



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis de rasgos funcionales y productividad
de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol) al crecer sobre
suelos artificiales elaborados a partir de residuos
urbanos

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Corina Cantero Rodríguez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Manuel Peña Ramírez

Ciudad Universitaria, CD. MX., 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno

Cantero
Rodríguez
Corina
cori.cantero@ciencias.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Licenciatura en Ciencias de la Tierra – Ciencias Ambientales
311151390

2. Datos del tutor

Dr.
Víctor Manuel
Peña
Ramírez

3. Datos del sinodal 1

Dra.
Blanca Lucía
Prado
Pano

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Silke
Cram
Heydrich

5. Datos del sinodal 3

Dra. Julieta
Rosell
García

6. Datos del sinodal 4

Dr.
Arturo
Sánchez
González

7. Datos del trabajo

Análisis de rasgos funcionales y productividad de *Phaseolus vulgaris L.* (frijol) al crecer sobre suelos artificiales elaborados a partir de residuos urbanos

81 p.
2022

Agradecimientos

Muchas personas han contribuido directa o indirectamente en este trabajo de tesis pero particularmente me gustaría agradecer al Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM, a la empresa Concretos Reciclados S.A. de C.V. por proveer los materiales de desechos de la construcción utilizados en esta investigación, al Laboratorio Universitario de Nanotecnología Ambiental (LUNA), a las Dras. Olivia Zamora y Maricarmen Salazar, al Mtro. Javier Tadeo y al Biólogo René Alcalá del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, por el soporte técnico y análisis de las muestras, a la Dra. Lucy Mora por sus enseñanzas, su apoyo y supervisión para el procesamiento de muestras edáficas.

A los investigadores que fueron sinodales de esta tesis: la Dra. Silke Cram, la Dra. Julieta Rosell y el Dr. Arturo Sánchez. Gracias por el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo, por sus oportunos comentarios, correcciones y preguntas que me invitaron a la reflexión. A la Dra. Blanca Prado por su buena disposición y su actitud siempre positiva. Al Dr. Víctor Peña por su ayuda, paciencia, consejos y su compromiso como profesor del taller y como tutor.

A mis compañeras del taller: Fernanda Colín, Itzel Lorenzo, Yesenia Paz e Itzel Tapia porque su trabajo en campo y en laboratorio forma parte de esta tesis. Al Biólogo Diego Dávila por su amabilidad y ayuda con los códigos de programación en R.

Al financiamiento para la investigación DGAPA-PAPIIT IN108118 “Construcción y monitoreo de Tecnosuelos con materiales de desecho para la revegetación urbana”, gracias al cual el desarrollo de este proyecto fue posible.

Por otra parte, me gustaría agradecer a las instituciones y personas que han apoyado mis estudios y mi desarrollo personal. A la UNAM por darme la oportunidad de estudiar una licenciatura. A la comunidad de la Facultad de Ciencias por ser un espacio en el que encontré pertenencia y sentido social. A los profesores que he tenido a lo largo de mi trayectoria escolar y cuyas enseñanzas trascienden en mi vida. Al taller de Ciencia Viva CINVESTAV Irapuato por ser mi primer acercamiento al quehacer científico.

Al equipo de trabajo del APC LANCIS quienes tienen toda mi admiración. Gracias por permitirme realizar mi servicio social y darme mi primer trabajo formal. Particularmente quiero

agradecer a Paola por abrirme las puertas del laboratorio y guiarme en el ámbito profesional durante esos años.

A mis compañeros y amigos de la licenciatura les agradezco por intercambiar sus ideas en las clases, por apoyarme a resolver mis dudas y por formar parte de esta etapa de mi vida. Especialmente agradezco a mis queridas amigas Fer, Andy, Adri y Jessi por las risas, las pláticas, las prácticas de campo, por estar presentes en los fracasos y en los momentos alegres. A Oscar, por su ayuda y compañía en mis primeros años de vida adulta, por compartir ideas y reflexiones que han expandido su mente en la mía.

Finalmente quiero dar un breve agradecimiento a mi familia porque no podría enumerar todo lo que significan y han contribuido a mi persona. A mi mamá por ser mi primera y más importante maestra. A mi papá por sembrar en mí el amor por la naturaleza. A mis hermanas por la infancia compartida cuya esencia perdura hasta la fecha y se expresa en complicidad, risas y cuidados.

Índice general

Índice general	6
Índice de figuras	8
Índice de tablas	9
Resumen.....	1
I. Introducción.....	2
II. Marco teórico	4
2.1 La importancia del suelo como un recurso no renovable.....	4
2.2 Los Tecnosoles como alternativa a la extracción de horizontes orgánicos del suelo	5
2.2.1 <i>Propiedades deseables en los Tecnosoles diseñados para la agricultura urbana</i>	6
2.2.2 <i>Residuos urbanos para la fabricación de Tecnosoles</i>	8
2.3 Rasgos funcionales en plantas para la evaluación de Tecnosoles.....	11
2.4 El cultivo de frijol en México	12
2.4.1 <i>Requerimientos edáficos del frijol (Phaseolus vulgaris L.)</i>	13
III. Objetivos.....	14
3.1 Objetivo general.....	14
3.2 Objetivos particulares	14
IV. Hipótesis..	15
V. Métodos.....	16
5.1 Diseño experimental	16
5.2 Análisis físicos y químicos de los Tecnosoles	18
5.3 Medición del crecimiento, la productividad y los rasgos funcionales de las plantas de frijol.....	21
5.3.1 <i>Rasgos de crecimiento</i>	22
5.3.2 <i>Rasgos vegetativos de productividad</i>	23
5.3.3 <i>Rasgos funcionales de hojas</i>	23
5.3.4 <i>Rasgos funcionales de raíces</i>	24
5.4 Análisis estadísticos	25
VI. Resultados.....	27
6.1 Rasgos vegetativos de crecimiento	27

6.1.1 Rasgos vegetativos de crecimiento a lo largo del tiempo	27
6.1.2 Modelos lineales de variables de crecimiento de las plantas	29
6.2 Rasgos vegetativos de productividad	34
6.2.1 Modelos lineales de las variables de productividad	34
6.3 Análisis de componentes principales de variables de crecimiento, productividad y propiedades del suelo	36
6.4 Evaluación edafocológica de los Tecnosoles elaborados para el cultivo de frijol	40
6.4.1 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con residuos de excavación, compost, lombricompost y trozos de madera	40
6.4.2 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con residuos de construcción, compost, lombricompost y trozos de madera	41
6.4.3 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con trozos de madera, compost y lombricompost	43
6.5 Rasgos funcionales	45
6.5.1 Modelos lineales de las variables de rasgos funcionales	45
6.5.2 Análisis de componentes principales de rasgos funcionales y propiedades del suelo	54
VII. Discusión	58
7.1 Características físicas y químicas de los Tecnosoles	58
7.1.1 Crecimiento y productividad en las plantas de frijol y su relación con las variables físicas y químicas de los Tecnosoles	62
7.2 Expresión de rasgos funcionales	65
Recomendaciones para futuros estudios	69
VIII. Conclusiones	70
IX. Referencias bibliográficas	71
Anexos	78

Índice de figuras

Figura 1. Características composicionales de los tratamientos.....	17
Figura 2. Croquis del diseño experimental conformado por siete tratamientos (T) dispuestos en cuatro bloques (B) al azar.....	17
Figura 3. Preparación de los módulos y montaje del experimento.	18
Figura 4. Procesamiento de las plantas de frijol para la toma de datos.	25
Figura 5. Variables de crecimiento de las plantas (altura, cobertura y diámetro) a los 40, 83 y 130 días después de la siembra de frijol.	28
Figura 6. Promedios estimados de la altura máxima entre tratamientos.....	30
Figura 7. Promedios estimados del diámetro del tallo entre tratamientos.	31
Figura 8. Promedios estimados de la cobertura entre tratamientos.....	32
Figura 9. Promedios estimados de la biomasa total entre tratamientos.	33
Figura 10. Promedios estimados del número de semillas entre tratamientos.	35
Figura 11. Promedios estimados de la biomasa de las semillas entre tratamientos.	36
Figura 12. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa total, productividad y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP2.....	38
Figura 13. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa total, productividad y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP3.	39
Figura 14. Promedios estimados de la biomasa del tallo entre tratamientos.	46
Figura 15. Promedios estimados del contenido foliar de materia seca entre tratamientos.....	47
Figura 16. Promedios estimados del área foliar específica entre tratamientos	48
Figura 17. Promedios estimados de la longitud radicular específica entre tratamientos.	49
Figura 18. Promedios estimados de la densidad del tejido radicular entre tratamientos.	51
Figura 19. Promedios estimados del área superficial específica de la raíz entre tratamientos.	52
Figura 20. Promedios estimados de la biomasa de las raíces finas entre tratamientos.	53
Figura 21. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de rasgos funcionales y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP2.	56
Figura 22. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de rasgos funcionales y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP3.	57

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo favorables para el crecimiento de las plantas.....	7
Tabla 2. Resultados del modelo lineal para la variable altura máxima entre tratamientos.	29
Tabla 3. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable altura máxima entre tratamientos.	29
Tabla 4. Resultados del modelo lineal para la variable diámetro del tallo entre tratamientos.	30
Tabla 5. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable diámetro del tallo entre tratamientos.	31
Tabla 6. Resultados del modelo lineal para la variable cobertura entre tratamientos.	32
Tabla 7. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable cobertura entre tratamientos.	32
Tabla 8. Resultados del modelo lineal para la variable biomasa total entre tratamientos.	33
Tabla 9. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable biomasa total entre tratamientos.	33
Tabla 10. Resultados del modelo lineal para la variable número de semillas entre tratamientos.	34
Tabla 11. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable número de semillas entre tratamientos.	34
Tabla 12. Resultados del modelo lineal para la variable biomasa de semillas entre tratamientos.	35
Tabla 13. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable biomasa de semillas entre tratamientos.	35
Tabla 14. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales entre variables de crecimiento, biomasa y suelo.	37
Tabla 15. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa y suelo.	37
Tabla 16. Evaluación de la calidad de los siete Tecnosoles y desempeño de las plantas de frijol.	44
Tabla 17. Resultados del modelo lineal para la variable biomasa del tallo entre tratamientos.	45
Tabla 18. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable biomasa del tallo entre tratamientos.	45
Tabla 19. Resultados del modelo lineal para la variable CFMS entre tratamientos.	46
Tabla 20. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable CFMS entre tratamientos.	47
Tabla 21. Resultados del modelo lineal para la variable AFE entre tratamientos.	48
Tabla 22. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable AFE entre tratamientos.	48
Tabla 23. Resultados del modelo lineal para la variable LRE entre tratamientos.	49

Tabla 24. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable LRE entre tratamientos.	49
Tabla 25. Resultados del modelo lineal para la variable DTR entre tratamientos.	50
Tabla 26. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable DTR entre tratamientos.	50
Tabla 27. Resultados del modelo lineal para la variable ASER entre tratamientos.	51
Tabla 28. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable ASER entre tratamientos.	52
Tabla 29. Resultados del modelo lineal para la variable BRF entre tratamientos.	53
Tabla 30. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable BRF entre tratamientos.	53
Tabla 31. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales entre variables de crecimiento, biomasa y suelo.	54
Tabla 32. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa y suelo.....	54

Resumen

La población de la Ciudad de México demanda una gran cantidad de alimentos, pero su contribución en la producción de éstos es mínima. La agricultura urbana es una alternativa para incrementar la producción de alimentos. Sin embargo, la producción se realiza con suelo fértil que es extraído de bosques conservados, sin considerar que el suelo es un recurso natural no renovable a escala humana. En este estudio se propone utilizar residuos urbanos en el diseño y construcción de Tecnosoles que cumplan con la función de dar soporte, aportar suficientes nutrimentos y agua disponible para el cultivo de frijol. En el experimento se implementaron siete tratamientos con residuos urbanos orgánicos (compost, lombricompost y trozos de madera) e inorgánica (residuos de construcción y excavación). Se realizó una evaluación edafocológica tomando en cuenta variables físicas y químicas de los Tecnosoles, así como el crecimiento y la productividad de las plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*). Además, se analizaron siete rasgos funcionales de hojas, tallos y raíces. Los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas en la mayoría de las variables analizadas, indicando una fuerte influencia de los Tecnosoles en el desarrollo de las plantas. De manera general, los tratamientos con lombricompost tuvieron mejores rendimientos que su contraparte con compost. No obstante, en los tratamientos con compost y con lombricompost se desarrollaron las plantas con el mejor desempeño. Los tratamientos con residuos de construcción y excavación pueden volverse funcionales y mejorar su rendimiento si se aplica una mayor cantidad de compost (>31%; preferentemente lombricompost) o alguna otra enmienda que mejore sobre todo las propiedades bióticas de estos Tecnosoles.

I. Introducción

En la zona metropolitana de la Ciudad de México habitan más de 21 millones de personas (INEGI, 2020). La presión que ejerce esta población sobre los ecosistemas y recursos naturales de la región ha afectado la zona del suelo de conservación que representa más de la mitad del territorio de la Ciudad de México (87,291 hectáreas, 59% del territorio; SEMARNAT, 2016). Estas zonas proveen servicios ecosistémicos necesarios para el mantenimiento de la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, tales como: la recarga del acuífero, la fijación de gases de efecto invernadero, el mejoramiento de la calidad del aire, el secuestro de carbono, la polinización, la regulación del microclima de la región y la producción agropecuaria (SEMARNAT, 2016). Entre las principales causas que afectan el recurso edáfico se encuentran: el establecimiento de asentamientos humanos irregulares, la degradación forestal, la tala clandestina, el sobrepastoreo, los tiraderos de residuos sólidos de la construcción y las inadecuadas prácticas agrícolas (Carrasco, 2001). En este estudio se aborda la problemática de la extracción de los horizontes orgánicos del suelo (“tierra negra”) y el mantillo (“tierra de hoja”). Ambos materiales son utilizados en la jardinería debido a sus características físicas, disponibilidad y bajo costo (Acosta-Durán *et al.*, 2008). A pesar de que su aprovechamiento está limitado por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, la extracción irracional de este recurso trae consecuencias negativas al suelo y a los ecosistemas, generando erosión y pérdida de productividad del recurso edáfico (Acosta y Acosta, 2018).

Por otra parte, uno de los mayores retos que enfrenta la Ciudad de México es la gestión de los residuos, pues se calcula que se generan diariamente cerca de 13,149 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (SEDEMA, 2020) y 24,344 toneladas de residuos de la construcción o demolición (SEDEMA, 2017). Sin embargo, estos residuos pueden ser aprovechados para elaborar Tecnosoles con el potencial de emplearse en la producción agrícola urbana, o en la restauración de jardines domésticos, camellones y parques urbanos. En este trabajo de tesis se propone emplear residuos urbanos orgánicos (compost y lombricompost) y residuos de manejo especial, provenientes de la construcción de inmuebles, para elaborar Tecnosoles que cumplan la función de dar sostén, aporten nutrimentos y retengan suficiente agua disponible, de tal forma que plantas

de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) puedan sobrevivir, crecer y fructificar. Esto tendría un triple beneficio: (1) contribuir a evitar la extracción de materiales forestales (tierra de hoja y tierra negra), (2) representar una alternativa al manejo de los residuos sólidos urbanos y (3) promover la agricultura urbana sostenible.

II. Marco teórico

2.1 La importancia del suelo como un recurso no renovable

Podemos definir al suelo como un cuerpo natural, frágil y no renovable que tarda de 400 a cientos de miles de años en formarse (Arroyave y Restrepo, 2009). Se compone de horizontes o capas y su génesis es producto de la compleja interacción de cinco factores formadores que son: el clima, la topografía, el tiempo, los seres vivos y el material parental. Sus componentes principales son los minerales intemperizados, la materia orgánica, el aire y el agua (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2013).

El suelo presta servicios ecosistémicos que resultan clave en el mantenimiento de la calidad ambiental. En él se lleva a cabo la filtración y la transformación de elementos como el carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros; asimismo es considerado como un sumidero de carbono, impidiendo que el dióxido de carbono se transporte a la atmósfera y actué como un gas de efecto invernadero (Burbano-Orjuela, 2016). Por otra parte, el suelo capta y almacena el agua que permite la recarga de los acuíferos, filtrando a su paso algunos de los contaminantes y mejorando su calidad (Cram *et al.*, 2007). El suelo es considerado la base de los sistemas alimentarios, se estima que produce el 95% de los alimentos directa o indirectamente; además, alberga un cuarto de la biodiversidad del planeta (FAO, 2015). A pesar de su relevancia, el suelo se encuentra bajo fuertes presiones ecológicas, sociales y políticas, debido a el desarrollo urbano e industrial, la degradación forestal, el sobrepastoreo, los tiraderos de residuos sólidos de la construcción, los fenómenos climáticos extremos y las inadecuadas prácticas agrícolas (Cotler *et al.*, 2007; Carrasco, 2001); dentro de esta última causa, podemos incluir la extracción de los horizontes orgánicos del suelo (“tierra negra”) y el mantillo (“tierra de hoja”).

Según el Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable la tierra negra y la tierra de hoja son productos forestales no maderables que provienen de material de origen mineral y de material orgánico de vegetación forestal en proceso de descomposición, respectivamente. Aunque su aprovechamiento en México está regulado por la SEMARNAT, su extracción se ha incrementado en las últimas décadas sobre todo en la región central del país. Para

2017 estaban vigentes permisos para el aprovechamiento de más de dos millones y medio de toneladas (SEMARNAT, 2020). Debido a sus características físicas, disponibilidad y bajo costo, la tierra de hoja y la tierra negra son los principales sustratos utilizados en viveros para la producción de plantas ornamentales y en áreas verdes (Acosta y Acosta, 2018). Sin embargo, la descomposición de los residuos forestales (hojas, cortezas y ramas) es un paso importante para la formación de materia orgánica en el suelo, pues ayuda a mantener la fertilidad, mejorar la capacidad de retención de agua, la aireación, la agregación y la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas (Ge *et al.*, 2013; Ondrasek *et al.*, 2019). La extracción irracional de este recurso causa erosión y pérdida de la productividad del suelo (Acosta-Durán *et al.*, 2008), esto no sólo impacta en el rendimiento del suelo para la producción de alimentos, sino que también afecta el equilibrio de los servicios ecosistémicos que proporciona (Osman, 2014).

2.2 Los Tecnoles como alternativa a la extracción de horizontes orgánicos del suelo

Se conoce como Tecnoles o suelos artificiales a aquellos suelos cuyas propiedades y edafogénesis están dominados por su origen técnico. Estos suelos se caracterizan por contener una proporción de más del 20% de volumen en cada 100 cm de espesor de “artefactos”, es decir materiales hechos o extraídos por el hombre y que de otro modo no aparecerían en la superficie (IUSS Working Group WRB, 2015). Los artefactos pueden incluir basura en general, vidrio, plástico, acero, ladrillo, hierro, hormigón, productos manufacturados, barras de refuerzo y asfalto (Naeth, *et al.*, 2012). A esta clasificación pertenecen los suelos de desechos (vertederos, lodos, escorias, residuos o escombros de minas y cenizas), suelos naturales sellados con pavimento, suelos con geomembrana y suelos construidos artificialmente, excluyendo a los suelos que han sido utilizados intensivamente en la agricultura, pues a estos se les conoce como Antrosoles (IUSS Working Group WRB, 2015). Dentro del sistema de clasificación ruso de suelos, a los Tecnoles se les conoce como Formaciones Tecnogénicas Superficiales y en la clasificación australiana de suelos se les conoce como Antroposuelos.

Los suelos construidos artificialmente permiten aprovechar todo tipo de desechos, para elaborar a partir de ellos y en diferentes proporciones, el suelo deseado creado a partir de mezclas

de diferentes residuos orgánicos, inorgánicos o sintéticos. Se pueden utilizar como sustituto de suelos naturales y para la corrección de diferentes problemas ambientales en zonas con suelos degradados o contaminados por la acción del hombre, con la finalidad de mejorar la calidad ambiental previa. En otras palabras, estos suelos son creados “a la carta” y “a imagen de los suelos naturales” (Velázquez y Caballero, 2014). Al igual que en los suelos naturales, las características de los Tecnosoles construidos dependerán en gran medida del material que se utilizó para construirlos.

Algunos de los beneficios del uso de Tecnosoles son: sustituir materiales de interés ambiental, como los horizontes orgánicos extraídos de suelos naturales, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas en la gestión de residuos por los métodos de vertido o incineración, y la rápida y correcta integración de diferentes elementos y sustancias en los ciclos biogeoquímicos (Xunta de Galicia, 2008).

2.2.1 Propiedades deseables en los Tecnosoles diseñados para la agricultura urbana

Se han establecido un grupo mínimo de propiedades del suelo para ser utilizadas como indicadores. Entre ellas se encuentran los indicadores físicos, químicos y biológicos, los cuales deben elegirse de acuerdo a la función que se esté evaluando y a la facilidad y fiabilidad de la medición (García, Ramírez y Sánchez, 2012; USDA, 1996). Las propiedades físicas del suelo reflejan la forma en la que este capta, retiene y circula el agua y los nutrientes que son utilizados por las plantas. También, se refieren al suelo como soporte para el crecimiento de las plantas, influyen en el desarrollo de las raíces pudiendo limitar su crecimiento y su productividad. Algunos de los principales indicadores físicos son: la estructura, la densidad aparente, la estabilidad de los agregados y la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) (Bravo *et al.*, 2008; García, Ramírez y Sánchez, 2012; Tabla 1).

Por otra parte, entre los indicadores químicos se encuentran el pH, la conductividad eléctrica (CE), el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico total, la concentración de fósforo y las concentraciones de elementos que pueden ser

contaminantes potenciales (como los metales pesados) o aquellos que son necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas (macro y micronutrientes).

Para el cultivo agrícola urbano los Tecnosoles diseñados deben ser capaces de favorecer el crecimiento y la productividad de las plantas; para ello, es necesario que cuenten con ciertas características como: servir como soporte para la vegetación, favorecer la formación de agregados, tener una adecuada capacidad de retención de agua, aireación, pH, conductividad eléctrica y disponibilidad de nutrientes. Además, deben estar libres de contaminantes patógenos y preferentemente tener un bajo costo (Abbruzzini *et al.*, 2021; Prado *et al.*, 2020).

En el caso de los Tecnosoles es conveniente caracterizar los materiales que se emplearán para su elaboración, ya que para cada finalidad y cultivo se requiere determinar el TecnoSol más apropiado utilizando los materiales que se tengan disponibles (Acosta-Durán *et al.*, 2008).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo favorables para el crecimiento de las plantas.

Propiedad	Descripción	Relación con las funciones del suelo
<i>Físicas</i>		
Estructura	Agregación de las partículas primarias en partículas compuestas.	Balance hídrico y térmico, aireación.
Densidad aparente	Medida en peso del suelo secado a 105 °C por unidad de volumen, incluye al espacio poroso.	Balance hídrico y de nutrientes.
CRAD	Cantidad de agua retenida que puede ser absorbida por las plantas.	Contenido de humedad, transporte y erosión.
<i>Químicas</i>		
pH	Logaritmo negativo de la concentración de H ⁺ en el agua.	Disponibilidad relativa de nutrientes y actividad microbiana.
CE	Capacidad de conducir la corriente eléctrica, mide la concentración de sales solubles.	Actividad microbiológica, límites para el crecimiento de las plantas.
Carbono orgánico	Es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos.	Fertilidad del suelo, estructura, productividad y estabilidad.
N, P y K	Son macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.	Disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Fuentes: (Siebe, Jahn y Stahr, 2006; García, Ramírez y Sánchez, 2012; FAO, 2017).

