastoreo sobre rastrojo	Propio	
	Venta	
Alimentación con:	Pacas	
	Olote	
Desgrane		
Acarreo de grano		
Venta de grano		
Colecta del olote para:	Uso propio	
	Venta	



21. ¿Utiliza algún tipo de tecnología o práctica agroecológica para conservar el suelo?

- 1) Si
- 2) No

22. Si la respuesta anterior es sí, ¿qué práctica utiliza?

- 1) Labranza cero
- 2) Labranza mínima
- 3) Labranza tradicional
- 4) Rotación de cultivos
- 5) Incorporación de rastrojo o residuos de cultivos
- 6) Cultivos de cobertura
- 7) Abonos orgánicos
- 8) Microorganismos benéficos (biofertilizantes)
- 9) Agroforestería
- 10) Otra (s), ¿cuáles? \_\_\_\_\_

23. ¿Ha elaborado su propio abono orgánico?

- 1) Si
- 2) No

24. Si la respuesta anterior es sí, ¿dónde aprendió a elaborarlo?

- 1) Me enseñaron los técnicos
- 2) En mi parcela
- 3) En la parcela de otro productor
- 4) Otro: \_\_\_\_\_

25. ¿Sobre qué aspectos considera que impacta más el utilizar un abono orgánico?

- 1) Producción
- 2) Rendimiento
- 3) Conservación del suelo
- 4) Ingresos económicos
- 5) Otro

26. ¿En qué sentido considera que el uso de abonos orgánicos cambiaría la forma de cultivar el maíz?

\_\_\_\_\_

27. Mencione algunas prácticas que usted considere innovadora en su sistema de producción de maíz

\_\_\_\_\_