2.2.2 Residuos urbanos para la fabricación de Tecnosoles

Durante 2019 se generaron en la Ciudad de México 13,149 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, de los cuales 1,764 toneladas fueron residuos orgánicos (SEDEMA, 2020). El manejo inadecuado de residuos orgánicos puede traer consecuencias negativas al ser humano y al ambiente, por ejemplo, contaminación del aire debido al desprendimiento de sustancias volátiles contenidas en los residuos, y a la emisión de gases como metano, la contaminación del agua por la infiltración de lixiviados a acuíferos y la contaminación de suelos o afectaciones a la salud pública como la reproducción de ratas, moscas y otros transmisores de enfermedades (Mora, 2004; Köfalusi y Aguilar, 2006; Flores, 2009). En la Norma Ambiental para la Ciudad de México NADF-024-AMBT-2013 (SEDEMA, 2015b) se establece que los residuos sólidos urbanos son “los generados en casa habitación, unidad habitacional o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes”. Una de las alternativas para la disposición y tratamiento de los residuos sólidos urbanos es su aprovechamiento para la generación de Tecnosoles; en esta investigación se propone el uso de dos tipos de residuos: residuos de construcción y excavación y residuos orgánicos.

2.2.2.1 Residuos de construcción

La industria de la construcción es una de las mayores generadoras de residuos a nivel mundial, no solo durante el proceso de extracción de materia prima y fabricación de los materiales, sino también durante las diferentes actividades de construcción de las obras civiles. Debido a su volumen de producción y a la falta de espacio para su disposición final, estos residuos, en la mayoría de los casos, son dispuesto en lugares no autorizados sin recibir ningún tipo de tratamiento o aprovechamiento (Chica-Osorio y Beltrán-Montoya, 2018; Bustos *et al.*, 2017). Durante 2017 se generaron 24,344 toneladas de residuos de la construcción o demolición en la Ciudad de México (SEDEMA, 2017). De acuerdo con la norma ambiental mexicana NADF-007-RNAT-2013, los residuos de construcción son aquellos generados como resultado de demolición, remodelación y construcción de obras en general y se clasifican dentro del grupo de residuos de manejo especial debido a la cantidad de material involucrado y a su posible impacto negativo en el ambiente.

Aunque los residuos generados por la industria de la construcción tienen potencial de reúso o reciclaje, en la Ciudad de México solo se cuentan con dos sitios oficiales para la disposición final y transferencia de estos residuos en donde se procesan apenas el 3% de los desechos, uno está ubicado en la alcaldía Xochimilco y el otro corresponde a una empresa privada en la alcaldía Iztapalapa “Concretos Reciclados” (Martínez, 2017).

De manera general, los residuos generados por la industria de la construcción están constituidos por un conjunto de fragmentos o restos de materiales tales como: madera, paneles de yeso o de cemento, residuos de albañilería, tabiques, tierra, resinas, metales, vidrio, plásticos, asfalto, concretos, ladrillos, bloques, materiales de excavación, cerámicos, entre otros, cuya composición puede variar ampliamente dependiendo del tipo de proyecto, la obra y etapa de construcción (SEDEMA, 2015a).

Los materiales producto de las excavaciones forman parte de la etapa inicial de construcción de desarrollos urbanos y normalmente representan, el mayor residuo producido por la industria de la construcción (Chica-Osorio y Beltrán-Montoya, 2018). Están compuestos principalmente de tierra, arena, grava y rocas, mientras que los residuos de construcción se componen de asfalto, arena, grava, ladrillos, hormigón, maderas y metales (Bustos *et al.*, 2017; Flores, 2009).

2.2.2.2 Residuos orgánicos (compost y lombricompost)

Los residuos orgánicos representan un alto porcentaje de los residuos sólidos urbanos generados en la Ciudad de México, los cuales han sido estimados en 1,764 toneladas diarias durante 2019 considerando residuos de alimentos, de jardinería y podas (SEDEMA, 2020). Si los residuos orgánicos se clasifican y separan adecuadamente del resto, pueden ser sustratos potenciales para originar abonos orgánicos de calidad. El compost es el producto final de la descomposición microbiológica de residuos orgánicos, en el que participan una amplia diversidad de microorganismos aerobios siendo los más importantes las bacterias y los hongos, este proceso sucede bajo condiciones de alta temperatura (superiores a 45 °C; Ronald y Richard, 2002).

El composteo no sólo permite obtener un producto útil a partir de desechos orgánicos, también es considerado como una alternativa viable para el manejo de la basura orgánica. El resultado de este proceso puede emplearse en la agricultura como mejorador de suelo (Chávez *et*

al., 2009). Además de nutrientes, el compost le aporta al suelo la fracción orgánica que favorece el mejoramiento de las características físicas, químicas y biológicas del suelo, que resultan benéficas para las plantas. Entre las características físicas están mejorar la retención de humedad del suelo, aumentar la porosidad, mejorar la estructura del suelo, evitando que las partículas de éste se disgreguen, y regular la temperatura del suelo previniendo cambios extremos que podrían afectar las raíces de las plantas (Nieto *et al.*, 2002). En cuanto a los efectos químicos, el compost tiene la capacidad de ser amortiguador del pH, mejorar la capacidad de intercambio catiónico, aumentar la disponibilidad de elementos nutritivos para los cultivos como nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes como manganeso, cobre y zinc (Román, Martínez y Pantoja, 2013). Por último, ya que el compost representa una fuente de alimento para los organismos que viven en el suelo, su aplicación incrementa la reproducción y desarrollo de organismos (como bacterias y hongos), que benefician el desarrollo de las plantas pues son capaces de transformar los materiales insolubles del suelo en nutrientes y pueden degradar sustancias nocivas (Román, Martínez y Pantoja, 2013).

Otro tipo de compostaje es el lombricompost, que consiste en la descomposición microbiana de fracciones de materia orgánica dentro del intestino de la lombriz de tierra (la más utilizada es la lombriz roja *Eisenia foetida* o *E. andrei*), acelerando la descomposición de ésta y alterando las propiedades físicas y químicas del material (Atiyeh *et al.*, 2002). El lombricompost (vermicomposta o humus de lombriz) es el resultado final del proceso digestivo de las lombrices. Este se puede utilizar como mejorador de suelo en cultivos y como sustrato, aportando de forma equilibrada y a largo plazo, todos los nutrientes básicos que necesitan las plantas para su correcto desarrollo y producción, además de una gran cantidad de microorganismos (40 mil millones por gramo seco; Peña, 2015; Bosch, 2015).

Los beneficios que aportan el compost y el lombricompost al suelo son similares, excepto que la segunda tiene la capacidad de producir enzimas y hormonas que estimulan el crecimiento y las funciones vitales de las plantas. Por otra parte, el lombricompost puede tener una mayor concentración de fósforo, calcio, sodio y magnesio (Bosch, 2015).

2.3 Rasgos funcionales en plantas para la evaluación de Tecnosoles

Los rasgos funcionales se definen como las características o atributos de un organismo que otorgan información del papel que éste desempeña dentro del ecosistema, representando las estrategias ecológicas y su respuesta ante un determinado factor ambiental, de perturbación o cambio (Hans y Chapin, 2008; Garnier y Lavorel, 2002). Para las plantas, los rasgos funcionales incluyen características morfológicas, fisiológicas y/o fenológicas que son medibles a nivel de individuo, y que pueden afectar su desempeño ecológico, es decir que influyen directa o indirectamente al crecimiento, la reproducción y la supervivencia (Violle *et al.*, 2007).

La disponibilidad de recursos, principalmente luz, agua y nutrientes, son los factores que más influyen en la determinación de estrategias de las plantas (Pérez-Ramos *et al.*, 2012). Se ha descrito un continuo de variación en las estrategias para el uso de los recursos según la historia evolutiva de la planta y las condiciones ambientales (incluyendo las propiedades del suelo, Reich, 2014). En los extremos de este continuo se pueden reconocer dos estrategias opuestas. La primera se refiere a las especies que hacen un uso adquisitivo de los recursos, las cuales presentan un rápido crecimiento en un periodo corto de tiempo y por lo tanto tasas de absorción y metabólicas altas, así como una alta concentración de nutrientes en sus órganos; los tejidos de este tipo de individuos serán menos densos y más efímeros. En el otro extremo se encuentran las especies que favorecen el uso conservativo de los recursos, es decir que tienen un crecimiento lento y una concentración de nutrientes menor en sus órganos, sin embargo, se caracterizan por tener tejidos más densos y estructuras más longevas (Riva *et al.*, 2014; Hobbie, 1992; Reich, 2014).

Aunque este marco conceptual ha sido estudiado principalmente en el ámbito silvestre, se espera que este espectro de estrategias se presente de manera similar en cultivos agronómicos como el frijol y que permita utilizar el estudio de los rasgos funcionales como parte del análisis de la calidad de los Tecnosoles. De ese modo las plantas que presentan rasgos funcionales que reflejan tasas de absorción y tasas metabólicas altas, así como una alta concentración de nutrientes habrán crecido sobre suelos con mayor calidad y viceversa (Salinas, 2018).

Algunos ejemplos de los patrones que se han estudiado de los rasgos funcionales en las hojas en relación con el suelo son: asociaciones positivas del área foliar específica (AFE) y el

contenido de nitrógeno en ambientes fértiles (estrategia adquisitiva); en contraste, se ha observado un aumento en el contenido foliar de materia seca (CFMS) y en la densidad del tejido foliar (DTF) en plantas que se desarrollan en ambientes menos favorables (estrategia conservativa) (Reich, 2014; Wilson *et al.*, 2002; Wright *et al.*, 2004). En cuanto a las raíces, se tiene reportado que valores altos de área superficial específica de la raíz (ASER) y longitud radicular específica (LRE) corresponden a plantas con estrategia adquisitiva; mientras que las raíces con mayor contenido en materia seca y mayor densidad del tejido radicular (DTR) corresponden a plantas con estrategia conservativa (Navarro-Fernández *et al.*, 2010; Comas y Eissenstat, 2004; Mommer y Weemstra, 2012).

2.4 El cultivo de frijol en México

El frijol es un producto agrícola fundamental en México, pues posee un gran valor cultural y ha formado parte de la alimentación de la población mexicana durante milenios, siendo la leguminosa de mayor consumo (9.9 kg anuales per cápita). No sólo es un alimento tradicional, sino también en un elemento de identidad cultural, siendo uno de los tres cultivos básicos de la milpa junto con el maíz y la calabaza (Sandoval, Gaxiola y Chávez, 2010; Flores, 2015; SAGARPA, 2017). El cultivo de frijol es considerado de los más antiguos (Debouck y Hidalgo, 1985). Se cree que la región mesoamericana fue su centro primario de origen y diversidad (FAO, 2018).

En cuanto a sus propiedades nutrimentales, el frijol tiene un alto contenido de proteína vegetal y fibra. Es una fuente considerable de calcio, hierro, fósforo, magnesio, zinc y de las vitaminas tiamina, niacina y ácido fólico (Ulloa, *et al.*, 2011). A su consumo regular se le atribuyen efectos hipoglucémicos y antidepresivos, que favorecen la disminución de los niveles de colesterol (Salinas *et al.*, 2012).

En México habitan de manera natural 50 especies, destacando cuatro que han sido domesticadas: frijol común (*Phaseolus vulgaris L.*), frijol ayocote (*Phaseolus coccineus L.*), frijol comba (*Phaseolus lunatus L.*) y frijol tepari (*Phaseolus acutifolius Gray*), de las cuales *Phaseolus vulgaris L.* es la especie más importante cultivándose cerca de 70 variedades en todos los estados del país (Salinas *et al.*, 2012; Sandoval, *et al.*, 2010). Durante el periodo de 2000 a 2019, la

producción de frijol en México fue de 1.1 millones de toneladas en promedio, lo que posiciona al país como el séptimo lugar de producción y el tercer consumidor de este producto a nivel mundial. Las entidades del país con mayor producción agrícola de frijol son: Zacatecas, Sinaloa, Durango, Chihuahua, Chiapas, Nayarit, Guanajuato y San Luis Potosí (CEDRSSA, 2020).

2.4.1 Requerimientos edáficos del frijol (*Phaseolus vulgaris L.*)

El cultivo de frijol requiere de terrenos con suelos que permitan el crecimiento radical de por lo menos 35 cm a 40 cm de profundidad, de manera que las plantas puedan tener suficiente humedad y nutrientes para su desarrollo (FAO, 2018); además, los suelos deben ser fértiles, aireados, con buen drenaje y con textura ligera, por ejemplo, franco-limosa o franco-arcillosa.

Las plantas de frijol son muy susceptibles a la alta acidez del suelo, sobre todo cuando se presenta asociada a niveles tóxicos de aluminio y manganeso (FAO, 2018). Se ha reportado que el rango óptimo de pH para su cultivo va de 5.5 a 6.0, sin embargo, se puede desarrollar en el rango de 5.3 a 7.5. Se considera un cultivo sensible a la salinidad, tolerando una conductividad eléctrica máxima de 1 dS m⁻¹, por encima de ese nivel los rendimientos de productividad disminuyen (Corral et al., 2013; Restrepo, Martínez y Carmona, 2007).

Los requerimientos de nutrientes esenciales de la planta de frijol son altas para el nitrógeno (134 kg ha⁻¹), potasio (117 kg ha⁻¹) y calcio (64 kg ha⁻¹) y menores en cantidad para azufre (23 kg ha⁻¹), magnesio (21 kg ha⁻¹) y fósforo (16 kg ha⁻¹) (Corral *et al.*, 2013). El frijol tiene la capacidad de formar nódulos en sus raíces haciendo simbiosis con la bacteria *Rhizobium*, la cual es capaz de convertir el N₂ atmosférico en amonio NH₄, lo que le brinda nitrógeno a la planta para su desarrollo y ayuda a la fertilización del suelo (Flores, 2015).

III. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la capacidad de siete Tecnosoles elaborados con residuos urbanos para permitir el desarrollo de plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*), mediante la evaluación de las propiedades físicas y químicas de los suelos y las variables de crecimiento, productividad y rasgos funcionales de las plantas.

3.2 Objetivos particulares

1. Analizar y comparar los rasgos vegetativos de crecimiento y productividad de las plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) sembradas en siete Tecnosoles y relacionar los resultados con las propiedades físicas y químicas de los Tecnosoles.
2. Analizar y comparar los rasgos funcionales de las plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) sembradas en siete Tecnosoles y relacionar los resultados con las propiedades físicas y químicas de los siete Tecnosoles.
3. Identificar patrones de expresión de rasgos funcionales que definan el manejo de recursos de las plantas de frijol de tipo adquisitivo o conservativo.
4. Determinar cuál de los siete Tecnosoles evaluados es el más adecuado para el cultivo de frijol.

IV. Hipótesis

1. Los tratamientos con compost y lombricompost añadirán materia orgánica humificada a los Tecnosoles, actuando como enmienda al mejorar sus propiedades físicas y químicas. Como resultado, los compost disminuirán la densidad aparente y el pH, incrementarán la porosidad (y con ello la capacidad de retención de agua disponible y la aireación), la conductividad eléctrica y la disponibilidad de nutrimentos en el suelo, particularmente el nitrógeno. Esto favorecerá el crecimiento y la productividad de las plantas de frijol.
2. Aunque los residuos de construcción y excavación tengan un pH básico debido a que contienen concreto que está compuesto principalmente por hidróxidos de Ca y Si, la alcalinidad no afectará el crecimiento de las plantas. Esto será resultado de que la mezcla de estos residuos con los compost, que tienen un pH neutro, contribuirá a disminuir el pH de los Tecnosoles a niveles que permitan el crecimiento de las plantas de frijol.
3. En suelos de buena calidad, las plantas presentarán una tendencia hacia estrategias de tipo adquisitivas. Mientras que, las plantas que crezcan en los Tecnosoles con características edáficas desfavorables presentarán una tendencia hacia estrategias de tipo conservativas.

V. Métodos

5.1 Diseño experimental

El experimento se llevó a cabo en un predio de la planta de compost de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se montó de abril a junio del 2017 y tuvo una duración de cinco meses. Para la elaboración de los Tecnosoles, se utilizaron materiales que pudieran emular las características de un suelo natural, compuesto por una fracción orgánica y una inorgánica o mineral. Los materiales que conformaron la fracción mineral fueron residuos de excavación y construcción que se adquirieron en la empresa Concretos Recicladados localizada en la alcaldía Iztapalapa. En lo que respecta a la fracción orgánica, se utilizó compost de residuos domésticos, proveniente de la planta del Gobierno de la Ciudad de México localizada en Iztapalapa, madera triturada que se consiguió en la Planta de Compost de Ciudad Universitaria, lombricompost y fertilizantes inorgánicos que se adquirieron con proveedores particulares. Las semillas de frijol *Phaseolus vulgaris L.* se adquirieron con productores locales de la Ciudad de México, para que las plantas estuvieran aclimatadas a las condiciones ambientales del Altiplano Mexicano.

Para decidir las proporciones en las que se mezclarían los residuos urbanos se realizó una caracterización física y química de estos materiales (Anexo A.1). Las proporciones fueron calculadas para obtener Tecnosoles con propiedades favorables para el crecimiento de las plantas. Se elaboraron siete Tecnosoles, las composiciones de los tratamientos se ilustran en la Figura 1.

Las mezclas se colocaron dentro de módulos elaborados de madera (1.40 m de ancho x 1.45 m de longitud y 0.35 m de altura) y se colocó una estructura con malla de gallinero para proteger a las plantas de aves y mamíferos (Figura 3). En el predio del experimento había un corte de roca que generaba un gradiente lumínico, para disminuir este efecto se implementó un diseño de bloques al azar (Sokal y Rohlf, 2012), conformado por siete tratamientos con cinco bloques; el acomodo de los bloques se representa en la Figura 2. Se sembraron 12 semillas por módulo en agosto del 2017; de entre las semillas que lograron germinar, se seleccionaron seis plantas por cada módulo experimental. El total de individuos de frijol en el experimento fue de 210 (siete

tratamientos, cinco bloques por tratamiento y seis plantas por módulo). Las plantas fueron regadas cada cuatro días a su capacidad de campo, con excepción de los días lluviosos.

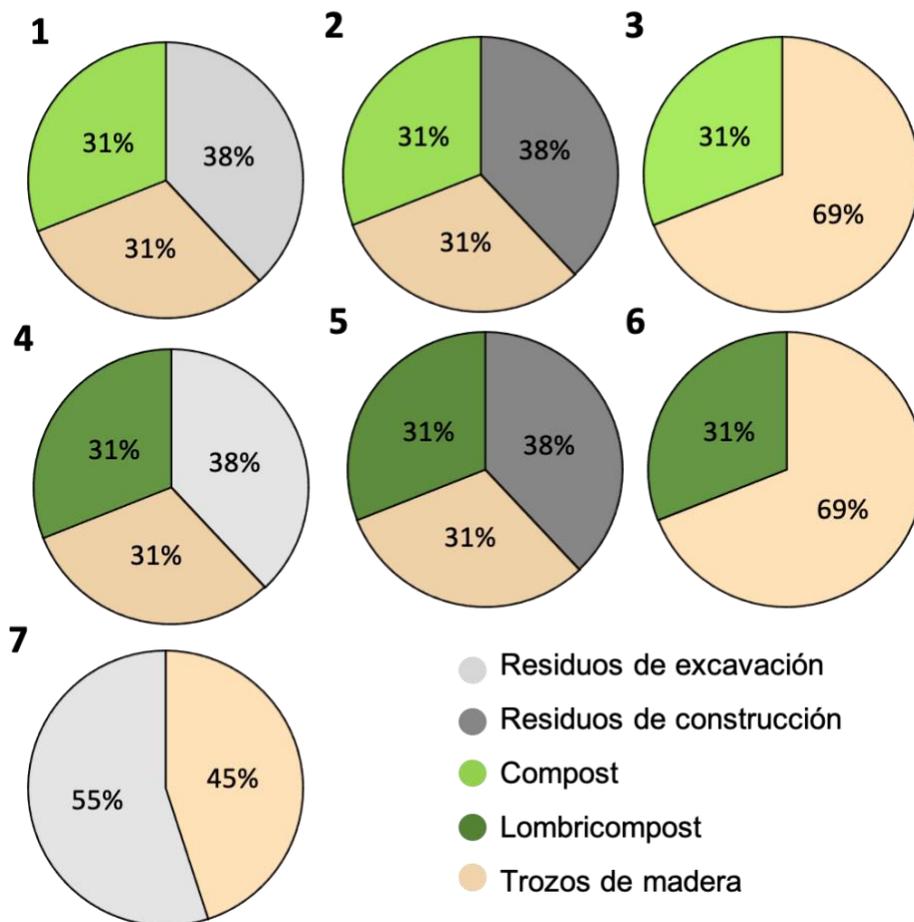


Figura 1. Características composicionales de los tratamientos.

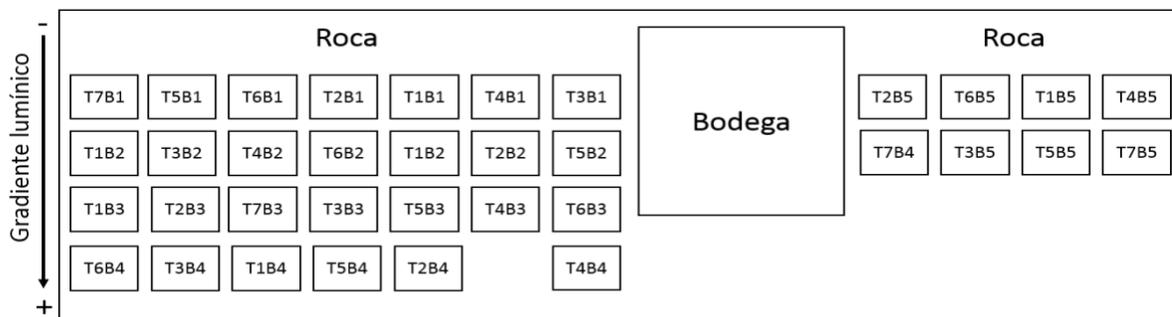


Figura 2. Croquis del diseño experimental conformado por siete tratamientos (T) dispuestos en cuatro bloques (B) al azar.



Figura 3. Preparación de los módulos y montaje del experimento.

5.2 Análisis físicos y químicos de los Tecnosoles

Para caracterizar los residuos urbanos (Anexo A.1) y los Tecnosoles, se analizaron siete propiedades físicas y químicas: densidad real (DR), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD), pH, conductividad eléctrica (CE) y conductividad hidráulica (Kfs). Adicionalmente, se realizaron análisis de carbono orgánico total, nitrógeno total, fósforo disponible (Bray u Olsen dependiendo del pH) y bases intercambiables. En los residuos urbanos los análisis de nutrimentos fueron totales y se realizaron en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, el resto de los análisis se realizaron en el Laboratorio de Edafología Ambiental, ambos del Instituto de Geología, UNAM.

La toma de muestras utilizadas para los análisis físicos y químicos se hizo al inicio del experimento. Para ello se tomó una porción de suelo de cada bloque por tratamiento y se homogenizó. Estas muestras junto con las de residuos urbanos fueron secadas al aire (Siebe *et al.*, 2006), molidas y tamizadas a 2 mm. Por otra parte, se recolectaron cinco cilindros de 100 cm³ por cada tratamiento para determinar la densidad aparente.

Con los resultados obtenidos en los análisis edafológicos, las observaciones realizadas en campo a lo largo del trabajo experimental y utilizando como referencia el “Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo” (Siebe *et al.*, 2006) se evaluó la calidad

de los siete Tecnosoles. Esta evaluación incluye los resultados de los análisis del crecimiento y la productividad para determinar el Tecnosol más adecuado para el cultivo de frijol.

5.2.1.1 Densidad real (DR)

Para el cálculo de esta variable, se utilizó el método del picnómetro (Blake y Hartge, 1986). Se pesó el picnómetro vacío, seco y con tapa (W_a), se adicionaron 10 g de muestra y se volvió a pesar (W_s); el picnómetro se llenó hasta la mitad con agua destilada (W_{sw}), se colocó en un desecador con vacío agitándolo para remover el aire retenido en el suelo y se dejó reposar durante 30 minutos. Posteriormente, el picnómetro se llenó por completo con agua destilada y se obtuvo su peso. Finalmente, el picnómetro se vació, se limpió con agua destilada y se pesó nuevamente (W_w). Se utilizó la siguiente ecuación para calcular la densidad real:

$$DR \text{ (g/cm}^3\text{)} = \rho_w(W_s - W_a) / [(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)]$$

Donde:

ρ_w = densidad del agua en gramos por centímetro cúbico;

W_s = peso del picnómetro con el suelo;

W_a = peso del picnómetro vacío;

W_{sw} = peso del picnómetro lleno con agua y suelo;

W_w = peso del picnómetro lleno con agua.

5.2.1.2 Densidad aparente (DA)

Se utilizó el método del cilindro de volumen conocido (Blake y Hartge, 1986). Para ello, se introdujo una barrena con un cilindro de 100 cm³ en cada tratamiento, teniendo cuidado de no compactar el suelo. Las muestras se colocaron en charolas de aluminio previamente pesadas (peso X) y se secaron en la estufa a 105° C durante 24 horas o hasta peso constante. Después de este tiempo las charolas se sacaron de la estufa y se pesaron en una balanza analítica (peso Y). La densidad aparente se calculó dividiendo el peso seco del suelo entre el volumen del suelo contenido en los cilindros.

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{peso Y (g)} - \text{peso X (g)}}{\text{volumen del cilindro (cm}^3\text{)}}$$

5.2.1.3 Porosidad total (PT)

A partir de las dos variables anteriores se calculó la porosidad de las muestras utilizando la siguiente ecuación (Giraldo, 2013):

$$PT = [1 - (DA/DR)] * 100$$

5.2.1.4 pH

Se pesaron en la balanza analítica 10 g de cada muestra, se colocaron en tubos de Nalgene junto con 25 ml de agua destilada y se agitaron durante 18 horas para homogeneizar la mezcla (Reeuwijk, 2002). El potencial de hidrógeno se midió utilizando un potenciómetro. Para ello, se introdujo el electrodo en la solución sin tocar la parte sólida y se procedió a realizar la lectura hasta que ésta se mantuvo estable. El potenciómetro se calibró previamente con las soluciones buffer de pH 4.00, 7.00 y 10.00. El electrodo se enjuagó entre cada medición con agua destilada.

5.2.1.5 Conductividad eléctrica (CE)

Se utilizaron las mismas soluciones preparadas para la medición del pH. La conductividad eléctrica se midió por medio de un conductímetro. El electrodo del equipo se sumergió en la solución sin tener contacto con la parte sólida y se tomó la lectura. El electrodo se enjuagó entre cada medición con agua destilada (Motsara y Roy, 2008).

5.2.1.6 Humedad volumétrica del suelo y capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD)

La medición de la humedad volumétrica del suelo se realizó mediante el sistema TDR (Time Domain Reflectometry) con un sensor de tres puntas, el cual se introdujo en el suelo en vertical en el interior de tubos de PVC de 5 cm de diámetro y de 100 cm de profundidad. Cada medida se realizó tres veces en un mismo punto y fue promediada (Fernandez *et al.*, 1994). La CRAD se determinó a partir del valor de la humedad volumétrica actual y el valor de humedad a capacidad de campo de los Tecnosoles.

5.2.1.7 Nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Al y Na)

El contenido de carbono orgánico total y el nitrógeno total se midieron con un autoanalizador de CNHS (Perkin Elmer 2400); para la estimación de carbono orgánico total se

utilizó en la ecuación el factor de Van Benmelen de 1.724 que resulta de suponer que la materia orgánica del suelo contiene un 58% de carbono ($1/0.58 = 1.724$) (Vela *et al.*, 2012):

$$\%CO = \%MO/1.724$$

Donde:

CO = Carbono orgánico total (%);

MO = Materia orgánica (%).

Para la medición del fósforo disponible se empleó el método de Olsen utilizando como extractante una disolución de NaHCO_3 0.5 M (Zalba *et al.*, 2002). Las bases intercambiables fueron extraídas con acetato de amonio 1 N a pH 7, el Ca y Mg fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica utilizando un equipo Perkin Elmer 3100, mientras que el K fue analizado con un flamómetro (Corning) (Reeuwijk, 2002). Los datos de concentración fueron transformados a unidades de masa por volumen, para ello se multiplicó la concentración (%) por la densidad aparente (g/cm^3) y el espesor del Tecnosol (3.5 dm), de esta forma se calculó la cantidad de nutrimentos por kg/m^2 (Siebe *et al.*, 2006).

5.3 Medición del crecimiento, la productividad y los rasgos funcionales de las plantas de frijol

Para evaluar el desempeño de las plantas de frijol al crecer sobre los Tecnosoles, se midieron variables de crecimiento, productividad y rasgos funcionales de hojas, raíces y tallo. La altura, la cobertura y el diámetro se midieron para cada individuo directamente en campo en tres ocasiones a los 40, 83 y 120 días después de la siembra.

Cuando las plantas alcanzaron el desarrollo máximo y tenían hojas y frutos (Salgado *et al.*, 2016) se realizó la colecta de un individuo por cada tratamiento y bloque, siendo un total de 35 individuos; para ello, las plantas fueron extraídas cuidadosamente del suelo cavando un agujero que permitiera identificar y rastrear raíces primarias, secundarias y finas teniendo cuidado de que estas no se dañaran o rompieran. Las muestras de raíces se guardaron en bolsas de plástico en una hielera hasta llegar al laboratorio de Edafología Ambiental, en donde se lavaron con agua corriente sobre un colador y con ayuda de un cepillo se retiró el exceso de suelo.

Las demás partes de las plantas de frijol se separaron en hojas, tallo y frutos y se midió la biomasa fresca de cada una de ellas con una balanza analítica. Posteriormente, las muestras (incluidas las raíces) se almacenaron en bolsas de papel y se metieron al horno a 60 °C hasta alcanzar valores de peso constante (aproximadamente 72 horas). Después de ese tiempo las muestras se pesaron nuevamente para obtener la biomasa seca de cada uno de los órganos de las plantas.

En total se analizaron siete rasgos funcionales, de los cuales dos corresponden a hojas: área foliar específica (AFE) y contenido foliar de materia seca (CFMS); cuatro rasgos funcionales de raíces: longitud radicular específica (LRE), área superficial específica de la raíz (ASER), densidad del tejido radicular (DTR) y biomasa de las raíces finas (BRF) y un rasgo funcional del tallo: biomasa del tallo (Bto).

5.3.1 Rasgos de crecimiento

5.3.1.1 Altura máxima de la planta (Alt)

La altura se midió con un flexómetro desde la base del tallo en contacto con el suelo hasta la punta del tallo o rama principal, sin considerar las inflorescencias, y siguiendo la curvatura del tallo principal (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2016).

5.3.1.2 Diámetro basal del tallo (Dia)

El diámetro se midió utilizando un vernier digital en la porción del tallo más cercana al suelo, por encima del cuello de la raíz.

5.3.1.3 Cobertura de la planta (Cob)

La cobertura se estimó aproximando el área de las plantas a la de una elipse. Para ello, se tomó la medida en metros de los dos diámetros perpendiculares que forma dicha figura geométrica (Zarco-Espinosa, 2010). Se utilizó la siguiente ecuación:

$$Cob(m)^2 = \pi * (d_1/2) * (d_2/2)$$

Donde:

d_1 = diámetro del eje 1 (m);

d_2 = diámetro del eje 2 (m).

5.3.1.4 Biomasa total (BioT)

La biomasa total se registró a partir del peso seco de las hojas, los tallos y las raíces. El peso seco se obtuvo colocando a las diferentes estructuras en una estufa a 60 °C hasta que alcanzaron un peso constante.

5.3.2 Rasgos vegetativos de productividad

Para medir la productividad de los Tecnosoles, se realizó la cosecha de las plantas de frijol en noviembre del 2017, cuando las plantas habían alcanzado su máximo crecimiento (Salgado *et al.*, 2016). Una vez cosechadas las plantas de frijol, se separaron los frutos y se secaron en la estufa a 60 °C hasta que alcanzaron su peso constante. Estando secas las vainas fueron pesadas (biomasa de semillas), posteriormente las vainas se abrieron y se extrajeron las semillas, las cuales fueron contadas (número de semillas).

5.3.3 Rasgos funcionales de hojas

5.3.3.1 Área foliar específica (AFE)

De cada individuo se seleccionaron cinco hojas que visualmente estuvieran en el mejor estado, es decir que presentaran un desarrollo completo, sin presencia de herbivoría, daños o alteraciones de color; se lavaron en agua acidulada (ácido clorhídrico 0.1 M), se enjuagaron tres veces con agua destilada, se prensaron y secaron a 60 °C por 72 horas. Posteriormente, se calculó el área foliar para toda la hoja (considerando los tres folíolos que componen la hoja del frijol, pero no el raquis). Para ello se utilizó un escáner de alta resolución marca Epson y el software ImagePro 7.0, teniendo cuidado que las hojas estuvieran totalmente extendidas para no subestimar el área. El área foliar específica se estimó para cada hoja dividiendo su área entre su biomasa seca (sin considerar el raquis). Con estos datos se calculó un promedio por individuo con las cinco hojas (Cornelissen *et al.*, 2003).

5.3.3.2 Contenido foliar de masa seca (CFMS)

El contenido de materia seca foliar se estimó a partir de la división entre la biomasa seca foliar de todas las hojas por individuo y la biomasa fresca de las mismas (Salgado, *et al.*, 2015).

5.3.4 Rasgos funcionales de raíces

La medición de rasgos funcionales radicales se enfocaron en las raíces finas (diámetro menor a 2 mm; Salgado *et al.*, 2016) pues éstas juegan un papel fundamental en la absorción de agua y nutrimentos para las plantas (Prieto *et al.*, 2015). Se analizaron 35 raíces de individuos que corresponden a una muestra por bloque de los siete tratamientos. Las raíces se escanearon a una resolución de 200 ppi utilizando el programa WinRizho (Regent Instruments Inc, 2018), el cual proporciona valores de longitud, área proyectada y superficial y volumen por clases de diámetro. Ya que el software brinda la información por clases de diámetro en milímetros, se separaron y sumaron los datos de las clases con un diámetro menor o igual a 2mm. Estos datos son los que se emplearon para el análisis de rasgos funcionales de raíces. Posteriormente, las muestras se secaron en el horno a 60 °C alrededor de 72 horas. Las raíces finas fueron separadas del resto de la raíz para medir su biomasa seca con una balanza analítica.

5.3.4.1 Biomasa de las raíces finas (BRF)

La variable corresponde a la biomasa seca de las raíces finas.

5.3.4.2 Longitud radicular específica (LRE)

Esta variable se obtuvo de la división entre la longitud y la biomasa seca de las raíces finas (Salgado *et al.*, 2016).

5.3.4.3 Área superficial específica de la raíz (ASER)

Para estimar este rasgo, se dividió el área de las raíces finas (< 2 mm) entre la biomasa seca de las mismas.

5.3.4.4 Densidad del tejido radicular (DTR)

La DTR se calculó a partir de dividir la biomasa seca de las raíces finas entre su volumen.



Figura 4. Procesamiento de las plantas de frijol para la toma de datos.

5.4 Análisis estadísticos

Todos los análisis estadísticos se realizaron con ayuda del software R V. 3.5.3 (R Core Team, 2020).

5.4.1.1 Rasgos vegetativos de crecimiento a lo largo del tiempo

Las variables de crecimiento que fueron medidas en campo (altura máxima de la planta, cobertura de la planta y diámetro basal del tallo) fueron representadas por medio de gráficas con promedio y error estándar para las tres mediciones realizadas a lo largo del experimento.

5.4.1.2 Modelos de regresión lineal simples

Para analizar las variables de crecimiento, productividad y rasgos funcionales de las plantas de frijol, se realizaron regresiones lineales simples en función de los diferentes tratamientos. La finalidad fue estudiar la respuesta de estas variables bajo condiciones de buena y mala calidad de los Tecnosoles. Las variables dependientes fueron los datos de crecimiento, productividad y rasgos funcionales, mientras que las variables independientes fueron los tratamientos y los bloques.

En estos análisis se tomó en cuenta el diseño factorial y los bloques al azar implementados para considerar el efecto del gradiente lumínico en el crecimiento de las plantas. En ellos se planteó como hipótesis nula que las medias de los siete tratamientos no se diferenciaban entre sí, con un nivel de significancia de *alfa* 0.05 (Minitab, 2019). En todos los casos se aplicaron las pruebas normalidad de Shapiro-Wilk ($P < 0.05$) y homocedasticidad de Bartlett ($P < 0.05$) para comprobar que los residuos de los datos estuvieran distribuidos normalmente y que tuvieran una varianza constante, así como exploraciones visuales. En los datos que no cumplieron con los supuestos de la regresión lineal, se hicieron transformaciones logarítmicas (Pelea, 2018). Posteriormente se aplicó la prueba *post hoc* de Tukey-Kramer para identificar los grupos homogéneos. También se presentan gráficas con los promedios estimados por los modelos y sus errores estándar.

En total se analizaron cuatro variables de crecimiento: altura máxima de la planta (Alt), diámetro basal del tallo (Dia), cobertura de la planta (Cob) y biomasa total (BioT). Para las variables altura, cobertura y diámetro del tallo se utilizó el valor de la última medición (120 días después de la siembra). También se analizaron dos variables de productividad: biomasa de semillas (BS) y número de semillas (NS). Y siete rasgos funcionales, de los cuales dos corresponden a hojas: área foliar específica (AFE) y contenido foliar de masa seca (CFMS); cuatro a rasgos funcionales de raíces: longitud radicular específica (LRE), área superficial específica de la raíz (ASER), densidad del tejido radicular (DTR), biomasa de las raíces finas (Brf) y un rasgo funcional del tallo: biomasa el tallo (Bto).

5.4.1.3 Análisis de componentes principales (ACP)

Con la finalidad de reducir la dimensión de los datos, identificar las tendencias de covariación y detectar aquellas variables que tuvieron una mayor influencia dentro de un grupo (González, C. *et al*, 2006). Se realizaron dos análisis de componentes principales (ACP) utilizando la matriz de covarianza. En el primer ACP se incluyeron las variables de crecimiento (altura máxima de la planta, cobertura, diámetro del tallo y biomasa total), productividad y las variables edáficas. En el segundo ACP se incluyeron los siete rasgos funcionales junto con las variables físicas y químicas del suelo.

VI. Resultados

6.1 Rasgos vegetativos de crecimiento

6.1.1 Rasgos vegetativos de crecimiento a lo largo del tiempo

La Figura 5 muestra el promedio y error estándar de las variables de crecimiento: altura máxima de la planta, cobertura de la planta y diámetro basal del tallo (incluyendo la variación aportada por los 5 bloques), en tres diferentes mediciones realizadas a lo largo del cultivo de frijol, a los 40, 83 y 130 días después de la siembra.

En el caso de la altura se puede observar que los tratamientos comenzaron a diferenciarse desde el inicio del experimento. En promedio las plantas del tratamiento 6 mostraron una altura mayor que el resto de los tratamientos, lo cual se acentuó en la tercera medición. Al final del cultivo se diferencian 3 grupos, el primero conformado por el tratamiento 6, el segundo grupo lo integran los tratamientos 1, 3, 4 y 5 y el último grupo formado por los tratamientos 2 y 7. Las plantas del tratamiento 6 fueron 33 y 49% más grandes que las del segundo y tercer grupo respectivamente. Cuatro de los tratamientos con los valores promedios más altos para esta variable (tratamientos 3, 4, 5 y 6) contenían lombricompost en su composición y solo uno compost (tratamiento 1). Los tratamientos 2 y 7 mostraron los valores más bajos para la variable altura en las tres mediciones.

En lo que respecta al diámetro, al final del experimento se pudieron distinguir tres grupos que son similares a los registrados en la variable altura de la planta. En promedio las plantas del tratamiento 6 siguen siendo las que presentan valores promedio más altos, el grupo 2 cambia un poco en su composición y solo estuvo conformado por los tratamientos 5 y 4. El tercer grupo estuvo constituido por el resto de los tratamientos (3, 1, 2 y 7). Las plantas del tratamiento 6 fueron 14 y 24% más grandes que las del segundo y terceros grupos respectivamente. Los tres Tecnosoles con el mejor desempeño para esta variable contenían lombricompost (6, 5 y 4). El tratamiento 7 presentó los valores promedio más bajos en las tres mediciones realizadas.

En cuanto a la cobertura de las plantas, también se distinguen tres grupos, nuevamente el primero conformado por el tratamiento 6, el segundo por los tratamientos 5, 3 y 4 y el tercer grupo

por los tratamientos 1, 2 y 7. En promedio las plantas del tratamiento 6 son 46 y 71% mayores que el segundo y tercer grupo respectivamente. Tres de los cuatro mejores Tecnosoles para esta variable presentaban lombricompost (6, 5 y 4). Como en las dos variables anteriores el tratamiento 6 y 7, presentaron los valores más altos y bajos respectivamente.

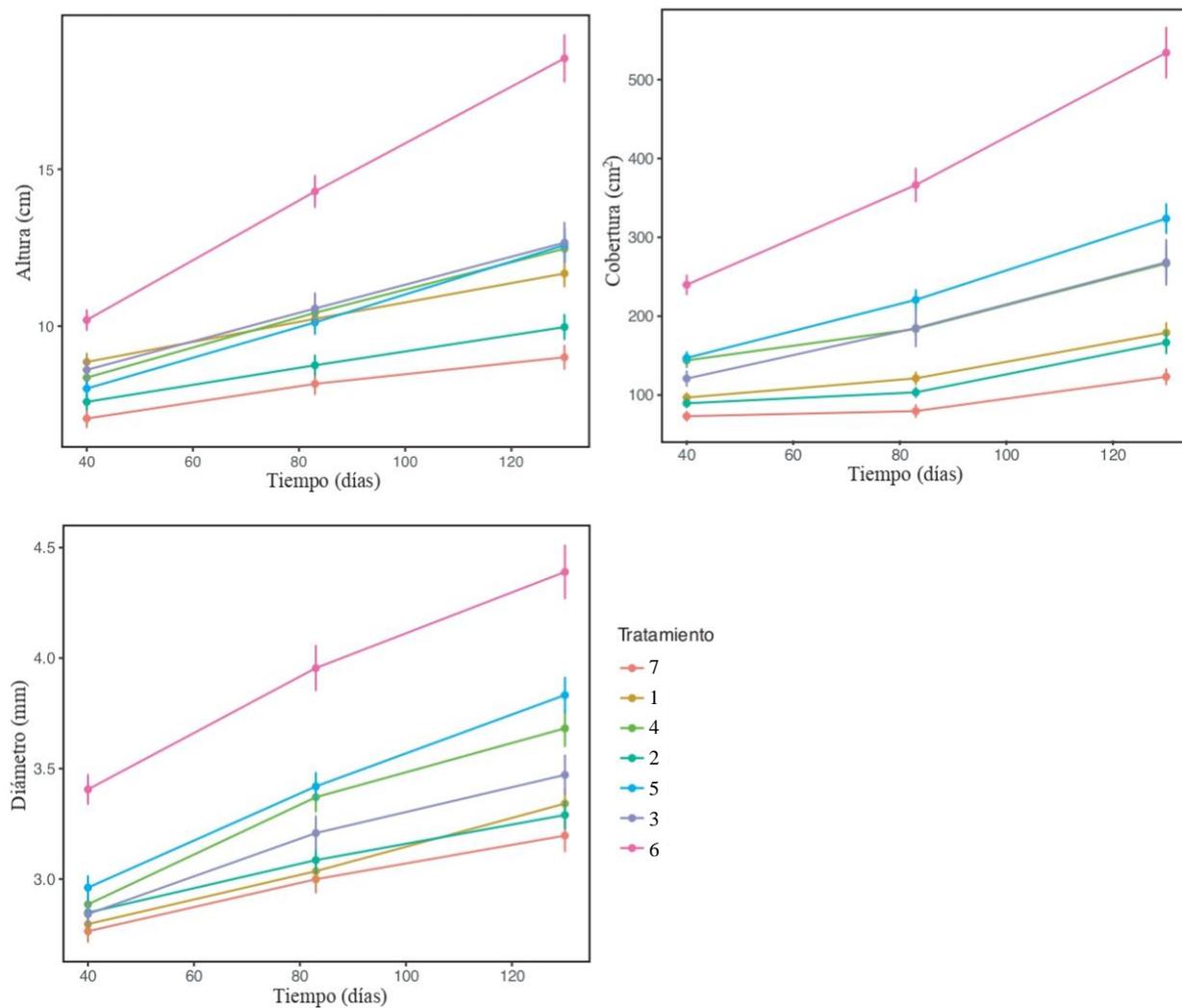


Figura 5. Variables de crecimiento de las plantas (altura, cobertura y diámetro) a los 40, 83 y 130 días después de la siembra de frijol.

6.1.2 Modelos lineales de variables de crecimiento de las plantas

6.1.2.1 Altura máxima de la planta (Alt)

El modelo de regresión lineal simple explicó el 31% de la variación (Tabla 2). El valor estimado para el intersepto fue de 11.67 cm, para las plantas que crecen en el tratamiento 1 (residuos de excavación y compost). En la prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 3) se observa la existencia de tres grupos homogéneos, que se representan con letras en la Figura 6. El tratamiento 7 fue significativamente diferente al resto, con el valor promedio de altura más bajo (9.0 cm). Por el contrario, el tratamiento 6 obtuvo los valores medios más altos (18.5 cm). Los tratamientos 3,4 y 5 no presentaron diferencias entre sí.

Tabla 2. Resultados del modelo lineal para la variable altura máxima entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	p
(Intercepto)	0.52	11.67	<0.001
2	0.74	-1.70	0.022
3	0.74	0.98	0.185
4	0.73	0.79	0.284
5	0.74	0.90	0.222
6	0.74	6.85	<0.001
7	0.74	-2.66	0.000
R ² / R ² ajustada	0.328 / 0.318	n=411	

Tabla 3. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable altura máxima entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	9.01	0.53	411	7.96	10.10	a
2	9.97	0.52	411	8.93	11.00	ab
1	11.68	0.52	411	10.65	12.70	bc
4	12.47	0.52	411	11.45	13.50	c
5	12.58	0.52	411	11.55	13.60	c
3	12.66	0.52	411	11.63	13.70	c
6	18.54	0.52	411	17.51	19.60	d

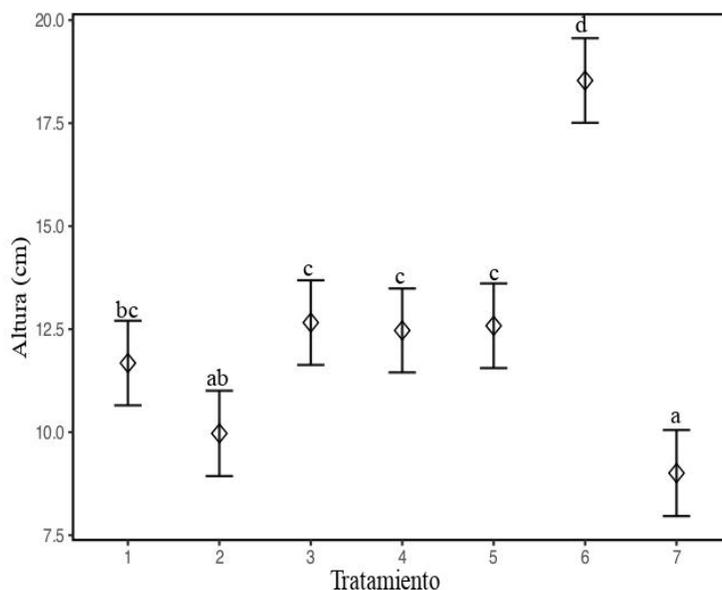


Figura 6. Promedios estimados de la altura máxima entre tratamientos.

6.1.2.2 Diámetro basal del tallo (Dia)

Para la variable del diámetro del tallo el modelo de regresión lineal simple explicó el 25% de la variación (Tabla 4). Los tratamientos 4, 5 y 6 presentaron diferencias significativas al intercepto (tratamiento 1), lo cual se observa mejor en la Tabla 5. La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 5, Figura 7) muestra la existencia de tres grupos homogéneos. Al igual que para la variable altura los tratamientos 7 y 2 presentaron los valores promedios más bajos. El tratamiento 6 obtuvo los valores medios más altos (4.3 mm).

Tabla 4. Resultados del modelo lineal para la variable diámetro del tallo entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	0.08	3.34	<0.001
2	0.12	-0.05	0.663
3	0.12	0.13	0.272
4	0.12	0.34	<0.001
5	0.12	0.50	<0.001
6	0.12	1.05	<0.001
7	0.12	-0.14	0.224
R^2 / R^2 ajustada	0.262 / 0.251		n=411

Tabla 5. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable diámetro del tallo entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	3.20	0.08	411	3.03	3.36	a
2	3.29	0.08	411	3.12	3.46	a
1	3.34	0.08	411	3.18	3.51	ab
3	3.47	0.08	411	3.31	3.64	ab
4	3.68	0.08	411	3.52	3.84	bc
5	3.83	0.08	411	3.67	4.00	c
6	4.39	0.08	411	4.23	4.55	d

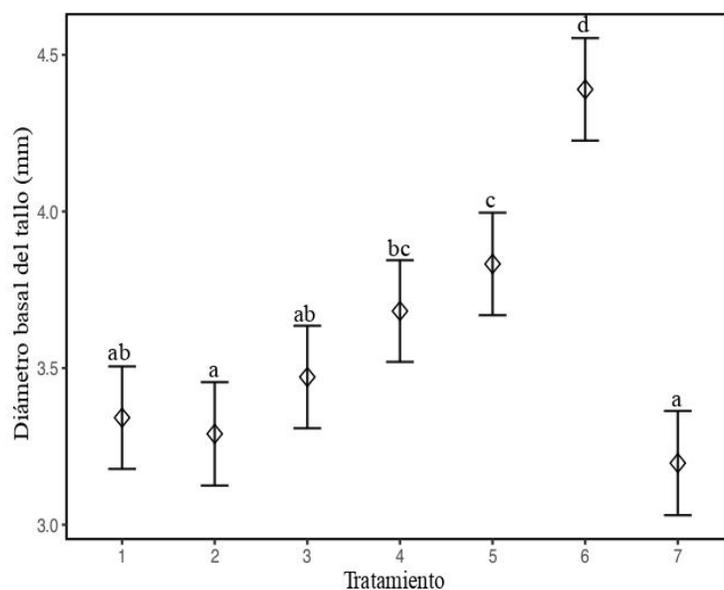


Figura 7. Promedios estimados del diámetro del tallo entre tratamientos.

6.1.2.3 Cobertura de la planta (Cob)

El modelo de regresión lineal simple explicó el 38% de la variación (Tabla 6). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 7, Figura 8) muestra la existencia de tres grupos homogéneos. En el primer grupo con los valores promedio de cobertura más bajos se encuentran los tratamientos 7, 2 y 1. Los tratamientos 4, 3 y 5 pertenecen al segundo grupo con valores intermedios que van en un rango de 226.5 a 283.2 cm². Al igual que para las variables altura y diámetro el tratamiento 6 presentó los valores medios más altos (493.5 cm²).

Tabla 6. Resultados del modelo lineal para la variable cobertura entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	p
(Intercepto)	0.52	179.00	<0.001
2	0.74	-12.33	0.674
3	0.74	89.34	0.002
4	0.73	87.78	0.002
5	0.74	144.80	<0.001
6	0.74	355.12	<0.001
7	0.74	55.77	0.059
R ² / R ² ajustada	0.390 / 0.381		n=411

Tabla 7. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable cobertura entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	123.0	21.0	411	81.9	165	a
2	167.0	20.8	411	125.7	208	a
1	179.0	20.7	411	138.4	220	a
4	267.0	20.5	411	226.5	307	b
3	268.0	20.7	411	227.7	309	b
5	324.0	20.7	411	283.2	364	b
6	534.0	20.7	411	493.5	575	c

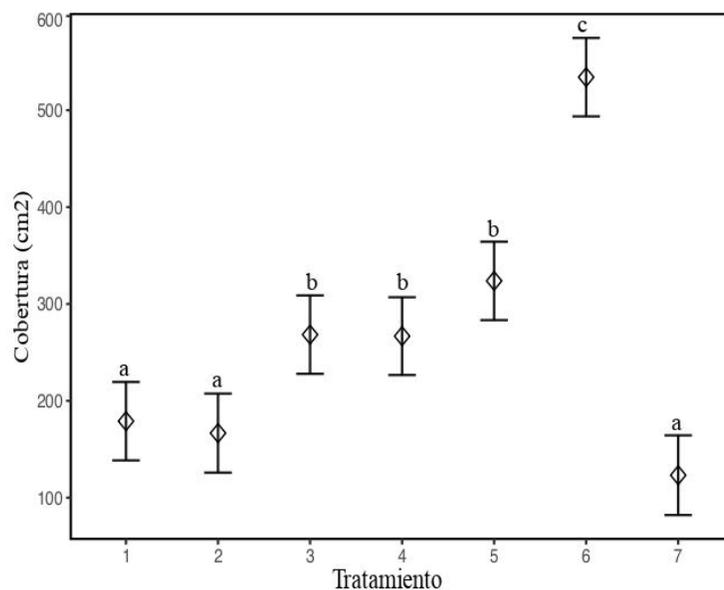


Figura 8. Promedios estimados de la cobertura entre tratamientos.

6.1.2.4 Biomasa total (BioT)

El modelo de regresión lineal simple explicó el 17% de la variación (Tabla 8). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 9, Figura 9) muestra la existencia de dos grupos homogéneos. El tratamiento 6 se diferenció del resto pues presentó los valores más altos para esta variable (4g).

Tabla 8. Resultados del modelo lineal para la variable biomasa total entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	0.40	1.57	<0.001
2	0.52	-0.46	0.377
3	0.54	0.87	0.110
4	0.53	0.55	0.205
5	0.55	0.94	0.088
6	0.55	2.45	<0.001
7	0.58	-0.63	0.279
R^2 / R^2 ajustada	0.198 / 0.172		n=183

Tabla 9. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable biomasa total entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	0.94	0.42	183	0.10	1.78	a
2	1.11	0.34	183	0.44	1.78	a
1	1.57	0.40	183	0.77	2.38	a
4	2.13	0.35	183	0.43	2.82	a
3	2.45	0.36	183	0.73	3.17	a
5	2.52	0.37	183	0.78	3.27	ab
6	4.03	0.38	183	3.28	4.79	b

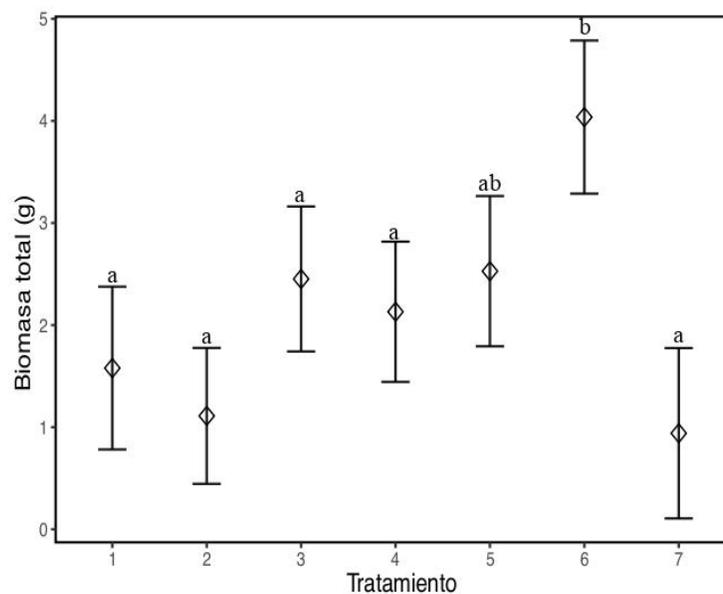


Figura 9. Promedios estimados de la biomasa total entre tratamientos.

6.2 Rasgos vegetativos de productividad

6.2.1 Modelos lineales de las variables de productividad

6.2.1.1 Número de semillas

En cuanto al número de semillas el modelo de regresión lineal explica el 23% de la variación (Tabla 10). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 11, Figura 10) muestra la existencia de dos grupos homogéneos. Únicamente el tratamiento 6 se diferenció del resto pues presentó los valores más altos para esta variable.

Tabla 10. Resultados del modelo lineal para la variable número de semillas entre tratamientos.

Variabes (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	3.26	11.25	<0.001
2	4.66	-3.59	0.441
3	4.40	4.44	0.315
4	4.56	3.23	0.480
5	4.34	4.52	0.299
6	4.34	24.33	<0.001
7	5.25	-4.31	0.412
R ² / R ² ajustada	0.259 / 0.233	n=171	

Tabla 11. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable número de semillas entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	6.93	4.12	171	-1.21	15.10	a
2	7.65	3.33	171	1.08	14.20	a
1	11.25	3.26	171	4.81	17.70	a
4	14.48	3.19	171	8.17	20.80	a
3	15.69	2.97	171	9.83	21.50	a
5	15.77	2.87	171	10.11	21.40	a
6	35.58	2.87	171	29.92	41.20	b

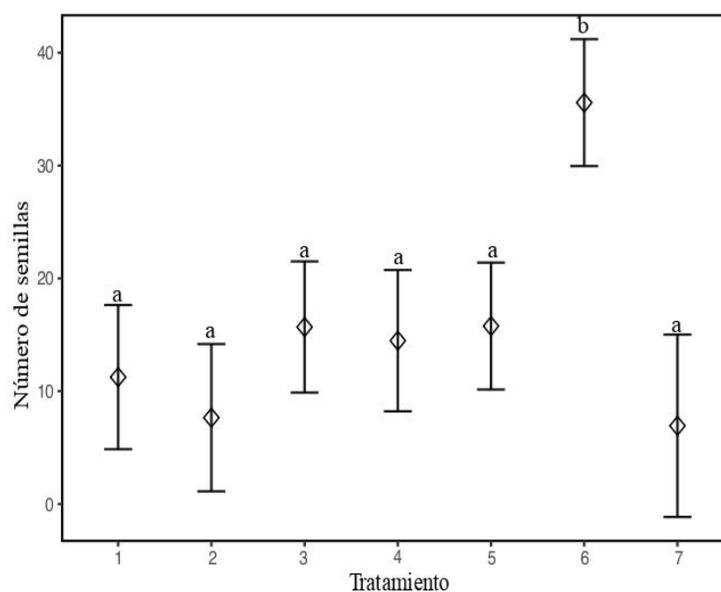


Figura 10. Promedios estimados del número de semillas entre tratamientos.

6.2.1.2 Biomasa de semillas

El modelo de regresión lineal para la variable biomasa de semillas explicó el 23% de la variación (Tabla 12). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 13, Figura 11) muestra la existencia de dos grupos homogéneos. El tratamiento 6 fue significativamente diferente al resto pues presentó los valores más altos. El resto de los tratamientos no se diferenciaron entre sí.

Tabla 12. Resultados del modelo lineal para la variable biomasa de semillas entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	0.46	1.10	0.019
2	0.66	-0.29	0.654
3	0.63	0.70	0.268
4	0.65	0.40	0.532
5	0.62	0.85	0.179
6	0.62	3.65	<0.001
7	0.75	-0.29	0.698
R^2 / R^2 ajustada	0.261/ 0.235		n=178

Tabla 13. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable biomasa de semillas entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
2	0.80	0.47	171	-0.13	1.75	a
7	0.81	0.59	171	-0.35	1.98	a
1	1.10	0.46	171	0.18	2.03	a
4	1.51	0.45	171	0.61	2.42	a

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
3	1.80	0.42	171	0.96	2.64	a
5	1.95	0.41	171	1.14	2.77	a
6	4.75	0.41	171	3.94	5.57	b

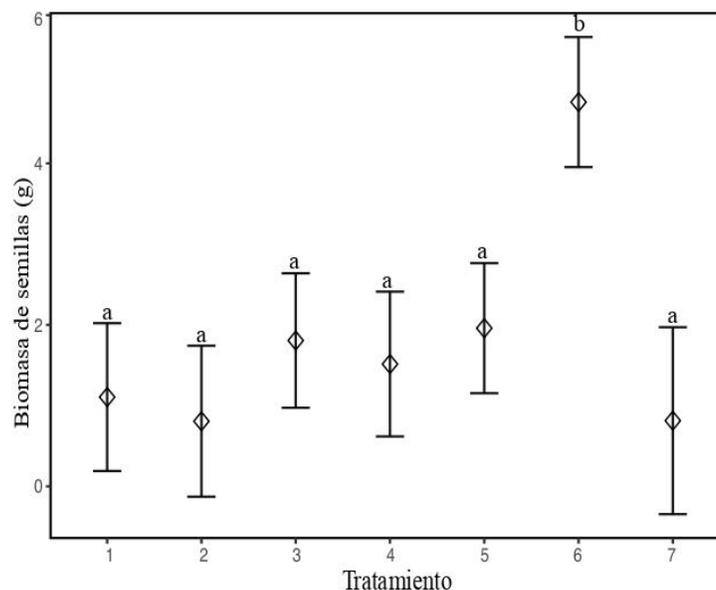


Figura 11. Promedios estimados de la biomasa de las semillas entre tratamientos.

6.3 Análisis de componentes principales de variables de crecimiento, productividad y propiedades del suelo

En el análisis de componentes principales (ACP) realizado con las variables de crecimiento, biomasa total, productividad y propiedades edáficas suelo, se obtuvo que los dos primeros componentes principales lograron explicar el 66% de la variación de los datos y agregando un tercer componente, se explicó el 86% (Tabla 14). El primer componente principal tiene asociaciones positivas grandes con la densidad aparente, la porosidad y la concentración de mercurio. Las variables de concentración de algunos de los nutrientes evaluados (C, P y K) presentaron una asociación positiva con la densidad y el pH. El segundo componente principal está claramente representado por las variables de crecimiento y productividad de las plantas de frijol. Dichas variables tuvieron una relación positiva con las propiedades del suelo pH, CRAD y con la concentración de los nutrientes P, K y Ca (Tabla 15).

En el tercer componente principal (CP3) las variables de las plantas no tuvieron peso mientras que las propiedades del suelo tomaron la mayor relevancia, este componente se podría interpretar como la evaluación de calidad del suelo.

Tabla 14. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales entre variables de crecimiento, biomasa y suelo.

	CP1	CP2	CP3
Desviación estándar	3.10	2.05	1.66
Proporción de varianza explicada	45.8%	20.1%	13.1%
Proporción de varianza explicada acumulada	45.8%	66.0%	86.0%

Tabla 15. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa y suelo.

Variabes	CP1	CP2	CP3
Diámetro (Dia)	0.11	0.37	0.11
Altura (Alt)	0.17	0.31	—
Cobertura (Cob)	0.18	0.33	—
Biomasa total (BioT)	0.14	0.29	—
Número de semillas (NS)	0.19	0.34	—
Biomasa de semillas (BS)	0.17	0.32	—
Densidad aparente (DA)	-0.30	0.12	—
Densidad real (DR)	-0.25	—	0.34
Porosidad (PT)	0.27	-0.16	0.22
pH	-0.23	0.20	-0.30
Conductividad eléctrica (CE)	0.21	—	0.14
Capacidad de retención de agua (CRAD)	-0.25	0.26	—
C	0.19	-0.12	-0.43
N	—	-0.24	-0.27
P	-0.26	0.14	0.15
K	-0.27	0.15	—
Ca	-0.27	0.17	-0.22
Mg	—	-0.12	0.56
C/N	0.20	0.18	-0.23
Hg	0.31	—	-0.15
Conductividad hidráulica (Kfs)	0.25	—	-0.29

Los valores representativos se muestran en negritas.

En la Figura 12 se muestra el biplot del análisis de componentes principales (ACP) entre el componente principal 1 (CP1) y el 2 (CP2), incluyendo la distribución para los tratamientos. En la región positiva del CP1, las variables edáficas calcio, fósforo, potasio, densidad aparente y pH se relacionaron positivamente entre sí y de manera negativa con la porosidad, la conductividad eléctrica, el magnesio y el carbono. En la región positiva del CP2 se distribuyen las variables de crecimiento, biomasa total y productividad. El tratamiento 6 se distribuye cerca de los valores altos de las variables de crecimiento y productividad de las plantas mientras que los tratamientos 1, 4 y 7 se distribuyen en la región negativa al CP2 del lado contrario de dichas variables.

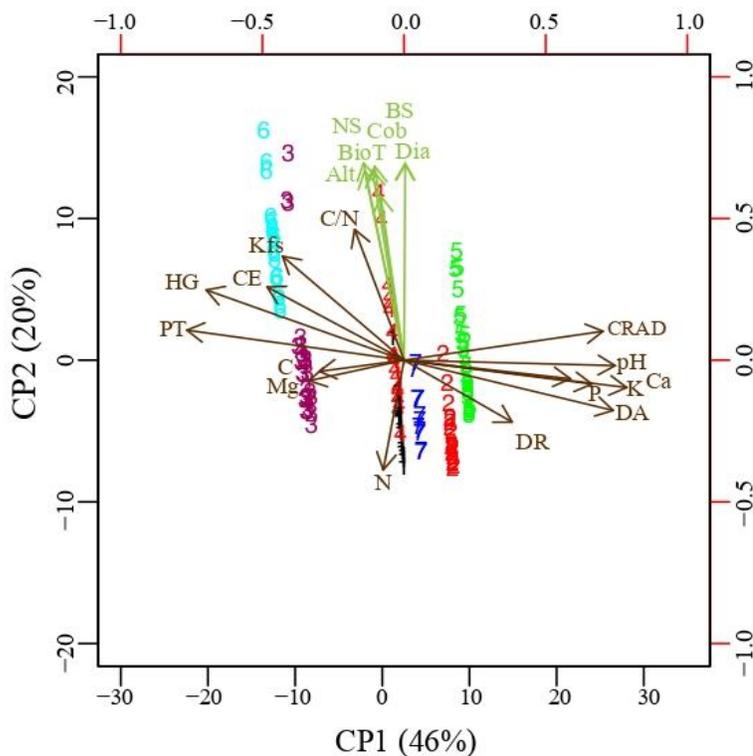


Figura 12. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa total, productividad y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP2.

En la Figura 13 se muestra la covariación entre el CP1 y CP3. Las variables de crecimiento y productividad tuvieron muy poco peso en el CP3 y se localizaron en la región positiva de ese componente. Se correlacionaron positivamente con la conductividad eléctrica, la porosidad y la conductividad hidráulica. Se puede observar que existe una tendencia a la agrupación de los tratamientos que se consideraron con los mejores resultados en cuanto a crecimiento y

productividad (3 y 6). En la región negativa del CP3 se localizan los tratamientos 7, 4 y 1 (considerados los que obtuvieron resultados más bajos en cuanto a crecimiento y productividad). El CP1 mantuvo las mismas tendencias.

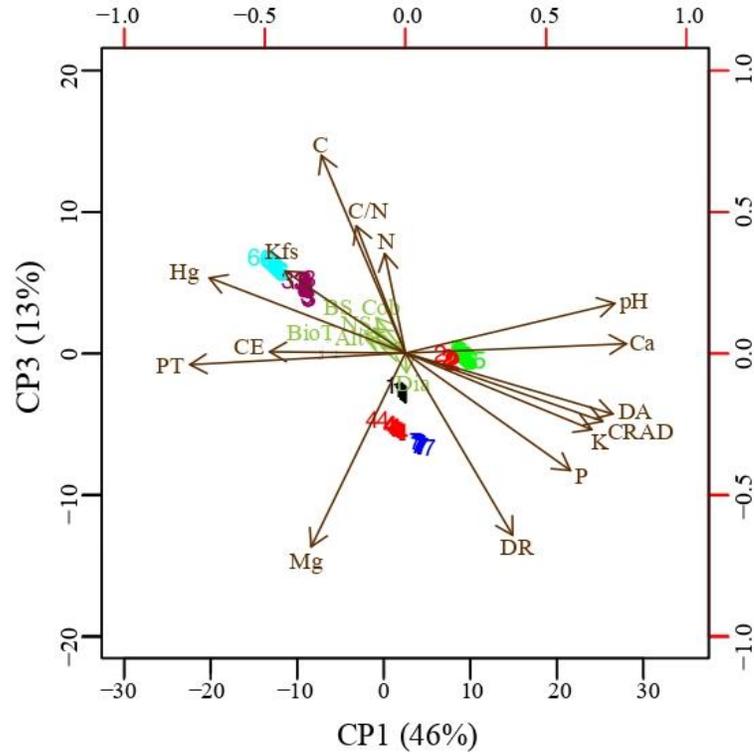


Figura 13. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa total, productividad y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP3.

6.4 Evaluación edafocológica de los Tecnosoles elaborados para el cultivo de frijol

6.4.1 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con residuos de excavación, compost, lombricompost y trozos de madera

Tres de los siete Tecnosoles fabricados contenían residuos de excavación: los tratamientos 1 y 4 (38%) y el 7 (55%); además a los tres tratamientos se les agregó trozos de madera, 31% al 1 y 4, y 45% al 7 (Figura 1). La diferencia en la composición de estos Tecnosoles es que el tratamiento 1 fue mezclado con compost (31%), el 4 con lombricompost (31%), mientras que al 7 no se le adicionó ningún tipo de compost, pero se le aplicaron pequeñas cantidades de fertilizantes. Los residuos de excavación empleados estaban compuestos de una mezcla de cemento, cascajo y suelo natural, que no fue triturado porque su textura era arcillosa. De manera general, se observó que los tratamientos con residuos de excavación tenían la propiedad de formar estructura en poco tiempo, pues al final del experimento se apreció al tacto una agregación moderada en ellos, esta propiedad se vio favorecida en los tratamientos que contenían compost (1 y 4). Por otra parte, la porosidad en el tratamiento 1 alcanzó un valor de 67.5% y fue evaluada como buena, mientras que en los tratamientos 4 y 7 la porosidad fue mayor, 75.8% y 71.2% respectivamente, pero se evaluó como media, debido a que una alta porosidad genera un mayor gasto de agua por el exceso de drenaje. La densidad aparente en los tres tratamientos fue de 0.6 g/cm³, y fue evaluada como buena (Tabla 16).

La conductividad eléctrica de los tres tratamientos está por debajo de niveles que pudieran influir en el crecimiento de las plantas de frijol, su calidad fue evaluada como buena (tratamientos 4 y 7) y muy buena (tratamiento 1). A pesar de la alcalinidad de los residuos de excavación (pH de 7.7), los tres tratamientos tuvieron valores ligeramente ácidos pero adecuados para la absorción de nutrimentos por lo que se evaluaron como buenos. Para la variable nitrógeno total, el tratamiento 1 fue evaluado como bueno (1.3 kg/m²), el 4 como medio (0.66 kg/m²) y el 7 como regular (0.43 kg/m²) (Siebe *et al.*, 2006). La cantidad de carbono en los tres tratamientos fue evaluada buena, tomando en consideración que el carbono de estos Tecnosoles es lábil y poseen una cantidad intermedia del mismo (menos de 20 kg/m²) en comparación con otros Tecnosoles,

por lo que sus emisiones a la atmósfera estarían en niveles aceptables (no registradas en este estudio). La relación C/N fue evaluada como buena en el tratamiento 1 (14.6) y regular en los tratamientos 4 y 7 (>20). La concentración de fósforo se evaluó como regular (fluctuando entre 18.9 y 39.4 g/m²) para los tres tratamientos. Para las bases intercambiables (incluyendo el sodio) los tres tratamientos fueron evaluados como regulares, pues sus valores fluctuaron alrededor de 11 cmol_c/kg (Siebe *et al.*, 2016).

Las variables de crecimiento: altura, cobertura, diámetro, y de productividad: biomasa de semillas, y número de semillas, fueron evaluadas como regulares en el tratamiento 4 y malas en los tratamientos 1 y 7. Solamente el diámetro del tratamiento 4 fue evaluado como medio. El mejor desempeño del crecimiento y la productividad de las plantas en este grupo de Tecnosoles, se presentó en el tratamiento 4, a pesar de no haber obtenido las mejores calificaciones en cuando a la calidad del suelo (Tabla 16).

6.4.2 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con residuos de construcción, compost, lombricompost y trozos de madera

Los tratamientos 2 y 5 contenían un 38% de residuos de construcción, el primero fue mezclado con compost (31%), y el segundo con lombricompost (31%) y ambos contenían 31% de trozos de madera (Figura 1). Los residuos de construcción estaban triturados en partículas de 2 a 5 mm aproximadamente y a pesar de que su textura fue más fina, estos tratamientos no tuvieron la propiedad de formar agregados en un periodo corto de tiempo, como ocurrió en los tratamientos con residuos de excavación. Por otra parte, aunque el pH de los residuos de construcción fue alcalino (8.8), al mezclarse con compost (pH 6.9), lombricompost (pH 6.8) y con trozos de madera (pH 5.3), se obtuvieron Tecnosoles con propiedades favorables para el cultivo de las plantas de frijol. Los tratamientos 2 y 5 fueron evaluados de calidad media para esta variable, pues presentaron pHs moderadamente alcalinos (8.3 y 8.1 respectivamente), en comparación con el resto de los tratamientos que tuvieron un pH ligeramente ácido (Tabla 16).

Los valores de conductividad eléctrica para estos tratamientos fueron muy bajos (0.6 mS/cm) por lo que no afectaron el crecimiento de las plantas de frijol (Siebe *et al.*, 2016). La capacidad de retención de agua disponible para las plantas fue evaluada regular en el tratamiento

2 (80.5 L/m²) y buena en el tratamiento 5 (147 L/m²), de manera general se observó que la incorporación de trozos de madera en todos los tratamientos favoreció la aireación y ayudó a regular el pH y la conductividad eléctrica.

La densidad real de los residuos de construcción fue media (2.5 g/cm³), pero disminuyó al mezclarse con otros materiales menos densos como el compost, el lombricompost y los trozos de madera. La densidad aparente se evaluó como buena para los tratamientos 2 y 5 (0.6 y 0.5 g/cm³, respectivamente) pues permitió un buen desarrollo del sistema radical, incluyendo a las raíces finas (Siebe *et al.*, 2016). La porosidad fue mayor en el tratamiento en el que se aplicó compost (65.6%) que en el tratamiento en el que se aplicó lombricompost (58.8%), ambos fueron evaluados como buenos para esta variable, pues se mantuvo un espacio poroso adecuado que favoreció el crecimiento y la aireación de las raíces (Tabla 16).

La cantidad de carbono fue de 19.5 kg/m² en el tratamiento 2 y de 20.7 kg/m² en el 5, ambos fueron evaluados como de calidad media para esta variable, principalmente por la forma del carbono de mineralizarse y pasar en relativamente poco tiempo a la atmósfera. El nitrógeno fue evaluado bueno en el tratamiento 2 (1.3 kg/m²) y regular en el tratamiento 5 (0.7 kg/m²), mientras que la relación C/N fue evaluada media (18.1) en el tratamiento 2 y regular (27.8) en el 5. La cantidad de fósforo en ambos tratamientos fue evaluada como regular (36.4 y 31.3 g/m², respectivamente). Referente a la cantidad de bases intercambiables (incluyendo el sodio), en ambos tratamientos los valores fluctuaron entre 15.5 y 17.2 cmol_c/kg y fueron evaluados como regulares (Siebe *et al.*, 2016).

Aun cuando la mayoría de las variables edáficas fueron evaluadas como buenas para el crecimiento de las plantas de frijol en ambos tratamientos, todas las variables de crecimiento y productividad del tratamiento 2 fueron evaluadas con un mal desempeño, mientras que para el tratamiento 5, las variables altura y número de semillas fueron evaluadas como regulares y el resto de las variables con un desempeño medio (Tabla 16).

6.4.3 Evaluación de la calidad de los Tecnosoles con trozos de madera, compost y lombricompost

Dos de los Tecnosoles carecían de residuos de excavación o construcción: los tratamientos 3 y 6. El primer tratamiento fue mezclado con compost (31%), y el segundo con lombricompost (31%), ambos contenían 69% de trozos de madera (el doble que en el resto de los tratamientos; Figura 1). Por consiguiente, fueron los tratamientos más orgánicos y se caracterizaron por presentar una alta permeabilidad y una textura gruesa, debido al tamaño de los trozos de madera que varió de 2x3 cm a 6x2 cm. Por esta misma razón, las densidades fueron las más bajas de todos los tratamientos (0.3 g/cm³ en el tratamiento 3 y 0.2 en el 6; Tabla 16). Esta variable fue evaluada de calidad media para ambos tratamientos, ya que, aunque las plantas de frijol crecieron adecuadamente cuando desarrollaron sus frutos, el peso fue tan alto que algunas comenzaron a desestabilizarse y se les tuvo que colocar tutores para brindarles un mayor soporte. Ambos tratamientos obtuvieron valores similares en la porosidad (79.7 en el tratamiento 3 y 81 % en el 6) y esta variable fue evaluada de calidad media para los dos tratamientos, ya que el tamaño grande de los poros ocasionó que el agua se drenara con rapidez, lo cual implicó un gasto extra de la misma. Estos Tecnosoles fueron los que marcaron el momento del riego; por ello la capacidad de retención de agua disponible fue evaluada mala en ambos tratamientos (10.5 en el tratamiento 3 y 38.5 L/m² en el tratamiento 6).

En cuanto al pH fue ligeramente ácido en ambos tratamientos y se evaluó como de calidad buena para la absorción de nutrimentos. La conductividad eléctrica en ambos tratamientos fue de 1.3 mS/cm con una evaluación buena porque no afectó el crecimiento de las plantas de frijol. La cantidad de carbono en ambos tratamientos fue evaluada mala (29.9 en el 3 y 25.7 kg/m² en el 6), debido a la emisión de CO₂ a la atmósfera que pudieran aportar estos Tecnosoles. Por otra parte, la cantidad de nitrógeno fue más alta en el tratamiento 3 (1.2 kg/m²), que en el tratamiento 6 (0.8 kg/m²; Tabla 18), la primera se evaluó como buena y la segunda como media (Siebe, *et al.*, 2016). La relación C/N en el tratamiento 3 fue evaluada regular (24) y mala en el tratamiento 6 (33). La cantidad de fósforo fue evaluada como regular, presentando valores similares en los tratamientos 3 y 6 (12.4 y 10.2 g/m² respectivamente). La variable de cantidad de bases intercambiables

(incluyendo el sodio) fue muy similar en ambos tratamientos 7.5 y 5.4 cmol/kg, y se evaluó como mala para los dos (Siebe *et al.*, 2016).

Todas las variables de crecimiento y productividad del tratamiento 6 fueron evaluadas buenas, en contraparte en el tratamiento 3 fueron evaluadas regulares. El tratamiento 3 obtuvo mejores calificaciones cuanto a la calidad del suelo, y el tratamiento 6 se destacó por los resultados obtenidos en cuanto al crecimiento y la productividad de las plantas de frijol (Tabla 16).

Tratamientos		1	2	3	4	5	6	7
Evaluación de las propiedades edáficas	PT (%)	67.5	65.6	79.7	75.8	58.8	81	71.2
	DA (g/cm ³)	0.6	0.6	0.3	0.5	0.7	0.2	0.6
	pH	6.6	8.3	6	6.7	8.1	6.5	6.7
	CE (mS/cm)	0.4	0.6	1.3	1.6	0.6	1.3	2
	CRAD (L/m ²)	77	80.5	10.5	98	147	38.5	101.5
	C (kg/m ²)	19.5	23.9	29.9	14.3	20.7	25.7	10.5
	N (kg/m ²)	1.3	1.3	1.2	0.7	0.7	0.8	0.4
	C/N	14.6	18.1	24.1	21.9	27.8	33	25.4
	P (g/m ²)	18.9	36.4	12.4	39.4	31.3	10.2	33.5
	BI (cmol/m ²)	11.1	15.5	7.5	12	17.2	5.4	11.5
Desempeño de las plantas de frijol	Alt (cm)	9.77 (8.91-10.72)	8.32 (7.59-9.12)	10.23 (9.33-11.22)	10.47 (9.55-11.48)	10.47 (9.55-11.48)	15.49 (14.13-16.98)	8.5 (7.94-9.33)
	Cob (cm ²)	125.89 (107.15-147.91)	114.82 (97.72-134.90)	173.78 (147.91-204.17)	190.55 (162.18-218.78)	234.42 (204.17-275.42)	389.05 (331.13-446.68)	60.26 (52.48-69.18)
	Dia (mm)	2.95 (2.82-3.16)	2.95 (2.82-3.09)	3.09 (2.95-3.24)	3.31 (3.09-3.47)	3.39 (3.24-3.55)	3.89 (3.72-4.07)	3.16 (3.02-3.31)
	BT (g)	0.72 (0.55-0.95)	0.54 (0.42-0.69)	0.98 (0.76-1.29)	0.98 (0.74-1.26)	1.45 (1.12-1.91)	2.45 (1.91-3.24)	0.76 (0.56-1.02)
	Nº de semillas	15.49 (10.96-21.38)	9.13 (6.61-12.59)	21.88 (16.22-30.2)	16.22 (11.75-22.39)	24.55 (18.2-33.11)	56.23 (41.69-75.86)	5.75 (3.55-9.12)
	BS (g)	1.48 (1.02-2.14)	0.98 (0.66-1.41)	2.57 (1.78-3.63)	1.74 (1.2-2.51)	3.09 (2.19-4.37)	8.13 (5.75-11.48)	0.58 (0.33-1.02)
Evaluación de la propiedades edáficas y rasgos de las plantas de frijol								
		Muy buena	Buena	Media	Regular	Mala		

Tabla 16. Evaluación de la calidad de los siete Tecnosoles y desempeño de las plantas de frijol.

Donde: Porosidad total (PT); Densidad aparente (DA); Conductividad Eléctrica (CE); Capacidad de retención de agua disponible (CRAD); Bases intercambiables (BI); Altura (Alt); Cobertura (Cob); Diámetro (Dia); Biomasa total (BT); Biomasa de semillas (BS).

6.5 Rasgos funcionales

6.5.1 Modelos lineales de las variables de rasgos funcionales

6.5.1.1 Biomasa del tallo (Bto)

Para la variable biomasa del tallo el modelo de regresión lineal simple explicó el 46% de la variación (Tabla 17). Únicamente el tratamiento 6 resultó distinto al tratamiento representado en el intercepto (tratamiento 1). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 18, Figura 14) muestra la existencia de dos grupos homogéneos. Los tratamientos 7, 2 y 3 presentaron los valores medios más bajos y fueron significativamente distintos al tratamiento 6 que presentó los valores medios más altos (3.51 g).

Tabla 17. Resultados del modelo lineal para la variable biomasa del tallo entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	0.50	1.48	0.006
2	0.63	-0.40	0.526
3	0.66	0.15	0.822
4	0.63	0.92	0.158
5	0.63	0.70	0.279
6	0.63	2.02	0.003
7	0.63	-0.71	0.269
R^2 / R^2 ajustada	0.572 / 0.469	n=25	

Tabla 18. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable biomasa del tallo entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	0.77	0.39	25.00	-0.03	1.57	a
2	1.08	0.39	25.00	0.28	1.88	a
3	1.64	0.43	25.00	0.75	2.53	a
1	1.49	0.50	25.00	0.46	2.52	ab
5	2.19	0.39	25.00	1.39	2.99	ab
4	2.41	0.39	25.00	1.61	3.21	ab
6	3.51	0.39	25.00	2.71	4.31	b

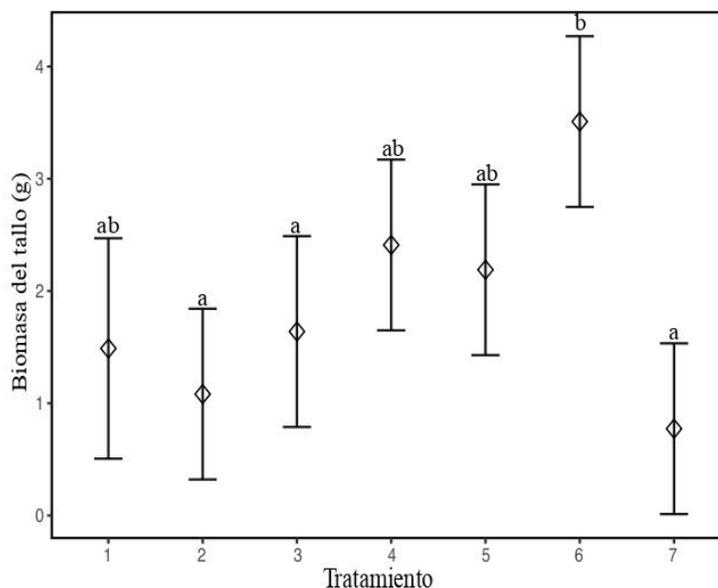


Figura 14. Promedios estimados de la biomasa del tallo entre tratamientos.

6.5.1.2 Contenido foliar de materia seca (CFMS)

Los datos fueron transformados mediante logaritmo decimal para cumplir con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Para esta variable el modelo de regresión lineal simple explicó el 41% de la variación (Tabla 19). En los resultados de la prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 20, Figura 15) se observa la existencia de dos grupos homogéneos. El tratamiento 7 fue significativamente diferente al resto y presentó los valores de CFMS más bajos (316 mg/g), el resto de los tratamientos no presentó diferencias estadísticamente significativas entre sí, aunque nuevamente los valores medios con tendencia a ser más altos corresponden al tratamiento 6.

Tabla 19. Resultados del modelo lineal para la variable CFMS entre tratamientos.

Variabes (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	0.06	2.63	<0.001
2	0.08	0.10	0.214
3	0.09	0.15	0.088
4	0.08	0.15	0.071
5	0.08	0.13	0.118
6	0.08	0.19	0.032
7	0.08	-0.13	0.131
R^2 / R^2 ajustada	0.529 / 0.416		n=25

Tabla 20. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable CFMS entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	2.50	0.05	25	2.39	2.60	a
1	2.63	0.06	25	2.49	2.76	ab
2	2.73	0.05	25	2.63	2.84	b
5	2.76	0.05	25	2.66	2.87	b
3	2.78	0.05	25	2.67	2.90	b
4	2.78	0.05	25	2.68	2.89	b
6	2.82	0.05	25	2.71	2.92	b

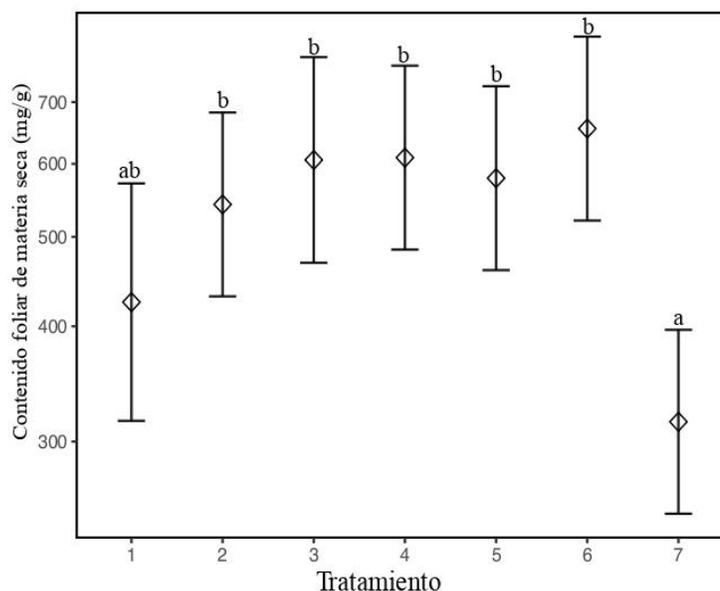


Figura 15. Promedios estimados del contenido foliar de materia seca entre tratamientos.

6.5.1.3 Área foliar específica (AFE)

Para la variable área foliar específica (AFE) los datos fueron transformados con logaritmo decimal. El modelo de regresión lineal simple explicó el 22% de la variación (Tabla 21). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 22, Figura 16) muestra que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, el tratamiento 4 obtuvo los valores de AFE medios más bajos ($169.82 \text{ cm}^2/\text{g}$) y el tratamiento 1 los más altos ($239.88 \text{ cm}^2/\text{g}$).

Tabla 21. Resultados del modelo lineal para la variable AFE entre tratamientos.

VARIABLES (tratamiento)	Error estándar	Estimados	p
(Intercepto)	0.04	2.37	<0.001
2	0.05	-0.08	0.120
3	0.05	-0.01	0.920
4	0.05	-0.14	<0.001
5	0.05	-0.11	0.053
6	0.05	-0.05	0.331
7	0.05	-0.13	<0.001
R ² / R ² ajustada	0.378 / 0.228	n=25	

Tabla 22. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable AFE entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
4	2.23	0.03	25	2.17	2.30	a
7	2.25	0.03	25	2.18	2.32	a
5	2.27	0.03	25	2.20	2.34	a
2	2.29	0.03	25	2.22	2.36	a
6	2.32	0.03	25	2.26	2.39	a
3	2.37	0.04	25	2.30	2.45	a
1	2.38	0.04	25	2.29	2.46	a

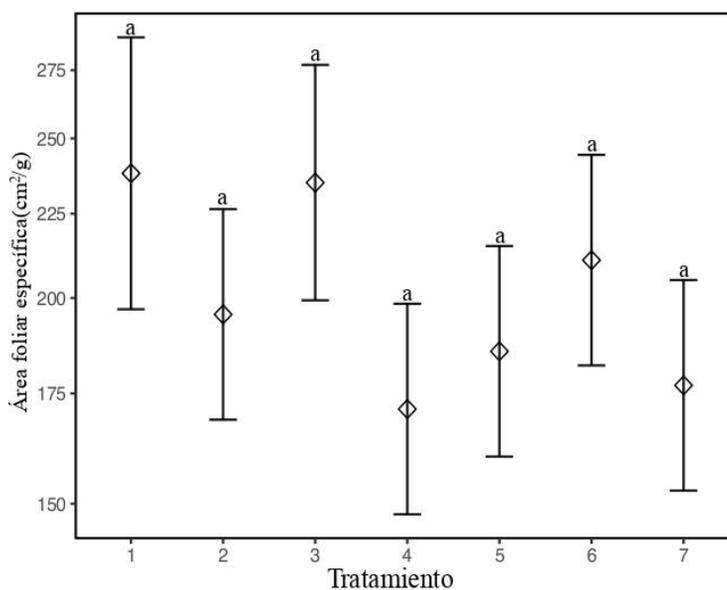


Figura 16. Promedios estimados de la área foliar específica entre tratamientos

6.5.1.4 Longitud radicular específica (LRE)

Para la variable longitud radicular específica (LRE), el modelo de regresión lineal simple explicó el 17% de la variación (Tabla 23). El valor estimado para el intersepto fue 21.88 cm/g, para las plantas que crecen en el tratamiento 1 (residuos de excavación y compost). En la prueba

post hoc de Tukey-Kramer (Tabla 24, Figura 17) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, sin embargo, el tratamiento 2 presentó los valores medios más altos y el tratamiento 5 los más bajos.

Tabla 23. Resultados del modelo lineal para la variable LRE entre tratamientos.

VARIABLES (tratamiento)	Error estándar	Estimados	p
(Intercepto)	7.88	21.88	0.010
2	9.97	18.86	0.070
3	10.43	11.93	0.263
4	9.97	-2.47	0.806
5	9.97	-7.32	0.469
6	9.97	-1.24	0.901
7	9.97	1.98	0.843
R ² / R ² ajustada	0.338 / 0.179		n=25

Tabla 24. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable LRE entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
5	14.6	6.11	25	1.99	27.1	a
4	19.4	6.11	25	6.83	32.0	a
6	20.6	6.11	25	8.07	33.2	a
1	21.9	7.89	25	5.65	38.1	a
7	23.9	6.11	25	11.29	36.5	a
3	33.8	6.83	25	19.76	47.9	a
2	40.8	6.11	25	28.17	53.3	a

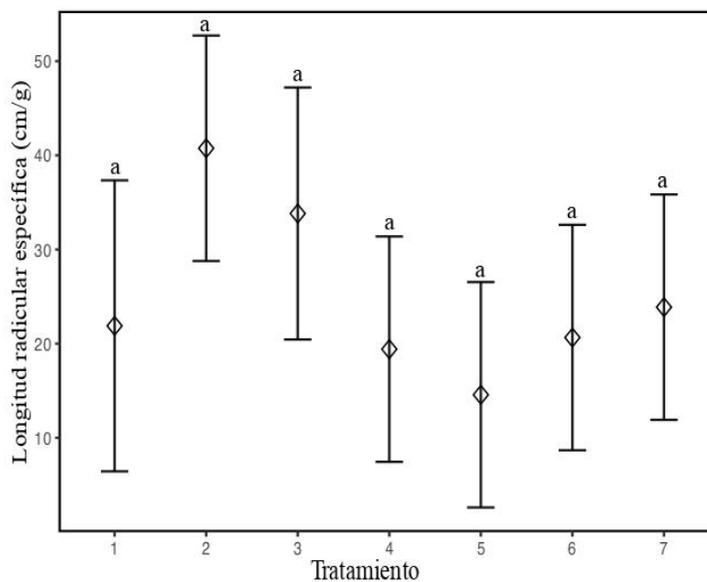


Figura 17. Promedios estimados de la longitud radicular específica entre tratamientos.

6.5.1.5 Densidad del tejido radicular (DTR)

Después de transformar los datos con logaritmo decimal, el modelo de regresión lineal simple explicó el 40% de la variación (Tabla 25). La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 26, Figura 18) revela la existencia de dos grupos homogéneos. El tratamiento 1 presentó los valores de DTR más bajos (0.07 g/cm³). Los tratamientos 4 y 5 mostraron los valores más altos (0.11 y 0.12 g/cm³ respectivamente). El resto de los tratamientos no presentó diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Tabla 25. Resultados del modelo lineal para la variable DTR entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	0.05	-1.18	<0.001
2	0.07	0.02	0.756
3	0.07	0.16	0.037
4	0.07	0.23	0.001
5	0.07	0.24	0.001
6	0.07	0.13	0.064
7	0.07	0.20	0.008
R ² / R ² ajustada	0.516 / 0.400	n=25	

Tabla 26. Resultados de la prueba *post hoc* de Tukey para la variable DTR entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
1	-1.18	0.05	25	-1.30	-1.07	a
2	-1.65	0.04	25	-1.25	-1.07	a
6	-1.05	0.04	25	-1.14	-0.96	ab
3	-1.02	0.04	25	-1.12	-0.92	ab
7	-0.98	0.04	25	-1.07	-0.89	ab
4	-0.95	0.04	25	-1.04	-0.86	b
5	-0.93	0.04	25	-1.03	-0.85	b

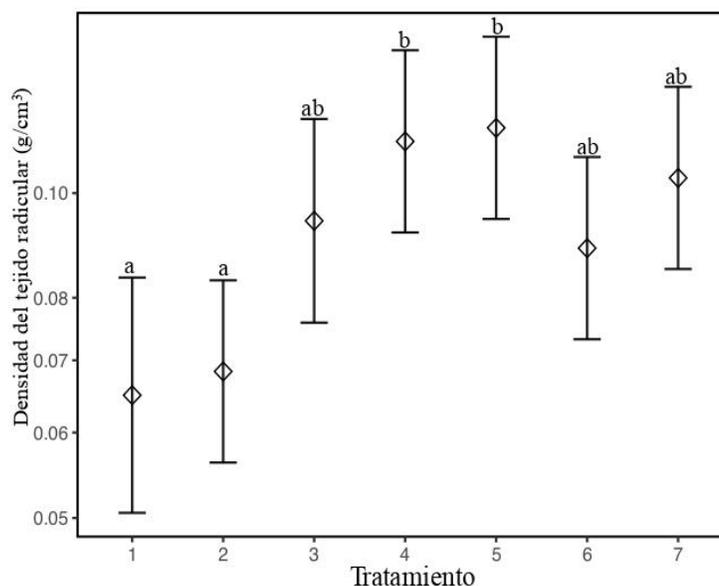


Figura 18. Promedios estimados de la densidad del tejido radicular entre tratamientos.

6.5.1.6 Área superficial específica de la raíz (ASER)

Para la variable área superficial específica de la raíz (ASER) el modelo de regresión lineal simple explicó el 16% de la variación (Tabla 27). Los resultados de la prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 28, Figura 19) muestran la existencia de dos grupos homogéneos. El tratamiento 5 presentó los valores de ASER más bajos ($217 \text{ cm}^2/\text{g}$). Por el contrario, el tratamiento 2 presentó los valores más altos para esta variable ($502 \text{ cm}^2/\text{g}$).

Tabla 27. Resultados del modelo lineal para la variable ASER entre tratamientos.

Variables (tratamiento)	Error estándar	Estimados	<i>p</i>
(Intercepto)	80.10	339.74	<0.001
2	101.32	161.90	0.122
3	105.96	36.53	0.733
4	101.32	-59.32	0.563
5	101.32	-123.13	0.235
6	101.32	-38.33	0.708
7	101.32	-5.04	0.961
R^2 / R^2 ajustada	0.329 / 0.168		n=25

Tabla 28. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable ASER entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
5	217	62.0	25	88.8	344	a
4	280	62.0	25	152.6	408	ab
6	301	62.0	25	173.6	429	ab
7	335	62.0	25	206.9	462	ab
1	340	80.1	25	174.8	505	ab
3	376	69.4	25	233.4	519	ab
2	502	62.0	25	373.9	629	b

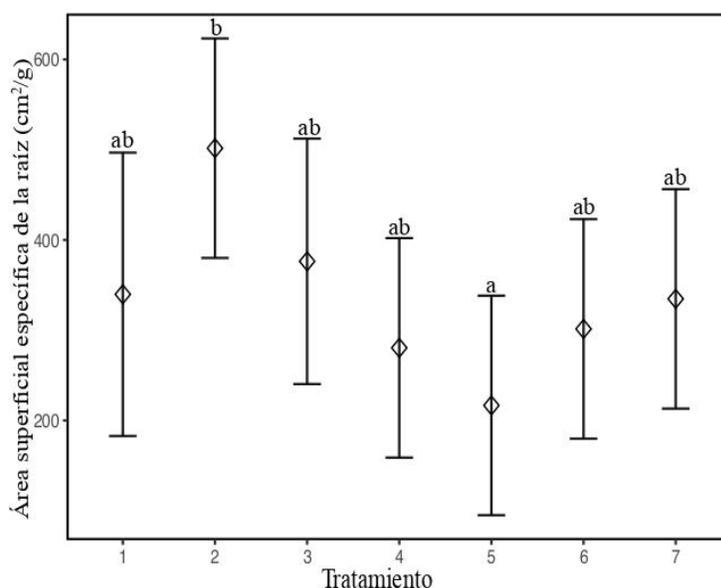


Figura 19. Promedios estimados del área superficial específica de la raíz entre tratamientos.

6.5.1.7 Biomasa de las raíces finas (BRF)

El modelo de regresión lineal simple explicó el 49% de la variación (Tabla 29). El valor estimado para el intercepto fue 4.27 g, para las plantas que crecieron en el tratamiento 1. La prueba *post hoc* de Tukey-Kramer (Tabla 30, Figura 20) reveló la existencia de dos grupos homogéneos. Los tratamientos 7 y 2 presentaron los valores promedio de BFR más bajos (2.88 y 3.71 g respectivamente). Por el contrario, el tratamiento 6 presentó los valores más altos para esta variable (7.78 g).

Tabla 29. Resultados del modelo lineal para la variable BRF entre tratamientos.

Variables	Error estándar	Estimados	p
(Intercepto)	0.80	4.27	<0.001
2	1.01	-0.56	0.581
3	1.06	0.93	0.387
4	1.01	0.71	0.488
5	1.01	0.14	0.889
6	1.01	3.50	0.002
7	1.01	-1.39	0.184
R ² / R ² ajustada	0.593 / 0.495	n=25	

Tabla 30. Resultados de la prueba post hoc de Tukey para la variable BRF entre tratamientos.

Tratamiento	Media de mínimos cuadrados	Error estándar	Grados de libertad	CL inferior	CL superior	Grupo
7	2.88	0.62	25	1.60	4.17	a
2	3.71	0.62	25	2.42	4.99	a
1	4.28	0.80	25	2.62	5.94	a
5	4.42	0.62	25	3.13	5.71	a
4	4.99	0.62	25	3.71	6.28	ab
3	5.22	0.69	25	3.78	6.65	ab
6	7.78	0.62	25	6.49	9.06	b

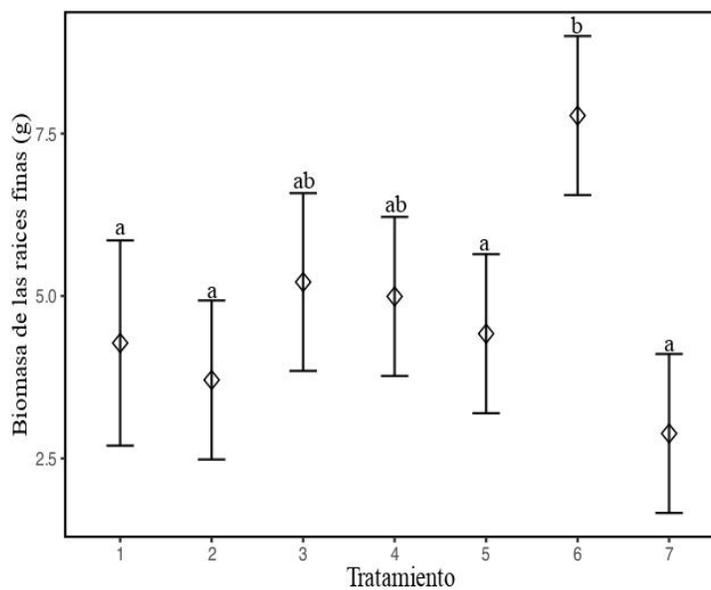


Figura 20. Promedios estimados de la biomasa de las raíces finas entre tratamientos.

6.5.2 Análisis de componentes principales de rasgos funcionales y propiedades del suelo

El análisis de componentes principales para rasgos funcionales y propiedades del suelo incluyó los siete rasgos funcionales evaluados y las variables físicas y químicas del suelo. Los resultados muestran que los dos primeros componentes principales lograron explicar el 56% de la variación de los datos y agregando un tercer componente, se explicó el 72% (Tabla 31). En el CP1 destacaron las propiedades edáficas, mientras que tres de los cuatro rasgos funcionales de raíces no tuvieron peso (Tabla 32). Las variables del suelo, porosidad, conductividad eléctrica y concentración de carbono, nitrógeno, fósforo y calcio presentan una fuerte asociación positiva entre sí. Mientras que la densidad aparente, la densidad real y el pH formaron un segundo grupo con una asociación negativa con el primer grupo de variables y con los rasgos funcionales Bto, CFMS, AFE y BRF.

Para el CP2, tomaron mayor relevancia los rasgos funcionales de raíces. Las variables LRE y ASER tuvieron una fuerte relación positiva entre ellas y con las variables del suelo: porosidad, CRAD y PT. Por el contrario, las variables DTR, CFMS y Bto covariaron positivamente con la concentración de fósforo, potasio y magnesio. El tercer componente principal tiene asociaciones positivas grandes con la CRAD, la cual mostró una asociación negativa con los rasgos funcionales CFMS, AFE, LRE y ASER.

Tabla 31. Porcentaje de variación explicada por los tres primeros componentes principales entre variables de crecimiento, biomasa y suelo.

	CP1	CP2	CP3
Desviación estándar	2.82	1.96	1.84
Proporción de varianza explicada	38.0%	18.4%	16.2%
Proporción acumulada	38.0%	56.5%	72.8%

Tabla 32. Cargas estandarizadas de los tres primeros componentes del análisis de componentes principales de las variables de crecimiento, biomasa y suelo.

Variable	CP1	CP2	CP3
Biomasa del tallo (Bto)	0.23	0.28	—
Contenido foliar de materia seca (CFMS)	0.18	0.18	-0.16
Área foliar específica (AFE)	0.12	-0.13	-0.14
Longitud radicular específica (LRE)	—	-0.31	-0.26
Densidad del tejido radicular (DTR)	—	0.29	0.24

Variable	CP1	CP2	CP3
Área superficial específica de la raíz (ASER)	—	-0.32	-0.25
Biomasa de las raíces finas (BRF)	0.28	0.17	—
Densidad aparente (DA)	-0.34	0.11	—
Densidad real (DR)	-0.27	—	0.28
Porosidad (PT)	0.29	-0.18	0.19
Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)	—	-0.21	0.46
Conductividad eléctrica (CE)	0.26	0.15	—
pH	-0.22	0.23	-0.30
C	0.32	—	-0.17
N	0.28	-0.15	-0.20
P	0.23	0.31	-0.11
K	—	0.27	-0.33
Ca	0.28	-0.16	0.27
Mg	0.11	0.26	—
C/N	-0.10	0.32	0.23
Conductividad hidráulica (Kfs)	0.28	—	0.20

Los valores representativos se muestran en negritas

En la Figura 21 se muestra el análisis de componentes principales entre el componente principal 1 (CP1) y el 2 (CP2). En la región positiva del CP1 se distribuyen los tratamientos 3 y 6 (sin residuos de excavación ni construcción), lo que refleja que las plantas en esos tratamientos tienen valores altos en las variables de rasgos funcionales CFMS, BRF y Bto (estrategia conservativa). Y también valores altos en las variables edáficas: conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y porosidad total.

Los tratamientos 2, 7 y 1 se agrupan en el cuadrante negativo de ambos componentes, reflejando una estrategia adquisitiva pues se distribuyen cerca de los valores altos para las variables ASER y LRE. Los tratamientos 4 y 5 (tratamientos con lombricompost) tienden a distribuirse cerca de los valores altos de la variable DTR y valores bajos de las variables ASER y LRE, reflejando una estrategia conservativa.

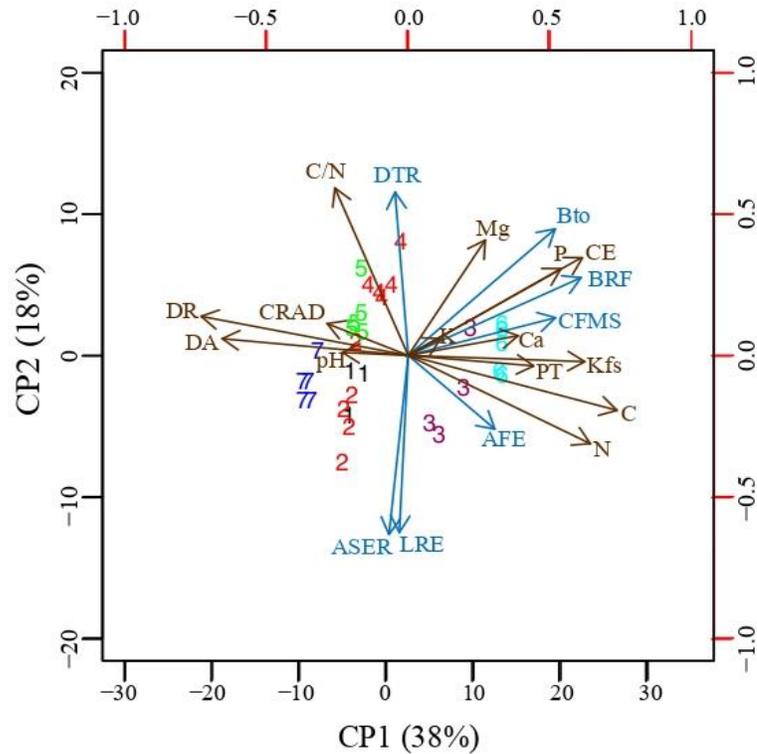


Figura 21. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de rasgos funcionales y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP2.

En la Figura 22 se muestra la covariación entre el CP1 y CP3. Nuevamente se observa una relación fuerte entre las variables BRF y Bto, las cuales covarían positivamente con la CE, la Kfs y la concentración de carbono y nitrógeno. En la región negativa del CP3 se encuentran covariando fuertemente la concentración de fósforo y el rasgo funcional de hojas CFMS.

En el cuadrante negativo del CP1 y positivo del CP3 se observa una tendencia a la agrupación de los tratamientos 1,4 y 7 (tratamientos con residuos de excavación). Los tratamientos 2 y 5 (residuos de construcción) se agruparon en el cuadrante negativo de ambos componentes, cerca de valores altos de pH y densidad aparente.

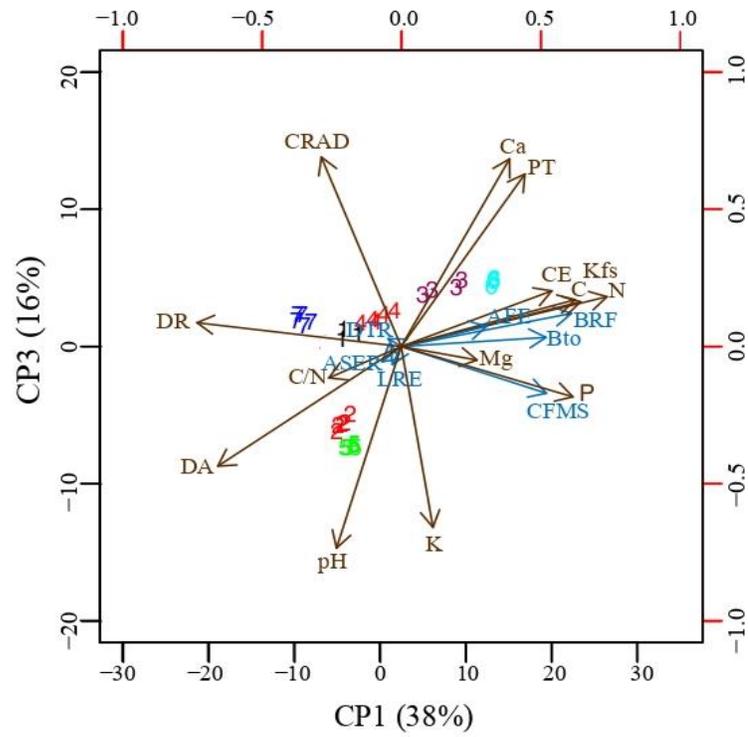


Figura 22. Representación gráfica del análisis de componentes principales de las variables de rasgos funcionales y suelo. Se muestra la covariación entre el CP1 y CP3.

VII. Discusión

7.1 Características físicas y químicas de los Tecnosoles

Los resultados de este estudio muestran que los siete Tecnosoles elaborados son viables para el crecimiento del frijol *Phaseolus vulgaris L.*, sin embargo, el desarrollo y la productividad de las plantas fue significativamente mejor en algunos de ellos. El análisis de la relación entre las variables de crecimiento y las propiedades edáficas permitió describir aquellas composiciones que favorecieron el desempeño de las plantas, y que por lo tanto se recomiendan, y también hizo posible identificar las principales limitantes de los Tecnosoles.

Con base en los resultados obtenidos podemos decir que los tratamientos 3, 4, 5 y 6 cumplieron con las funciones necesarias para el cultivo de plantas de frijol, como dar soporte y aporte de nutrimentos, aireación y agua disponible para la planta. Sin embargo, los resultados de las variables relacionadas con el crecimiento y la productividad muestran en todos los casos que el tratamiento con el mejor desempeño fue el 6, que carecía de residuos de excavación y construcción, pero presentaba lombricompost. El tratamiento 5 (lombricompost + trozos de madera + residuos de construcción) fue evaluado con una calidad media y los tratamientos 4 (lombricompost + trozos de madera + residuos de excavación) y 3 (compost + trozos de madera, sin residuos de excavación ni construcción) como regulares. El peor desempeño de las plantas de frijol se verificó en los tratamientos 1, 2 y 7, los dos primeros fueron tratamientos elaborados a base de desechos de excavación y construcción, mezclados trozos de madera y con compost, respectivamente, y el último sin ninguno de estos residuos orgánicos, mostró los valores más bajos en cuanto a crecimiento y productividad.

Estos resultados son consistentes con la literatura, pues como ya se mencionó en la introducción, se considera a los compost mejoradores del suelo porque le aportan características físicas, químicas y biológicas que resultan benéficas para las plantas. Entre estos beneficios están mejorar la retención de humedad del suelo, aumentar la porosidad, mejorar la estructura, tener la capacidad de ser amortiguadora del pH y de aumentar la disponibilidad del nitrógeno, fósforo y potasio (Atiyeh *et al.*, 2000; Nieto *et al.*, 2002; Román, Martínez y Pantoja, 2013). Sin embargo,

contrario a lo esperado, la concentración de nutrimentos esenciales para las plantas no mejoró de manera relevante con la adición de compost, pues en su mayoría los tratamientos fueron evaluados para esta variable de regular y mala calidad.

Dentro de los macroelementos primarios indispensables para el desarrollo de las plantas se encuentran el nitrógeno, el fósforo y el potasio (García, Ramírez y Sánchez, 2012). De los residuos urbanos empleados, solo los compost y los trozos de madera tenían la capacidad de aportar nitrógeno a los Tecnosoles, sin embargo, ya que la madera no se añadió triturada es posible que en los primeros años de los Tecnosoles la madera no sea una fuente relevante de nitrógeno para las plantas. Los tratamientos 1, 2 y 3 (con compost) presentaron una cantidad de nitrógeno evaluada buena (en promedio 1.3 kg/m^2), seguidos por los tratamientos 4, 5, 6 (con lombricompost) con una evaluación media (en promedio 0.7 kg/m^2), mientras que el tratamiento 7 que carece de compost presentó la cantidad de nitrógeno más reducida de todos los Tecnosoles (0.4 kg/m^2), y fue el tratamiento en el que las plantas de frijol mostraron el peor desempeño, a pesar de que se aplicaron pequeñas y continuas dosis de fertilizante. Por otra parte, el fósforo fue aportado principalmente por los compost y en menor medida por los residuos de construcción y excavación. El compost tuvo una mayor concentración de fósforo que el lombricompost (0.2%); no obstante, el fósforo disponible transformado a unidades de volumen (g/m^2), fue regular en todos los tratamientos (de 10.2 a 39.4 g/m^2).

Los compost aportaron la mayor cantidad de potasio, siendo la concentración similar para ambas. Los residuos de excavación presentaron las cantidades más altas de calcio. Los valores de calcio y magnesio fueron superiores en el compost que en el lombricompost. El magnesio fue la base intercambiable más relevante según el análisis de componentes principales de crecimiento y productividad; se puede observar que los tratamientos 4 y 7 están orientados hacia el vector de magnesio y los tratamientos 5 y 2 hacia el calcio y el potasio.

Otro elemento estrechamente asociado a la materia orgánica es el carbono, la cantidad de este elemento en los tratamientos con residuos de excavación (1, 4 y 7) varió de 10.5 a 19.5 kg/m^2 , y fue evaluado de buena calidad; en los tratamientos 2 y 5 (residuos de construcción + madera + compost y lombricompost, respectivamente) la cantidad de carbono fluctuó entre 20.7 y 23.9 kg/m^2 y se evaluó de calidad media, mientras que en los tratamientos 3 (compost + madera) y 6 (lombricompost + madera) la cantidad de carbono fue la más alta (de 25.7 a 29.9 kg/m^2) y se evaluó

como de mala calidad debido a que la forma de carbono que domina en esos Tecnosoles es lábil y aunque las emisiones de gases de efecto invernadero no fueron registrados en este estudio, se infiere que la emisión de dióxido de carbono sea mayor en estos tratamientos. La relación C/N más baja se presentó en los tratamientos 1 (14.6; residuos de excavación + compost + madera) y 2 (18; residuos de construcción + compost + madera) evaluados como de buena y mediana calidad respectivamente. Mientras que en los tratamientos 3, 4, 5 y 7 la relación C/N fluctuó de 21.9 a 27.8 y fue evaluada regular. El tratamiento 6 (lombricompost + madera) es el que presenta el valor más alto de la relación C/N (33). Valores altos de la relación C/N implican que la materia orgánica se descompone lentamente, ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno, por lo que no puede ser utilizado por las plantas; en cambio, valores entre 10 y 14 corresponden a una mineralización rápida, que estimula la actividad microbiana lo que implica una cantidad suficiente de nutrientes para los microorganismos y para las plantas (Gamarra *et al.*, 2018). Por lo tanto, los tratamientos con valores más altos de la relación C/N (3,5,7 y 6) se podría ver afectado el crecimiento y la productividad de las plantas de frijol por esta variable. Sin embargo, la lenta mineralización es una característica buscada en la construcción de Tecnosoles pues asegura una vida prolongada del Tecnosol antes de requerir adiciones de compost.

El pH es una variable importante ya que tiene una gran influencia en la disponibilidad de nutrientes para las raíces de las plantas (García, Ramírez y Sánchez, 2012). En cinco tratamientos (1, 3, 4, 6 y 7) se alcanzaron niveles ligeramente ácidos de pH (6 a 6.7), que aunque están dentro del rango tolerable para el desarrollo del frijol, no se encuentran dentro los valores óptimos para este cultivo (de 5.5 a 6.0; Corral *et al.*, 2013). Los residuos de construcción fueron el material más alcalino (pH 8.8), es por ello que en los tratamientos que contenían este material (2 y 5, pH de 8.3 y 8.1 respectivamente) la adición de compost no fue suficiente para alcanzar valores dentro del rango de desarrollo adecuado para las plantas de frijol (5.3 a 7.5; Corral *et al.*, 2013). En investigaciones futuras esto podrían mejorarse aumentando la concentración de iones hidrógeno, para fines prácticos se puede lograr aplicando azufre al suelo (Marcano, Rodríguez y Mohsin, 2003).

La conductividad eléctrica es una variable directamente relacionada con el desempeño de las plantas ya que el frijol se considera un cultivo sensible a la salinidad, tolerando valores máximos de 1 mS/cm, por encima de ese nivel los rendimientos de productividad disminuyen

(Corral *et al.*, 2013). Los resultados para esta variable muestran que todos los tratamientos presentaron conductividades eléctricas menores a 1.5 mS/cm, siendo el tratamiento 7 (sin compost) el que obtuvo el valor más bajo (0.87 mS/cm), estos resultados concuerdan con lo obtenido por Pascual, Ruíz y Melgar (2007) quienes encontraron un aumento en el contenido de nutrientes asimilables y en la conductividad eléctrica conforme aumenta el porcentaje de lombricompost, destacando que las mezclas con lombricompost son aptas siempre y cuando no se supere el 50% de este tipo de material en la mezcla debido a la elevada conductividad eléctrica que presenta y que puede representar un limitante para el desarrollo de especies sensibles.

En cuanto a las variables físicas de los suelos, uno de los procesos más importantes durante la etapa inicial de formación de los Tecnosoles es la agregación (Séré *et al.*, 2008), pues la estructura física del suelo es fundamental para dar soporte a las plantas y favorecer propiedades como la porosidad, la infiltración, la retención de agua, la aireación de las raíces y la estabilización de la materia orgánica (Deeb *et al.*, 2017). En esta investigación solo se detectó la formación incipiente de agregados en los tratamientos con residuos de excavación y compost (1, 4 y 7), en donde posiblemente, las arcillas contenidas se asociaron a la materia orgánica humificada de los compost (tratamientos 1 y 4) y del propio residuo de excavación (tratamiento 7). Por otra parte, los tratamientos 2 y 5 elaborados a partir de residuos de construcción, requerirán mucho más tiempo para formar estructura, ya que poseen partículas de mayor tamaño (5 mm).

De manera general los siete tratamientos poseen una alta porosidad, mayor del 50%, sin embargo, se destacan los tratamientos 3 y 6 (sin residuos de excavación ni construcción) por presentar los valores más altos (79 y 81%), mientras que el tratamiento 5 (residuos de construcción + lombricompost + madera) presentó el menor porcentaje de porosidad (59%), lo cual ayuda a explicar por qué las plantas que crecieron en este Tecnosol presentaron los valores más bajos de longitud y área superficial de las raíces finas (LRE y ASER). La densidad aparente se considera baja en todos los tratamientos (menor a 0.9 g/cm³), sin embargo, la alta porosidad y la baja densidad aparente en los tratamientos 3 y 6 (sin residuos de excavación ni construcción) se evaluó de calidad media, ya que presentaron un drenaje alto, lo que implicó un gasto elevado de agua para el riego de las plantas.

7.1.1 Crecimiento y productividad en las plantas de frijol y su relación con las variables físicas y químicas de los Tecnosoles

Tomando en consideración las propiedades edáficas de los Tecnosoles se distinguen tres grupos: el primer grupo está conformado por el tratamiento 1 (residuos de excavación + compost + madera), que obtuvo la mayor cantidad de variables evaluadas como de buena calidad; sin embargo, cuatro de las propiedades de este tratamiento se evaluaron como regulares, siendo estas sus principales limitantes: la capacidad de retención de agua (77 L/m^2), la cantidad de fósforo disponible (18.9 g/m^2) y las bases intercambiables (11.1 cmol/m^2). En el segundo grupo se encuentran los tratamientos 2 (residuos de construcción + compost + madera), 4 (residuos de excavación + lombricompost + madera), 5 (residuos de construcción + lombricompost + madera) y 7 (residuos de excavación + madera), que presenta algunas propiedades buenas y otras de calidad media. Las principales limitantes edáficas en el tratamiento 2 son la CRAD (80.5 L/m^2), la cantidad de fósforo (36.4 g/m^2) y bases intercambiables (15.5 cmol/m^2). Por otra parte, en los tratamientos 4, 5 y 7 las limitantes fueron la relación C/N (21.9, 27.8 y 25.4), la cantidad de fósforo (39.4 , 31.3 y 33.5 g/m^2) y las bases intercambiables (12 , 17.2 y 11.5 cmol/m^2). Adicionalmente en el tratamiento 7 la cantidad de nitrógeno total (0.43 kg m^2) también fue evaluada como regular.

El último grupo está formado por los tratamientos 3 (compost + madera) y 6 (lombricompost + madera), que presentan varias propiedades edáficas evaluadas de mala calidad. En estos tratamientos se profundizan más las deficiencias relacionadas con la capacidad de retención de agua disponible (10.5 y 38.5 L/m^2), el carbono total (29.8 y 25.7 kg/m^2) y las bases intercambiables (7.5 y 5.4 cmol/m^2). Además, la cantidad de fósforo disponible (12.4 y 10.2 g/m^2) fue evaluada regular y la relación C/N (24.1 y 33) fue regular en el tratamiento 3 y mala en el 6. En el ACP de crecimiento y productividad puede verse que los tratamientos 5 y 2 están orientados hacia las variables fósforo disponible, calcio, capacidad de retención de agua, pH, potasio y densidad. Los tratamientos 1, 4 y 7 están orientados hacia el nitrógeno total, los tratamientos 3 y 6 hacia el magnesio, el carbono total, la porosidad total y la conductividad eléctrica.

En cuanto al análisis de crecimiento de las plantas de frijol *Phaseolus vulgaris L.*, se encontraron diferencias significativas para los siete Tecnosoles en las cuatro variables de crecimiento que se estudiaron: altura máxima de la planta, diámetro basal del tallo, cobertura de

la planta y biomasa total. En todos los casos, el tratamiento que se distinguió por presentar los valores significativamente más altos fue el tratamiento 6 (lombricompost + madera).

Sin embargo, estos grupos no coinciden con los de las propiedades edáficas de los Tecnosoles. El primer grupo está formado por los tratamientos 1, 2 y 7. En estos tratamientos la mayoría de las variables de las plantas fueron evaluadas con mal desempeño, a pesar de que las plantas del tratamiento 1 se desarrollaron sobre Tecnosoles de buena calidad y las de los otros dos en Tecnosoles de mediana calidad (tratamiento 2 y 7). El siguiente grupo incluye a los tratamientos 3 y 4. En ambos la mayoría de las variables de desempeño fueron evaluadas como regulares. en este caso, las plantas se desarrollaron sobre Tecnosoles de mala (tratamiento 3) y mediana calidad (tratamiento 4). El tercer grupo está conformado por el tratamiento 5, en el que la mayoría de las variables fueron evaluadas con un desempeño medio, al igual que el Tecnosol en el que se desarrollaron. Finalmente, el último grupo está conformado por el tratamiento 6, en donde todas las variables de crecimiento y productividad fueron evaluadas con un buen desempeño, a pesar de que el Tecnosol en el que se desarrollaron fue evaluado de mala calidad, este tratamiento posee exclusivamente residuos orgánicos, y aunque no pudimos realizar evaluaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso, dióxido de carbono), por su origen orgánico, se estima que sus emisiones sean mayores a las que producen otros suelos artificiales, como los mezclados con residuos de excavación o construcción. Aún con estas limitantes, es un buen Tecnosol para cultivar plantas comestibles.

Contrariamente a lo esperado, las plantas desarrolladas en los mejores Tecnosoles tuvieron un mal desempeño (tratamientos 1 y 2), mientras que las plantas desarrolladas en el tratamiento 6 (considerado de baja calidad) presentaron un buen crecimiento y productividad.

De forma general las principales limitantes en los Tecnosoles fueron el fósforo disponible, las bases intercambiables, la relación C/N y la capacidad de retención de agua disponible. Cuando esta última variable es baja, se genera una demanda alta de agua por lo que no es recomendable en ciudades donde la disponibilidad de agua es limitada, como en la Ciudad de México.

Por otra parte, los Tecnosoles con lombricompost tuvieron valores de crecimiento más altos que aquellos con compost, estas diferencias entre las variables edáficas y de desempeño de las plantas de frijol, podrían deberse a variables no registradas y relacionadas con las propiedades biológicas de los compost, pues se infiere que una parte importante del resultado obtenido se debe

a que el lombricompost suele ser más estable que el compost, y presenta una mayor cantidad de microorganismos que transforman los nutrientes que se encuentran en la materia orgánica a formas disponibles para las plantas, favoreciendo y estimulando su crecimiento (Warman y Anglopez, 2010; Lazcano, Gómez-Brandón y Domínguez, 2008; Mora *et al.*, 2010).

Otro punto por tomar en cuenta es que el frijol tiene la capacidad de hacer simbiosis con la bacteria *Rizhobium*. Dicha asociación induce la formación de nódulos en las raíces lo que permite transformar el nitrógeno atmosférico en nitrógeno disponible para las plantas (Flores, 2015). Aunque se requiere una serie de elementos adicionales para una explicación más detallada, tales como un análisis molecular de la diversidad del microbiota en los Tecnosoles, a simple vista se pudo apreciar que a comparación del resto de tratamientos, en aquellos en los que se aplicó lombricompost la cantidad de nódulos simbióticos en las raíces fue mayor (particularmente en el tratamiento 6), mientras que las plantas del tratamiento 7 (sin compost) presentaron la densidad de nódulos más baja de todos los tratamientos. Desafortunadamente no se contempló en el estudio la parte microbiológica y esta información solo se tuvo de manera visual y no se pudo incluir en los análisis estadísticos.

A pesar de que la cantidad de nutrientes en los tratamientos con compost fue más alta que en los tratamientos con lombricompost, la mayor diversidad de microorganismos que suponemos que están presentes en los tratamientos con lombricompost, favorecieron la formación de nódulos de fijación de nitrógeno lo que propició un mayor crecimiento de las plantas. Es por lo que las plantas de los tratamientos con lombricompost mostraron el mejor desempeño que su par correspondiente, a pesar de ser Tecnosoles con varias propiedades evaluadas de mala calidad.

En cuanto a la productividad (número y peso de semillas), se encontraron resultados similares a los de las variables de crecimiento, pues el tratamiento 6 fue el que obtuvo valores significativamente más altos de productividad y en ambos casos los tratamientos 1, 2 y 7 presentaron los valores de productividad más bajos. Estos resultados coinciden con lo reportado por Arancon *et al.* (2005) quienes señalan que el aporte de la población microbiana de la lombricompost acelera los procesos de degradación de la materia orgánica, lo que contribuye a incrementar el rendimiento de los cultivos y en el caso específico del frijol. Fernández-Luqueño *et al.* (2010) encontraron que la adición de lombricompost en el suelo aumentó la cosecha de frijol y estuvo relacionada positivamente con el aumento de nitrógeno disponible. La capacidad de fijar

el nitrógeno atmosférico permite que las leguminosas y en este caso el frijol pueda ser cultivado favorablemente en suelos incipientes con una baja disponibilidad de nutrientes, aunque su desempeño no sea el mejor, las plantas pueden crecer y tener una producción considerable. En estas etapas iniciales de los Tecnosoles las leguminosas podrían servir para mejorar las condiciones de nitrógeno en estos suelos.

Debido a que el mejor tratamiento es el 6, que carecía de residuos inorgánicos, parece posible que estos resultados se deban a que la cantidad de compost y lombricompost aplicada en los Tecnosoles fue insuficiente. Los residuos de excavación y construcción son materiales inertes que para poder “activarse” y cumplir con las funciones que realizan los suelos naturales es necesario que al elaborar los Tecnosoles se “inoculen” con una cantidad suficiente de composta. Estos hallazgos sugieren que la cantidad de compost es fundamental y que tiene una estrecha relación con la cantidad de microorganismos que contengan estos residuos orgánicos. Esto se corrobora con los resultados de la segunda parte de este experimento, en donde se les agregó una mayor cantidad de compost a los tratamientos y a otros se les adicionó biocarbón (un mejorador de suelos), siendo los tratamientos con residuos de construcción y excavación los que fueron más productivos en cuanto a biomasa de plantas y semillas, y con menores emisiones de gases de efecto invernadero (Dávila, 2020).

7.2 Expresión de rasgos funcionales

En relación con el espectro económico de plantas, los resultados señalan que las plantas de frijol mostraron diferencias en la expresión de rasgos funcionales en función de las propiedades de los Tecnosoles. En el caso de los rasgos funcionales foliares se encontraron diferencias significativas únicamente para la variable contenido foliar de materia seca (CFMS). La evaluación de dicha variable sugiere que las plantas que crecieron en el tratamiento 7 (residuos de excavación + trozos de madera) presentaron una estrategia adquisitiva. Estos resultados son contradictorios con la hipótesis de que las plantas que crecen en suelos infértiles tienen valores altos de CFMS en comparación de las plantas que se desarrollan en suelos con alta fertilidad (Ordoñez *et al.*, 2009; Jager *et al.*, 2015), pues en la evaluación edafocológica el tratamiento 7 no fue evaluado como el

de mejor calidad y en cuanto al desempeño de crecimiento y productividad este Tecnosol fue el que mostró el peor desempeño en todos los casos.

De manera similar, se encontraron resultados opuestos a la hipótesis para las variables de biomasa de los rasgos funcionales de hojas, tallo y raíces. Nuevamente el tratamiento 6 (lombricompost + trozos de madera) obtuvo los valores más altos en cuanto a las variables: biomasa de las raíces finas (BRF), biomasa del tallo (Bto) y contenido foliar de materia seca (CFMS). Por el contrario, los tratamientos 7 (residuos de excavación + madera), 2 (residuos de construcción + compost + trozos de madera) y 1 (residuos de excavación + compost + trozos de madera) obtuvieron los valores promedio más bajos para estas variables (Figura 21). En el caso de este estudio, los rasgos funcionales de biomasa no fueron un buen indicador para identificar el manejo de recursos de las plantas como de tipo adquisitivo o conservativo, pues, aunque la teoría del espectro económico nos dice que aquellas plantas que se desarrollan en suelos con alta fertilidad tienen valores bajos de biomasa y responden a una estrategia de tipo adquisitiva (Ordoñez *et al.*, 2009; Jager *et al.*, 2015). En este caso se obtuvieron resultados contrarios a esta hipótesis. Se observó que, aunque las plantas tuvieron una mayor biomasa en el tratamiento 6 esto se debió a que crecieron mejor pues las características ambientales del suelo les favorecieron, lo que les permitió a las plantas asignar una mayor cantidad de recursos al crecimiento, pero no necesariamente significa que hayan adoptado una estrategia de tipo conservativa. Por el contrario, las plantas que crecieron en el tratamiento 7 presentaron valores bajos para las variables de biomasa, pero no porque hayan tenido una estrategia de tipo adquisitiva sino porque su crecimiento fue muy bajo (Figura 23).

Por otro lado, los rasgos más útiles en este estudio fueron los que reflejan una inversión en área o longitud por unidad de carbono. Por ejemplo, para las variables longitud radicular específica (LRE) y área foliar específica (AFE) no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Estos resultados parecen indicar que las características de los tejidos de las plantas son similares a pesar de que hayan tenido una marcada diferencia entre tratamientos en cuanto a biomasa y crecimiento.

Únicamente se encontraron indicios que nos indiquen las estrategias de adquisición de recursos de las plantas en dos de los rasgos estudiados: área superficial específica de la raíz (ASER) y densidad del tejido radicular (DTR). Las plantas que crecieron en el tratamiento 2 (compost +

residuos de construcción + madera) presentaron una estrategia adquisitiva, es decir, valores promedios altos para la variable área superficial específica de la raíz (ASER) y valores bajos en la variable densidad del tejido radicular (DTR). El tratamiento 1 (compost + residuos de excavación + madera) también se destacó por su expresión adquisitiva, pues fue significativamente diferente al resto por tener valores bajos de DTR. Aunque los tratamientos 1 y 2 presentaron una buena evaluación en la mayoría de las propiedades edáficas, ambos pertenecen al grupo de los tratamientos con peor desempeño en las variables de crecimiento y productividad.

Por otro lado, las plantas que crecieron en el tratamiento 5 (residuos de construcción + lombricompost + trozos de madera) presentaron una estrategia conservativa, es decir, valores bajos en la ASER y valores altos en la DTR. El tratamiento 4 (residuos de excavación + lombricompost + trozos de madera) también presentó una estrategia conservativa para la variable DTR. Sin embargo, ninguno de los dos tratamientos fue considerado como de mala calidad edafológica y en las variables de crecimiento y productividad, el tratamiento 5 fue catalogado como de calidad media y el 4 como regular.



Figura 23. Plantas creciendo sobre el tratamiento 6 (izquierda) y tratamiento 7 (derecha).

A pesar de que el tratamiento 6 (lombricompost + trozos de madera) fue evaluado como de mala calidad para las variables: capacidad de retención de agua disponible (CRAD), carbono orgánico total, relación C/N y bases intercambiables, fue el tratamiento en el que las plantas se desempeñaron mejor. Es decir, las variables evaluadas como de mala calidad no afectaron el desarrollo de las plantas.

En el caso de la variable CRAD presentó valores bajos lo que representó un mayor gasto de agua para el riego de las plantas, sin embargo, las plantas no sufrieron estrés hídrico ya que fueron regadas constantemente, incluso los tratamientos 3 (compost + trozos de madera) y 6 (lombricompost + trozos de madera) fueron los que marcaron el riego.

La variable carbono orgánico total también se evaluó como de mala calidad en los tratamientos 6 y 3, no obstante, una cantidad alta de materia orgánica incluso favorece el crecimiento de las plantas. Pero la evaluación se dio por considerar desde el punto de vista ambiental que dichos tratamientos pudieran implicar una emisión alta de dióxido de carbono a la atmósfera, aunque esta variable no se midió en este experimento.

Por otra parte, aunque el tratamiento 6 presentó valores altos en la relación C/N las plantas crecieron bien debido a la capacidad del frijol de hacer simbiosis mutualista con la bacteria *Rizhobium* lo que le permite transformar el nitrógeno atmosférico en nitrógeno disponible para las plantas (Flores, 2015). Esto se corrobora en el análisis de componentes principales que incluye las variables de crecimiento de las plantas y propiedades edáficas (Figura 12), en donde se observa que la variable nitrógeno total covarió de manera negativa con las variables de crecimiento, mientras que la relación C/N covarió de manera positiva con dichas variables. Este comportamiento es contrario a la teoría y comprueba que en el caso particular del cultivo de frijol los valores altos de la relación C/N no influyeron en el crecimiento de las plantas, pero es un factor importante a considerar en el caso de sembrar otros cultivos.

Finalmente, es importante recalcar la relevancia de las propiedades biológicas de los Tecnosuelos ya que para el tratamiento 6 y el resto de los tratamientos con lombricompost el crecimiento de las plantas fue significativamente más alto que el de los tratamientos con similar composición pero con compost.

Recomendaciones para futuros estudios

Para futuras investigaciones se recomienda abordar con mayor detalle la cuantificación de metales pesados en los Tecnosuelos. En el Anexo A se presenta la concentración total de metales pesados presentes en los materiales (A.1) y en los Tecnosuelos (A.2). Sin embargo, la cuantificación de la concentración total no proporciona la información suficiente acerca del riesgo de toxicidad (Singh y Kalamdhad, 2013). Para conocer la solubilidad, movilidad, biodisponibilidad y toxicidad se puede utilizar el método de especiación química o fraccionamiento (González-Flores *et al.*, 2011). La importancia de este análisis radica en que los metales pesados tienen la propiedad de ser acumulativos. Pueden ser absorbidos por las raíces de los cultivos afectando la salud humana a través de la cadena trófica; o bien pueden causar la contaminación de las aguas subterráneas (Rueda *et al.*, 2011). Asimismo, es importante no dejar de lado el análisis de las emisiones de carbono a la atmósfera en la construcción de Tecnosuelos por su impacto en el efecto invernadero.

En cuanto a la caracterización de los Tecnosuelos y por los resultados obtenidos, sería interesante incluir en la descripción de su estudio análisis biológicos. También se recomienda determinar la estabilidad de agregados una vez al año para monitorear su evolución. Para mejorar el crecimiento de las plantas de *Phaseolus vulgaris L.* en los Tecnosoles con residuos de excavación y construcción se sugiere la adición de un porcentaje mayor del 31% de compost (preferiblemente lombricompost).

VIII. Conclusiones

La investigación ha demostrado que los Tecnosoles elaborados a partir de compost, lombricompost, madera de poda de árboles trozada y residuos de excavación y construcción, son viables para el cultivo de frijol *Phaseolus vulgaris L.* Representan una alternativa sostenible para el manejo de los residuos sólidos urbanos y ante la extracción de suelo natural; en este estudio utilizaron aproximadamente 24.85 m³ de Tecnosoles evitando la extracción de suelos forestales.

Se comprobó que los compost favorecieron el crecimiento y la productividad de *Phaseolus vulgaris L.* Los resultados demuestran que los Tecnosoles con lombricompost tuvieron valores de crecimiento significativamente más altos que aquellos con que contenían compost. En todos los casos el tratamiento con el mejor desempeño fue el 6 (lombricompost + trozos de madera).

El tratamiento 6 (con lombricompost y trozos de madera) resultó el mejor Tecnosol por favorecer el cultivo de frijol. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, se deben considerar dos limitantes: (1) emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso) más altas que los Tecnosoles con residuos de construcción y excavación y (2) un gasto más elevado de agua para el riego de las plantas por tener un drenaje alto.

Para este estudio los rasgos funcionales de biomasa no fueron tan útiles para identificar el manejo de recursos de las plantas como de tipo adquisitivo o conservativo. Sin embargo, la cantidad de recursos asignada al crecimiento fue mayor en las plantas que crecieron sobre los tratamientos 6, 5 y 4 (que contienen lombricompost) ya que los suelos presentaron una mayor calidad.

Aunque las plantas tuvieron una diferencia significativa en las variables de biomasa, los resultados parecen indicar que las características de sus tejidos son similares. Sin embargo, se encontraron indicios de que los tratamientos 1 y 2 se orientaron más hacia una estrategia adquisitiva, mientras que los tratamientos 4 y 5 hacia una estrategia conservativa.

IX. Referencias bibliográficas

- Abbruzzini, T.F. *et al.* (2021) “Chemical, biochemical, and microbiological properties of Technosols produced from urban inorganic and organic wastes,” *Journal of Soils and Sediments*, 22(1), pp. 146–161. doi:10.1007/s11368-021-03062-2.
- Acosta-Durán, C. *et al.* (2008) “Materiales regionales utilizados en Latinoamérica para la preparación de sustratos”, *Investigación agropecuaria*, 5(2), pp. 93–106.
- Acosta, C. y Acosta, D. (2018) “Basura verde como componente de sustrato en el cultivo de *Begonia* spp. en potes”, *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), p. 221. doi: 10.15517/ma.v29i1.26456.
- Anne Naeth, M. *et al.* (2012) “Proposed classification for human modified soils in Canada: Anthroposolic order”, *Canadian Journal of Soil Science*, 92(1), pp. 7–18. doi: 10.4141/CJSS2011-028.
- Arancon, N. *et al.* (2005) “Effects of vermicomposts produced from cattle manure , food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field”, *Pedobiologia*, 49(49), pp. 297–306. doi: 10.1016/j.pedobi.2005.02.001.
- Arroyave, S. y Restrepo, F. (2009) “Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica”, *Semestre Económico*. Medellín, Colombia, 12(23), pp. 13–34.
- Atiyeh, R. *et al.* (2002) “The influence of earthworm-processed pig manure on the growth and productivity of marigolds”, *Bioresource Technology*. Ohio, USA, 81(2), pp. 103–108. doi: 10.1016/s0960-8524(01)00122-5.
- Atiyeh, R. *et al.* (2000) “Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil”, *Pedobiologia*, 44(5), pp. 579–590. doi: 10.1078/S0031-4056(04)70073-6.
- Blake, G. y Hartge, H. (1986) “Methods of Soil Analysis: Part 1- Physical and Mineralogical Methods”, en Klute, A. (ed.) *Agronomy Monograph 9*, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America. Wisconsin USA, pp. 363–382. doi: 10.2134/agronmonogr9.1.c30.
- Bosch, M. (2015) *Elabora tu propio lombricompost: el mejor humus para tu huerta, maceta y jardín*. 1ra ed. Editado por La fertilidad de la tierra. Navarra, España.
- Bravo, A. *et al.* (2008) “Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos”, *Agricultura Técnica en México*, 34(2), pp. 151–158.
- Burbano-Orjuela, H. (2016) “El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria”, *Revista de Ciencias Agrícolas*. Universidad de Nariño, 33(2), pp. 117–124. doi: 10.22267/rcia.163302.58.
- Bustos, C. *et al.* (2017) “Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión”, *Ingeniería y desarrollo*, 35(2).
- Carrasco, F. (2001) *Degradación del suelo de conservación del Distrito Federal, México*. Ciudad de México: Centro de Investigación en Geografía Ambiental, UNAM.
- CEDRSSA (2020) *Mercado del frijol, situación y prospectiva*. Ciudad de México, México.
- Chavez, M. *et al.* (2009) “Evaluación del proceso de obtención de composta por fermentación aerobia y adición de aceleradores biológicos”, *Revista de investigaciones marinas*, marzo, pp. 79–83.

- Chica-Osorio, L. y Beltrán-Montoya, J. (2018) “Demolition and construction waste characterization for potential reuse identification”, *DYNA*, 85(206), pp. 338–347. doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68824>.
- Comas, L. y Eissenstat, D. (2004) “Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species”, *Functional Ecology*, 18(3), pp. 388–397. doi: <https://doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00835.x>.
- Cornelissen, J. *et al.* (2003) “Handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide”, *Australian Journal of Botany*, 51(May 2014), pp. 335–380. doi: 10.1071/BT02124.
- Corral, J. *et al.* (2013) “Frijol”, en *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. 2da ed. Tepatlán de Morelos, Jalisco: SAGARPA, INIFAP, CIRPAC, pp. 211–218.
- Cotler, H. *et al.* (2007) “La conservación de suelos : un asunto de interés público”, *Gaceta Ecológica SEMARNAT*, pp. 5–71. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908302%0ACómo>.
- Cram, S. *et al.* (2007) “Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal”, *Investigaciones Geográficas*, pp. 81–104. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000200006.
- Dávila, D. (2020) *Evaluación de rasgos funcionales de calabaza (Cucurbita pepo L. cv “Round Zucchini”) cultivada en Tecnosoles*. UNAM.
- Debouck, D. y Hidalgo, R. (1985) *Morfología de la planta de Frijol común*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Deeb, M. *et al.* (2017) “Interactive effects of compost, plants and earthworms on the aggregations of constructed Technosols”, *Geoderma*. Elsevier, 305(February), pp. 305–313. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.06.014.
- FAO (2015) *Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables*. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>
- FAO (2017) *Mapa de Carbono Orgánico del Suelo, Alianza Mundial por el Suelo*. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i8195es/I8195ES.pdf>.
- FAO (2018) *Legumbres. Pequeñas semillas, grandes soluciones*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernández-Luqueño, F. *et al.* (2010) “Effect of different nitrogen sources on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L .)”, *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 101(1), pp. 396–403. doi: 10.1016/j.biortech.2009.07.058.
- Fernandez, J., Perez, J. y Cammeraat, L. (1994) “La medida de la humedad del suelo mediante el método TDR (Time Domain Reflectometry): estado del arte y ejemplos de aplicación”, *Investigación en Zona no saturada*, pp. 17–27.
- Flores, C. (2009) “La problemática de los desechos sólidos”, *Economía*. Mérida, Venezuela, 27, pp. 121–144. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=195614958006%0ACómo>.
- Flores, M. (2015) “El cultivo del frijol en México”, *Revista Digital Universitaria*, febrero, pp. 1–11. doi: 10.1021/bk-2012-1120.ch010.

- Gamarra, C. *et al.* (2018) “Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo”, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), pp. 4–26. doi: 10.29298/rmcf.v9i46.134.
- 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), pp. 125–137.
- Garnier, E. y Lavorel, S. (2002) “Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits : revisiting the Holy Grail”, *Functional Ecology*, 16(5), pp. 545–556.
- Ge, X. *et al.* (2013) “Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review”, *Acta Ecologica Sinica*, 33(2), pp. 102–108. doi: 10.1016/j.chnaes.2013.01.006.
- Giraldo, J. (2013) *Manual de Prácticas de Campo y del Laboratorio de Suelos*. 1ra ed, SENA. 1ra ed. Espinal, Colombia.
- González, C.G. *et al.* (2006) *Tratamiento de datos*. Editorial Díaz de Santos. España.
- González-Flores, E. *et al.* (2011) “Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), pp. 291–301.
- Hans, L. y Chapin, S. (2008) “Long-Distance Transport of Assimilates”, en *Plant physiological ecology*. 2nd ed. New York, EUA: Springer, pp. 151–162.
- Hobbie, S. (1992) “Effects of Plant Species on Nutrient Cycling”, *Trends in Ecology and Evolution*, 7(10), pp. 336–339. doi: 10.1016/0169-5347(92)90126-V.
- Huang, B. and Fry, J.D. (1998) “Root anatomical, physiological, and morphological responses to drought stress for tall fescue cultivars,” *Crop Science*, 38(4), pp. 1017–1022. doi:10.2135/cropsci1998.0011183X003800040022x.
- INEGI (2020) “Censo de Población y Vivienda”. MEX-INEGI.ESD2.01-CPV-2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/>.
- IUSS Working Group WRB (2015) *Base referencial mundial del recurso suelo, 2014. Actualización 2015, Base referencial mundial del recurso suelo 2014*. ROMA. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3794es/I3794es.pdf>.
- Jager, M. *et al.* (2015) “Soil fertility induces coordinated responses of multiple independent functional traits,” *Journal of Ecology*, 103(2), pp. 374–385. doi:10.1111/1365-2745.12366.
- Köfalusi, G. y Aguilar, G. (2006) “Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final”, *Gaceta Ecológica SEMARNAT*, pp. 39–51. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907903> (Consultado: el 24 de enero de 2019).
- Kramer-Walter, K. *et al.* (2016) “Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum”, *Journal of Ecology*, 104, pp. 1299–1310. doi: 10.1111/1365-2745.12562.
- Laich, F. (2011) *El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje*. Tenerife, España.
- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M. y Domínguez, J. (2008) “Chemosphere Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure”, *Chemosphere*, 72, pp. 1013–1019. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.04.016.
- Marcano, Á., Rodríguez, J. y Mohsin, M. (2003) “Efecto del azufre elemental sobre el pH y la solubilidad de algunos nutrimentos en fosfocomposts”, *Interciencia*, 28(9), pp. 504-511+555.

- Martínez, C. (2017) “¿A dónde van los residuos de la construcción y demolición?”, Ciencia UNAM, DGDC, 31 octubre. Disponible en: <http://ciencia.unam.mx/leer/666/-a-donde-van-los-residuos-de-la-construccion-y-la-demolicion->.
- Minitab, I., 2020. MINITAB, Available at: <http://www.minitab.com/en-US/products/minitab/>
- Mommer, L. y Weemstra, M. (2012) “The role of roots in the resource economics spectrum”, New Phytologist. Blackwell Publishing Ltd, 195(4), pp. 725–727. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04247.x>.
- Mora, V. *et al.* (2010) “Action of humic acid on promotion of cucumber shoot growth involves nitrate-related changes associated with the root-to-shoot distribution of cytokinins, polyamines and mineral nutrients”, Plant Physiology, 167, pp. 633–642. doi: 10.1016/j.jplph.2009.11.018.
- Motsara, M. y Roy, R. (2008) Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis, Fertilizer and Plant Nutrition. Rome, Italy: FAO.
- Navarro-Fernández, C. *et al.* (2010) “Diversidad funcional de rasgos radiculares y grado de micorrización de especies leñosas mediterráneas a lo largo de un gradiente de disponibilidad de recursos edáficos”, 6º Congreso Forestal Español. España, pp. 2–13.
- Nieto, A. *et al.* (2002) “El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del chile (*Capsicum annum* L.) en zonas áridas”, INTERCIENCIA, agosto, pp. 417–421.
- Ondrasek, G. *et al.* (2019) “Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications”, Science of the Total Environment, 658, pp. 1559–1573. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.243.
- Ordoñez, J.C. *et al.* (2009) “A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility,” *Global Ecology and Biogeography*, 18(2), pp. 137–149. doi:10.1111/j.1466-8238.2008.00441.x.
- Osman, K. (2014) “Soil Resources and Soil Degradation”, en Soil Degradation, Conservation and Remediation. 1st ed. Chittagong, Bangladesh: Springer, pp. 1–39. doi: 10.1007/978-94-007-7590-9.
- Parsons, D. (1990) Frijol y chícharo. 2a ed. Editado por Trillas. México.
- Pascual, M., Ruíz, M. y Melgar, R. (2007) “Empleo de vermicompost de restos hortícolas como sustrato alternativo en semilleros de plantas aromáticas”, Acta Horticulturae, 47(VIII Jornadas de Sustratos de la Sech), pp. 77–82.
- Pelea, L. (2018) “¿Cómo proceder ante el incumplimiento de las premisas de los métodos paramétricos? o ¿cómo trabajar con variables biológicas no normales?”, Revista del Jardín Botánico Nacional, junio, pp. 1–12. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/26600674%0AJSTOR>.
- Peña, J. (2015) Compost de lombrices. 1ra ed. Editado por Mundi Prensa. Madrid, España: AGRO GUÍAS.
- Pérez-Harguindeguy, N. *et al.* (2013) “New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide”, Australian Journal of Botany, 61(3), pp. 167–234. Disponible en: <https://www.publish.csiro.au/bt/BT12225>.
- Pérez-Harguindeguy, N. *et al.* (2016) “New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide”, Australian Journal of Botany, 64(3), pp. 167–234. doi: <http://dx.doi.org/10.1071/BT12225>.
- Pérez-Ramos, I. *et al.* (2012) “Evidence for a ‘plant community economics spectrum’ driven by nutrient and water limitations in a Mediterranean rangeland of southern France”, Journal of Ecology, 100(6), pp. 1315–1327. doi: 10.1111/1365-2745.12000.

- Plaster, E. (2011) "Physical properties of soil", en Delmar Cengage Learning (ed.) Soil science and management. 5th ed. New York, NY, pp. 64–79.
- Prado, B. *et al.* (2020) "Feasibility of urban waste for constructing Technosols for plant growth," *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, pp. 237–249. doi:<http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1583>.
- Prieto, I. *et al.* (2015) "Root functional parameters along a land-use gradient : evidence of a community-level economics spectrum", *Journal of Ecology*, 103, pp. 361–373. doi: 10.1111/1365-2745.12351.
- R Core Team (2020) "R: A language and environment for statistical computing". Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <https://www.r-project.org/>.
- Reeuwijk, L. (2002) Procedures for soil analysis. 6th ed. Editado por L. P. Van Reeuwijk. Wageningen, Netherlands: Internacional Soil Reference and Information Centre.
- Regent Instruments Inc (2018) "Mac/WinRHIZO. Basic, Reg & Pro for washed root measurement". Disponible en: www.regentinstruments.com.
- Reich, P. (2014) "The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: A traits manifesto", *Journal of Ecology*, 102(2), pp. 275–301. doi: 10.1111/1365-2745.12211.
- Restrepo, J., Martínez, T. y Carmona, M. (2007) Manual técnico. Buenas prácticas agrícolas (BPA) en la producción de frijol voluble. 1ra ed, Buenas prácticas agrícolas en la producción de Fríjol Voluble. 1ra ed. Editado por Colombia. FAO-MANA-CARPOICA. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10918.pdf>.
- Reyes, J. (2004) "El Problema de la basura en la Ciudad De México". Ciudad de México, México: Adolfo Christlieb Ibarrola. Fundación de Estudios Urbanos y Metropolitanos, p. 82. Disponible en: http://www.paot.mx/contenidos/paot_docs/pdf/basura_df.pdf.
- Riva, E. *et al.* (2014) "Rasgos funcionales en el género Quercus: estrategias adquisitivas frente a conservativas en el uso de recursos", *Ecosistemas*, pp. 82–89. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54031601011>.
- Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2013) Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. 1ra ed, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 1ra ed. Santiago de Chile: FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>.
- Ronald, A. y Richard, B. (2002) "Aspectos biotecnológicos de la ecología microbiana", en *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. 4ta ed. Madrid, España: Pearson Educación, p. 696.
- Rueda, G., Rodríguez, J. y Madriñán, R. (2011) "Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia," *Acta agronómica*, 60(3), pp. 203–218.
- SAGARPA (2017) *Planeación agrícola nacional 2017-2030*. 1ra edn. Ciudad de México, México.
- Salgado, B. *et al.* (2016) "Protocolo para la medición de rasgos funcionales en plantas", en Negrete, B. S. (ed.) *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. 1ra ed. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, pp. 36–79.
- Salinas, A. *et al.* (2012) "La historia natural del frijol (Phaseolus)", en Fundación Hérdex (ed.) *El Frijol: Un regalo de México al mundo*. 1ra ed. México, pp. 96–109.
- Salinas, F. (2018) Indicadores de calidad del suelo y productividad en cultivos de maíz bajo diferentes tipos de manejo: una integración entre la percepción de los productores y la ecología funcional de las plantas y suelos. UNAM.

- Sandoval, A., Gaxiola, J. y Chávez, J. (2010) "Plant disease in three bean cultivars of beans (*Phaseolus Vulgaris* L.) under favorable and unfavorable conditions of soil humidity", *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. Durango, México, IX(1), pp. 53–59. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545062009>.
- Schwartz, H. y Gálvez, G. (1980) "Desórdenes nutricionales", en *Problemas de Producción del Frijol: Enfermedades, Insectos, Limitaciones Edáficas y Climáticas de Phaseolus vulgaris*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), pp. 343–357.
- SEDEMA (2015a) Que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición en el Distrito Federal. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- SEDEMA (2015b) Que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal. México: Gaceta Oficial del Distrito Federal. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/Distrito Federal/wo101947.pdf>.
- SEDEMA (2017) *Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México*. Ciudad de México, México.
- SEDEMA (2020) *Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México*. Ciudad de México, México.
- SEMARNAT (2016) *Suelo de Conservación*. 1ra ed. Editado por E. Castelán y P. Leautaud. Ciudad de México, México: Dirección de Ordenamiento Ecológico del Territorio y Manejo Ambiental del Agua SEMARNAT.
- SEMARNAT (2020) *Anuario estadístico de la producción forestal 2017*. México.
- Séré, G. *et al.* (2008) "Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands", *Journal of Soils and Sediments*, 8(2), pp. 130–136. doi: 10.1065/jss2008.03.277.
- Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K. (2006) *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. 2da ed.
- Singh, J. y Kalamdhad, A. (2013) "Chemical Speciation of Heavy Metals in Compost and Compost Amended Soil - A Review," *International Journal of Environmental Engineering Research*, 2(2), pp. 27–37.
- Sokal, R. and Rohlf, J. (2012) *Introducción a la bioestadística*. Edited by Reverte. España.
- Tarbutck, E., Lutgens, F. y Tasa, D. (2013) *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. 10a ed. Madrid, España: Pearson Educación.
- Ulloa, J. *et al.* (2011) "El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos", *Revista Fuente*, pp. 5–9. Disponible en: <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/1.pdf>.
- USDA (1996) "Indicators for Soil Quality Evaluation", *Soil Quality Information Sheet*. Washington D. C., Estados Unidos, pp. 1–2.
- Vela Correa, G., Blanco, J. y Gamiño, M. (2012) "Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México", *Investigaciones Geográficas, UNAM*, julio, pp. 18–30. doi: 10.14350/rig.31007.
- Velázquez, C. y Caballero, W. (2014) "Lago Yapacari: aplicación de tecnosoles antieutrofizantes y reducción de cianobacterias", *Revista sobre Estudios e Investigaciones del Saber Académico*, pp. 71–74.
- Violle, C. *et al.* (2007) "Let the Concept of Trait Be Functional !", *Nordic Society Oikos*, 116(5), pp. 882–892.

- Warman, P. y Anglopez, M. (2010) “Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium”, *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 101(12), pp. 4479–4483. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.098.
- Wilson, P., Thompson, K. y Hodgson, J. (2002) “Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies”, *New Phytologist*, 143(1), pp. 155–162. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x>.
- Wright, I. *et al.* (2004) “The worldwide leaf economics spectrum”, *Nature*, 428, pp. 821–827. doi: <https://doi.org/10.1038/nature02403>.
- Xunta de Galicia (2008) RESIDUO - Referente a la elaboración de suelos (tecnosoles) derivados de residuos. España: Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Disponible en: https://www.xunta.gal/dog/Publicados/2008/20080125/Anuncio58E2_es.html.
- Zalba, P. *et al.* (2002) “Metodos alternativos para determinar las disponibilidades de fósforo en suelos agrícolas”, *Ciencia del Suelo*, 20(1), pp. 50–53.
- Zarco-Espinosa, V. (2010) “Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del parque estatal agua blanca, Macuspana, Tabasco”, *Universidad y Ciencia*, 26(1), pp. 1–17. doi: 10.19136/era.a26n1.179.

Anexos

A.1 Caracterización física y química de los residuos empleados para elaborar los suelos artificiales

a. Propiedades físicas, químicas y nutrientes

Los análisis realizados a los residuos utilizados para elaborar los suelos artificiales (Tabla A.1), muestran que el compost y el lombricompost tienen valores de pH casi neutros, los residuos de excavación y construcción son ligeramente alcalinos y la madera presenta un pH moderadamente ácido. La densidad real de los residuos de construcción y excavación es ligeramente mayor que el de los compost, sin embargo, se encuentra por debajo de los valores de densidad promedio de los suelos (2.65 g/cm^3 , Plaster, 2011), por lo cual al realizar las mezclas se espera que los suelos artificiales no sean tan pesados. En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), los residuos de excavación y la madera mostraron los valores más bajos, mientras que los compost tienen valores elevados de CE, superiores de 1 mS/cm , nivel por encima del cual los rendimientos del cultivo de frijol disminuyen significativamente (Schwartz y Gálvez, 1980).

De acuerdo con los análisis de los nutrientes en los materiales individuales, el calcio es particularmente abundante en los residuos de construcción, seguido por los compost (Tabla A.1). El potasio es aproximadamente seis veces más abundante en los compost que en el resto de los residuos; mientras que los residuos de excavación y construcción poseen las mayores concentraciones de aluminio y de hierro. Acorde con lo esperado, los compost presentan gran cantidad de fósforo y nitrógeno, nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.

En cuanto a la concentración de K, Ca y Mg, ambos compost presentan una mayor concentración de K y Mg que en el resto de los residuos. La concentración de K es similar en ambos compost y la concentración de Ca y Mg es más alta en el compost que en el lombricompost, sobre todo en el primer nutriente. No obstante, el aporte más importante de calcio proviene de los residuos de construcción.

Tabla A.1 Propiedades físicas, químicas y nutrientes totales de los residuos sólidos urbanos empleados para elaborar los suelos artificiales

Material	pH	Densidad	Conductividad	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Al
		real (g/cm ³)	eléctrica (mS/cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Compost	6.90	1.80	5.86	0.20	0.68	1.24	3.72	0.57	0.97	0.52
Lombricompost	6.80	1.90	7.01	1.13	0.47	1.35	2.27	0.47	0.68	0.81
Trozos de madera	5.30	*	0.58	0.81	0.04	0.25	1.56	0.12	0.03	0.02
Residuos de excavación	7.70	2.30	0.29	—	0.05	0.14	0.84	0.54	1.35	1.50
Residuos de construcción	8.10	2.50	1.97	—	0.05	0.24	5.16	0.44	1.75	0.90

NOTA: *No es posible medir esta variable por el método utilizado.

b. Concentración de metales pesados en los materiales

El análisis de metales pesados totales para los materiales utilizados para elaborar los suelos artificiales se muestra en la Tabla A.2. Se puede observar que casi todos los materiales están muy por debajo de las concentraciones máximas permitidas. Exceptuando el compost, que posee niveles de cobre y zinc (111.7 y 233 mg/kg respectivamente), por encima de los niveles permitidos por la Environment Protection Agency de los Estados Unidos (EPA, 2007), encargada de la proteger la salud humana y del ambiente: aire, agua y suelo. Sin embargo, al realizar las mezclas para elaborar los suelos artificiales dichas concentraciones de metales disminuyeron.

Tabla A2. Fraccionamiento de metales pesados en los materiales empleados para elaborar los suelos artificiales.

Material	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Compost	2.0	2.0	4.3	42.9	111.7	22.1	0.0	233.9
Lombricompost	2.0	1.0	2.7	34.6	24.1	12.3	4.5	120.4
Trozos de madera	3.0	0.5	0.1	0.0	8.8	3.5	0.0	43.2
Residuos de excavación	2.1	1.5	7.9	15.6	10.1	15.9	6.1	40.9
Residuos de construcción	0.0	1.8	5.6	16.0	76.2	17.1	20.0	68.4
NOM-147* (2004), EPA (2007)	22.0*	37.0*	250.0	280.0*	100.0	1600.0*	400.0*	200.0

As= es un metaloide, pero se incluye en esta tabla por el daño que puede ocasionar a la salud.

A.2 Caracterización física y química de los suelos artificiales

a. Nutrientes en los suelos artificiales

En relación con los nutrientes presentes en los suelos artificiales (Tabla 33), los resultados indican que tal como se esperaba, la concentración de carbono en los tratamientos 3 y 6, es mayor que en el resto; mientras que la concentración de calcio es mayor en los tratamientos 2 y 5 elaborados con residuos de construcción. Finalmente, se observa que el porcentaje de magnesio es ligeramente menor en los tratamientos en los que se emplearon residuos de construcción (2 y 5) que en el resto.

Tabla A3. Nutrientes totales en los suelos artificiales.

Tratamiento	C (kg/m ²)	N (kg/m ²)	P (g/m ²)	K (g/m ²)	Ca (g/m ²)	Mg (g/m ²)
1	19.5	1.3	18.9	0.9	8.2	1.8
2	23.9	1.3	36.4	1.0	13.5	0.7
3	29.9	1.2	12.4	0.5	5.7	1.1
4	14.3	0.7	39.4	1.1	8.7	1.8
5	20.7	0.7	31.3	1.1	15.2	0.6
6	25.7	0.8	10.2	0.3	3.8	1.1
7	10.5	0.4	33.5	0.6	8.9	1.7

b. Concentración de metales pesados en los suelos artificiales

Los resultados de la concentración de metales pesados entre los siete suelos artificiales elaborados (Tabla 4), muestran dilución en la concentración total de todos los metales pesados. Incluso en los tratamientos 1, 2 y 3 que son los suelos artificiales en los que se utilizó compost de la CDMX para su elaboración, resultaron con niveles bajos de Cu y Zn.

Tabla A4. Fraccionamiento de metales pesados en los suelos artificiales.

Tratamiento	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
1	2.1	2.0	8.2	34.6	41.6	21.2	24.7	136.4
2	1.1	1.7	5.4	92.4	38.2	31.1	29.5	112.9
3	1.6	1.0	2.6	55.8	55.9	20.0	32.6	141.9
4	0.0	1.3	6.6	73.4	15.3	34.0	5.2	66.7
5	0.0	1.3	3.9	88.1	18.3	22.5	47.6	73.6
6	0.0	0.6	2.1	70.2	18.3	17.3	4.9	38.8
7	1.9	1.7	8.1	28.0	11.3	18.6	4.8	47.2
NOM 147* (2004), EPA (2007)	22.0*	37.0*	250.0	280.0*	100.0	1600.0*	400.0*	200.0

As= es un metaloide, pero se incluye en esta tabla por el daño que puede ocasionar a la salud.